

ISSN 2587-5566

Том 87, Номер 1

Январь - Февраль 2023

ИЗВЕСТИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ



www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Том 87, номер 1, 2023

ТЕРРИТОРИАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЩЕСТВА

- Эволюция городов и разнообразие их функций
В. Л. Бабурин 5
- Городские агломерации Казахстана: тенденции социально-экономического развития
А. Г. Махрова, С. Г. Сафронов, А. Ж. Абилов 16
- Движение вверх: миграция между уровнями поселенческой иерархии в России в 2010-е годы
Н. В. Мкртчян, Р. И. Гильманов 29
-

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

- Скорости осадконакопления в горных озерах Кавказа как индикаторы темпов денудации на их водосборах
Н. В. Кузьменкова, В. Н. Голосов, Е. А. Грабенко, М. Ю. Александрин, В. А. Шишков, О. Н. Быхалова 42
- Современные тренды осадков и атмосферной циркуляции в речных бассейнах европейской части России
В. В. Попова 60
- Методы анализа иерархий в ландшафтных исследованиях
А. К. Черкашин, А. А. Фролов 77
-

ЭВОЛЮЦИЯ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

- Хронология карангатской трансгрессии Черного моря на основе данных люминесцентного датирования
Д. В. Семиколенных, Р. Н. Курбанов, Т. А. Янина 88
-

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

- Экологическая оценка изменений региональных промышленных структур в России в начале XXI века
Н. Н. Ключев 102
- Диффузное загрязнение водных объектов равнинных территорий: проблемы оценки
С. В. Ясинский, Е. А. Кашутина, М. В. Сидорова 115
- Многолетняя динамика сельского бытового водопотребления домашних хозяйств (на примере Семловского сельского округа, Ярославская область)
Г. А. Фоменко, М. А. Фоменко, К. А. Лошадкин 131
-

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

- Пространственная структура туризма Тюменской области в контексте концепции центр–периферия
М. В. Гудковских, Д. А. Дирин 147
- Гранулометрический состав абразионно-аккумулятивных пересыпей заливов Волгоградского водохранилища как индикатор нанософормирующих скоростей течения
М. С. Баранова, О. В. Филиппов, Е. С. Брызгалина, А. И. Кочеткова 164
- Сток воды, взвешенных веществ и интенсивность эрозии (центральная часть Карельского побережья)
М. В. Митяев, М. В. Герасимова 179
-

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ

Распознавание образов в задачах картографирования рельефа суши

С. В. Харченко

192

ВЗГЛЯД ГЕОГРАФА

Успешная неустойчивая индустриализация мира: 1880–1913 — уроки
для современности (размышления над книгой Л.М. Григорьева
и А.К. Морозкиной)

В. А. Шупер

207

Contents

Volume 87, No. 1, 2023

Territorial Organization of Society

The Evolution of Cities and Their Functional Diversity <i>V. L. Baburin</i>	5
Urban Agglomerations of Kazakhstan: Trends in Socioeconomic Development <i>A. G. Makhrova, S. G. Safronov, and A. Zh. Abilov</i>	16
Moving Up: Migration between Levels of the Settlement Hierarchy in Russia in the 2010s <i>N. V. Mkrtchyan and R. I. Gilmanov</i>	29

Natural Processes and Dynamics of Geosystems

Sedimentation Rates Evaluation in Caucasus Mountain Lakes as Indicators of Their Catchments Denudation <i>N. V. Kuzmenkova, V. N. Golosov, E. A. Grabenko, M. Y. Alexandrin, V. A. Shishkov, and O. N. Byhalova</i>	42
Current Trends of the Regime of Precipitation and Atmospheric Circulation over the River Basins in European Russia <i>V. V. Popova</i>	60
Methods of Analytic Hierarchy Process in Landscape Research <i>A. K. Cherkashin and A. A. Frolov</i>	77

Evolution of Natural Systems

Chronology of the Karangat Transgression of the Black Sea by Luminescence Dating <i>D. V. Semikolennykh, R. N. Kurbanov, and T. A. Yanina</i>	88
--	----

Natural Resource Use and Geoecology

Ecological Assessment of Changes in Regional Industrial Structures in Russia at the Beginning of the 21st Century <i>N. N. Klyuev</i>	102
The Current State of the Problem of Assessing the Characteristics of Water Bodies Diffuse Pollution in Lowland Watersheds <i>S. V. Yasinsky, E. A. Kashutina, and M. V. Sidorova</i>	115
Long-Term Dynamics of Rural Household Water Use (the Case of Semlovsky Rural Settlement, Yaroslavl Oblast) <i>G. A. Fomenko, M. A. Fomenko, and K. A. Loshadkin</i>	131

Regional Geographical Problems

Spatial Structure of Tourism in the Context of the “Center–Periphery” Concept: The Case of Tyumen Oblast <i>M. V. Gudkovskikh and D. A. Dirin</i>	147
Granulometric Composition of Abrasion-Accumulative Jumpers of Volgograd Reservoir Bays as an Indicator of Sediment-Forming Currents’ Speeds <i>M. S. Baranova, O. V. Filippov, E. S. Bryzgalina, and A. I. Kochetkova</i>	164
Flow Waters, Suspended Matter and Speed of Erosion of Karelian Coast <i>M. V. Mityaev and M. V. Gerasimova</i>	179

Geoinformation Systems and Mappings

Pattern Recognition in the Tasks of Landform Mapping

S. V. Kharchenko

192

View of a Geographer

Successful Unstable Industrialization of the World: 1880–1913—Lessons for Modernity
(Reflections on the Book by Leonid Grigoriev and Alexandra Morozkina)

V. A. Shuper

207

ЭВОЛЮЦИЯ ГОРОДОВ И РАЗНООБРАЗИЕ ИХ ФУНКЦИЙ

© 2023 г. В. Л. Бабурин*

Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

**e-mail: vbaburin@yandex.ru*

Поступила в редакцию 07.12.2021 г.

После доработки 25.08.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

В статье рассматриваются проблемы взаимосвязи агломерационных эффектов локализации и урбанизации. В качестве индикатора этих процессов используются взаимосвязь людности городов с числом предприятий и организаций в них. При этом предполагается, что число предприятий косвенно отражает разнообразие мест приложения труда, хотя и не взвешенное по отраслевой структуре. В результате исследования установлена статистически значимая связь между этими двумя показателями как для субъектов Федерации, так и для городов с численностью более 100 тыс. чел. Основное внимание уделяется изучению и объяснению отклонений от общей закономерности “ранг города/число предприятий в нем”. На этой основе проведена типология городов по нескольким основаниям: административный статус, экономико-географическое положение, наличие крупных градообразующих предприятий. По результатам исследования выявлены конкретные параметрические характеристики, позволяющие выделить монопрофильные города. На примере ключа исследование было продолжено для поселений меньшей людности, в результате установлено, что для них географическое положение и специализация более значимы, чем людность.

Ключевые слова: эффекты урбанизации и локализации, людность, разнообразие мест приложения труда, монопрофильность, статус, экономико-географическое положение

DOI: 10.31857/S258755662301003X, **EDN:** LDEDNX

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Изучение агломерационных процессов и динамики городских систем становится все более популярной тематикой исследований, в том числе в экономической и социальной географии. Интеллектуальное, коммуникационное и “физическое” уплотнение сети городов способствует интеграции отдельных элементов в более сложные агломерационные и наагломерационные образования, расширению вовлеченных в этот процесс территорий и формированию высокоплотных городских систем. Идет и процесс формирования виртуальных урбанистических пространств, во многом производных от характера и разнообразия экономической деятельности населения, функциональной структуры городов, географического субстрата.

Совокупность перечисленных процессов ведет к получению дополнительных экономических и социальных выгод от территориальной концентрации населения, производства и других сфер экономики в относительно близких друг от друга пунктах. Эти процессы А. Маршалл назвал агломерационными эффектами (Маршалл, 1983). Однако ряд исследователей отождествляют агломерационные эффекты с эффектами от агломера-

ции, что связано со “смещением свойств агломерации как формы расселения и агломерации как формы пространственной организации промышленного производства” (Лобанов, 2011).

Вместе с тем, очевидно, что между агломерацией и группой близко расположенных городов нет пропасти, скорее здесь проявляется эффект диалектического перехода количественных изменений (рост плотности городов в системе) в качественные – формирование агломераций в обоих смыслах этого слова. Появление таких конгломератов неизбежно ведет к нарастанию сложности производственной структуры, разнообразия мест приложения труда, досуга и отдыха на соответствующих территориях. Происходит своеобразный синергетический эффект, когда входящее в такую систему поселение, без наращивания функциональной сложности (разнообразия) на внутригородском уровне, увеличивает это разнообразие за счет наведенных агломерационных эффектов. При этом максимальный прирост разнообразия получают монопрофильные и, как правило, периферийные центры. Очевидно, что возрастает и разнообразие функций места (Бабурин и др., 2018).

Вместе с тем, очевидно, что и во внутригородской среде также наблюдаются агломерационные эффекты, связанные с нарастающим разнообразием (сложности) мест приложения труда, досуга и отдыха. Однако этот процесс более сложный. В принципе любое поселение возникает в подавляющем числе случаев как ориентированное на выполнение одной единственной функции — оборонной, торговой, транспортной, производственной, рекреационной и т.п. Постепенно градообразующая функция начинает обрастать сервисами (градообслуживающими функциями), что ведет к росту численности населения и сопровождает этот рост (Бабурин и др., 2018). Однако не все города проходят этот путь. Значительная их часть (до 1/3) сохраняют свой мнооупрофильный статус несмотря на рост численности населения и, как следствие, усеченное разнообразие, которое в свою очередь снижает свободу выбора для жителей и провоцирует миграционный отток, особенно среди молодежи как носителя инновационного сознания.

Несмотря на достаточно большое количество теоретических работ по данной проблематике, исследования агломерационных эффектов в большинстве случаев имеют эмпирический характер, что связано, с одной стороны, с запросом общества, а с другой — с возросшими возможностями работы с большими цифрами. В первом приближении в подобных исследованиях можно выделить три базовых направления выявления агломерационных эффектов и определения факторов, влияющих на концентрацию экономической деятельности, а также определения влияния агломерационных эффектов (и городских агломераций в целом) на развитие экономики (Растворцева, 2017). Такие исследования проводятся как на микро-, так и на мезо- и макроуровнях.

На микроуровне обычно проводится расчет агломерационных эффектов для предприятий, расположенных в городской черте или в промышленных агломерациях (промышленных узлах). Сегодня все чаще объектом исследования становятся особые экономические зоны, территории опережающего развития и другие формально внегородские экономические субъекты, которые по мере роста числа резидентов наращивают свою сложность и разнообразие мест приложения труда для населения близко расположенных поселений.

На макроуровне анализируются агломерационные процессы в территориальных социально-экономических системах, как правило, межрегионального уровня. В частности, это относится к мегалополисам и многоядерным агломерациям. В ряде случаев в качестве статистической базы могут быть использованы данные по экономическим районам, федеральным округам или макрорегионам в послед-

ней версии стратегии пространственного развития России¹.

Наконец, можно выделить мезоуровень, на котором находятся городские агломерации, а также города, образующие локальные внутрирегиональные системы (Бабурин, Рыбкин, 2019). В качестве объектов таких исследований могут выступать и субъекты РФ.

Исследования агломерационных эффектов обычно подразделяют на два типа: эффекты урбанизации (Джекобс-эффекты) и эффекты локализации (MAR-эффекты). Название данных эффектов связано с именами ученых, которые занимались их изучением: MAR-эффекты — А. Маршалл, а также К. Эрроу и П. Ромер, Джекобс-эффекты — Дж. Джекобс и др. (Маршалл, 1983; Jacobs, 1969).

Эффекты урбанизации имеют комплексный характер и возникают, главным образом, благодаря концентрации ресурсов и факторов производства в городах (Okubo, 2010), но не в последнюю очередь, как мы попытаемся показать и за счет географических факторов (экономико-географического положения, ресурсной базы и т.п.). Они представляют собой своеобразные внешние экономии (эффекты) от масштаба города (городской агломерации), а именно: увеличения их плотности и плотности населения, повышения концентрации и диверсификации экономической деятельности. В этом смысле они содержат внутри себя и эффекты локализации. Положительно значимое влияние Джекобс-эффектов отмечается в 45% случаев (Beaudry and Schiffauerova, 2009). При этом удвоение размера (плотности) города приводит к росту производительности на 3–8% (Rosenthal and Strange, 2003). Кроме того, производительность предприятий, расположенных в крупных городских агломерациях в среднем на 20–50% выше, чем на периферии (Okubo, 2010). Но, может быть, наиболее существенным является свобода выбора во всех ее проявлениях для человека, а значит и растет привлекательность таких мест.

Эффекты локализации представляют собой эффекты от совместной локализации предприятий во взаимосвязанных и взаимозависимых отраслях (в том случае, если речь идет о промузлах и кластерах) или наличия единых локализованных рынков рабочей силы, потребления, инфраструктуры. На основании исследования эмпирических работ по данной теме положительные MAR-эффекты подтвердились в 47% случаев (Beaudry and Schiffauerova, 2009). При этом, как отмечают зарубежные исследователи, наиболее важное значение они имеют в отраслях тяжелой промышленности (Glaeser and Kallal, 1992), которые одновременно повышают риски монопрофильности.

¹ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 февраля 2019 г. № 207-р.

Кроме того, выявлено, что эффекты локализации способствуют формированию и развитию общей научной и образовательной базы, что в конечном итоге приводит к развитию высокотехнологичных производств и повышению уровня инновационной активности (Audretsch and Feldman, 1996).

В большинстве случаев эффекты локализации изучают путем оценки концентрации экономической деятельности с помощью специальных индексов; тем самым выявляются районы концентрации определенного признака (агломерации, кластеры). Здесь мы хотели бы сконцентрировать исследовательское внимание на еще одной стороне роста городов (агломераций) — взаимосвязи сложности (разнообразия) экономических и социальных акторов, людности поселения и корректирующих факторов географического положения.

ГИПОТЕЗА, МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Если город наращивает численность своего населения и разнообразие функций, сопровождая это повышением своего административного и экономического статуса, улучшает экономико-географическое положение (ЭГП) и т.п., то будет наблюдаться прямо пропорциональная зависимость между размером городского поселения и разнообразием его функций. В простейшем случае можно говорить о количестве мест приложения труда без учета отраслевого (функционального) разнообразия и весовых коэффициентов. Отклонения от этой зависимости могут служить одним из индикаторов монопрофильности поселения.

В большинстве работ, посвященных исследованию агломерационных эффектов, их изучение проводится либо на макро- (межрегиональном), либо на микроуровне (предприятий отдельного сектора экономики). В данном исследовании мы акцентируем внимание на мезоуровень — субъект РФ, городскую агломерацию или город, имеющий городской статус, муниципальный район. Озвученные закономерности “работают” только для крупных городов, а при меньшей численности населения более значимую роль начинают играть генетически и географически обусловленные факторы.

Гипотеза исследования состоит в том, что в рамках “общего потока”, чем крупнее город, тем больше разнообразие его социально-экономической структуры. Отклонение от этого — суть сценарий монофункционального развития города, который тесно связан с наличием одного или немногих крупных предприятий.

К сожалению, открытая статистика по городам России крайне усеченная и есть только данные по

общему количеству предприятий. Однако в рамках пилотного исследования можно ограничиться и этим для выявления общих закономерностей.

Методика пилотного исследования достаточно проста и предполагает итеративную процедуру:

из базы данных по городам, представленным в сборниках Росстата, были получены сведения о численности населения и количестве предприятий;

для выявления кластеров городов по разнообразию мест приложения труда (региональные центры/столицы, приморские, в составе агломераций и моногорода) использовался показатель отношения числа предприятий к численности населения (предприятий на 1000 жителей).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На первом этапе было рассмотрено распределение предприятий по субъектам федерации (график на рис. 1). На графике хорошо видно, что между этими показателями существует очевидная корреляционная связь.

Однако переход от абсолютных к относительным показателям показывает, что ситуация более сложная и помимо размера значительную роль играет географическое положение регионов. Из табл. 1 наглядно видно очевидное лидерство двух столиц по числу предприятий на 1000 чел. населения. В лидирующую группу также входят регионы с межрегиональными центрами, приморские и приграничные, а также кольцо областей вокруг Москвы, что косвенно свидетельствует о взаимосвязи разнообразия мест приложения труда с ЭГП. В аутсайдерах, напротив, абсолютно преобладают республики Северного Кавказа и юга Сибири. Разница между регионами (без двух столиц) превышает двухкратную величину.

Однако очевидно, что основными носителями экономической активности являются города и

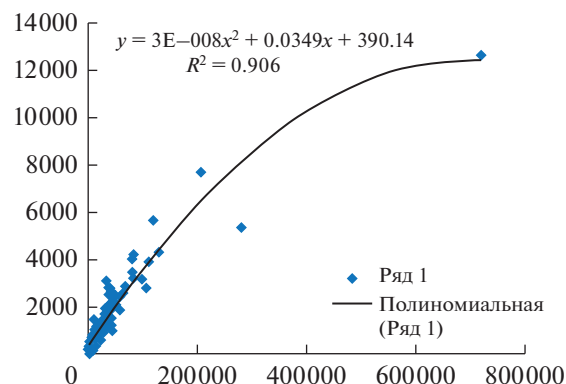


Рис. 1. Распределение предприятий в зависимости от численности населения субъектов РФ.

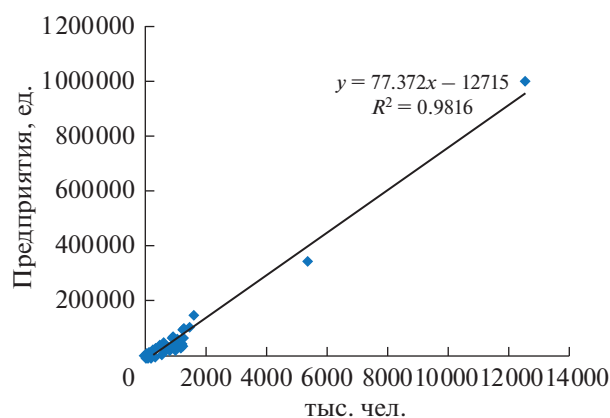


Рис. 2. Распределение городов России по соотношению численности населения и мест приложения труда.

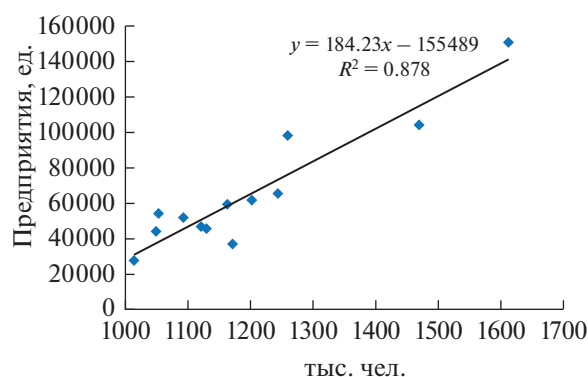


Рис. 3. Распределение городов-миллионеров России в зависимости от их людности и числа предприятий.

поэтому представляется важным перейти с макро- на мезоуровень анализа специализации и ЭГП. В результате проведенных расчетов установлено, что в целом для совокупности городов мы имеем очень высокий коэффициент корреляции (фактически функциональная зависимость) (рис. 2).

Однако при разбивании общей совокупности на категории по численности населения (миллионники, свыше 500 тыс. жителей, 250–500, 100–250, некатегорийные малые столицы) ситуация более разнообразная (рис. 3–5).

Рассмотрим верхний уровень иерархии городов (см. рис. 3). При очень высоком уровне взаимосвязи людности с простым разнообразием мест приложения труда ($R^2 = 0.9$) мы видим, что Новосибирск, Нижний Новгород и Екатеринбург, как межрегиональные центры (столицы федеральных округов) имеют максимальное разнообразие (70–90 предприятий на 1000 жителей). Явно “проваливаются” Омск и Волгоград (менее 30/1000), что связано с их “одинокостью” (особенно у Омска)

и ограниченным числом предприятий, но существенно более крупных. Фактически даже при такой численности населения они сохраняют завуалированную монопрофильность не трансформированную агломерационными эффектами.

В категории городов от 500 тыс. до 1 млн чел. мы наблюдаем резкое снижение корреляции (R^2 около 0.5) что связано с существенно большим разнообразием статусов (см. рис. 4). Прежде всего, здесь выделяются приморские региональные центры Краснодар и Владивосток (значения выше 70). С другой стороны, в этой категории уже присутствуют города, не являющиеся региональными центрами (Тольятти, Новокузнецк, Набережные Челны) и объективно лишенные части функций (прежде всего административных). При этом расположенные в составе агломераций Тольятти и Набережные Челны имеют относительно более высокие значения коэффициента (0.4 и 0.3 соответственно), а вторая столица Кузбасса – Новокузнецк – имеет минимальные значения среди городов людностью более 350 тыс. чел. населения, что напрямую является следствием отсутствия административного статуса и абсолютного преобладания тяжелой промышленности.

Вполне ожидаемо, что в следующей категории людности (см. рис. 5), коэффициент корреляции существенно снизился, а на графике мы четко увидим группу моно- или скорее полумонородов: Липецк (металлургия), Севастополь (оборона), Магнитогорск (металлургия), Сургут (нефтедобыча, электроэнергетика), Нижний Тагил (металлургия), Таганрог (металлургия), Нижневартовск (нефтедобыча). У всех них коэффициент разнообразия мест приложения труда на 1000 жителей ниже 30, в то время как у большинства административных центров он выше 40. Вновь выделяется приморский Калининград (значение более 70, что соответствует уровню городов-миллионеров и больше чем у Санкт-Петербурга). Из нерегionalных столиц выделяется также приморский Сочи со значением более 50. В то же время пониженные значения разнообразия (менее 30) имеют и региональные центры с крупными предприятиями тяжелой промышленности – Улан-Удэ, Липецк, Саранск, Курган, а также Чита с предприятиями оборонного комплекса. Минимальные значения разнообразия имеют узкоспециализированные Стерлитамак (химия) и Волжский (металлургия) – менее 20. Одновременно столь же низкие значения характерны для Владикавказа и Грозного. В первом случае это связано с фактической монопрофильностью (цветная металлургия) и повышенной долей теневого сектора экономики, а во втором – с максимальной в России долей теневого сектора.

Еще большее разнообразие типов городов наблюдается в категории от 100 до 250 тыс. жителей

Таблица 1. Разнообразие мест приложения труда в зависимости от размера региона и его географического положения

Субъект РФ	Число предприятий, 2019	Предприятия, ед. на 1000 жителей	Специализация	Население, тыс. чел.
Российская Федерация	4Е+06	26.1		146749
г. Москва	720314	56.8	Столица	12678
г. Санкт-Петербург	280663	52.0	Столица	5398.1
Калининградская область	41815	41.3	Приморский	1012.5
Новосибирская область	104192	37.2	Межрегиональный центр	2798.2
Камчатский край	10166	32.5	Приморский	313
Республика Карелия	19796	32.2	Респсевер	614.1
Вологодская область	36136	31.1	Север	1160.4
Самарская область	98036	30.8	Миллионник	3179.5
Сахалинская область	15048	30.8	Приморский	488.3
Магаданская область	4201	30.0	Приморский	140.1
Приморский край	56745	29.9	Приморский	1895.9
Свердловская область	127244	29.5	Межрегиональный центр	4310.7
Ярославская область	36546	29.2	ЦЭР	1253.4
Смоленская область	27251	29.1	ЦЭР, пригр	934.9
Хабаровский край	36916	28.1	Пригр	1315.7
Республика Татарстан	109445	28.0		3902.9
Ивановская область	27603	27.7	ЦЭР	997.1
Московская область	207485	27.0	ЦЭР	7690.9
Тюменская область без АО	40474	26.3		1537.4
Нижегородская область	83275	26.0	Межрегиональный центр	3203
Республика Саха (Якутия)	24654	25.4	Респсевер	972
Томская область	27211	25.2	Север	1079.3
Тверская область	30759	24.4	ЦЭР	1260.4
г. Севастополь	10940	24.4		449.2
Пермский край	62384	24.0	Миллионник	2599.3
Калужская область	24032	24.0	ЦЭР	1002.6
Кировская область	30086	23.8	Север	1262.4
Удмуртская Республика	35504	23.7	Респсевер	1501
Рязанская область	26174	23.6	ЦЭР	1108.8
Красноярский край	67202	23.4		2866.2
Иркутская область	55867	23.4		2391.2
Челябинская область	80405	23.2		3466.3
Республика Алтай	5015	22.8	Респ	220.2
Костромская область	14076	22.2	ЦЭР	633.4
НАО	974	22.1	Север	44.1
Владимирская область	29742	21.9	ЦЭР	1358.4
Чукотский АО	1096	21.8	Север	50.3
Псковская область	13597	21.7		626.1
Тульская область	31459	21.5	ЦЭР	1466.1
Белгородская область	33161	21.4		1549.2
Воронежская область	49434	21.3		2324.2
Новгородская область	12651	21.2		596.5
Краснодарский край	118146	20.8		5675.5
Омская область	39888	20.7		1926.7
Ульяновская область	25428	20.7		1229.8
Республика Коми	16757	20.4	Север	820.5
Алтайский край	46981	20.3		2317.1
Мурманская область	14767	19.9	Север	741.4
Республика Бурятия	19521	19.8		985.9
Ростовская область	82455	19.6		4197.8
Республика Башкортостан	78952	19.6		4038.1
ХМАО	32086	19.2		1674.7
Амурская область	14478	18.3		790
Архангельская область без АО	20009	18.3		1092.4
Курская область	20017	18.1		1104
Чувашская Республика	22051	18.1		1217.8
Республика Мордовия	14300	18.1		790.2

Таблица 1. Окончание

Субъект РФ	2019	Предприятия, ед. на 1000 жителей	Специализация	Население, тыс. чел.
Ленинградская область	33466	17.8		1875.9
Пензенская область	23268	17.8		1305.6
Саратовская область	43158	17.8		2421.9
Липецкая область	20015	17.6		1139.4
Орловская область	12797	17.4		733.5
Республика Марий Эл	11708	17.2		679.4
Оренбургская область	33596	17.2		1956.8
ЯНАО	9308	17.1		544.4
Республика Крым	32291	16.9		1912.6
Еврейская автономная	2654	16.8		158.3
Курганская область	13266	16.0		827.2
Тамбовская область	16022	15.9		1006.7
Кемеровская область	41090	15.5		2657.8
Волгоградская область	38344	15.4		2491
Республика Хакасия	8186	15.3		534.2
Брянская область	17980	15.1	ЦЭР	1192.5
Астраханская область	14772	14.7		1005.8
Республика Адыгея	6756	14.6	СК	463.1
Карачаево-Черкесская	6542	14.1	СК	465.5
Республика Калмыкия	3773	13.9	СК	271.1
Ставропольский край	38068	13.6	СК	2803.6
Республика Северная	9346	13.4	СК	696.9
Кабардино-Балкарская	11315	13.0	СК	868.4
Забайкальский край	13498	12.7	ЮС	1059.7
Республика Тыва	3614	11.0	ЮС	327.4
Республика Ингушетия	5378	10.6	СК	507.1
Республика Дагестан	30896	9.9	СК	3110.8
Чеченская Республика	10178	6.9	СК	1478.7

(рис. 6). Здесь уже абсолютно господствуют вторые и третьи города в своих субъектах федерации, с крайним разнообразием функций и географического положения. Вновь имеет повышенные значения разнообразия приморский Южно-Сахалинск, города-спутники в составе агломераций Нижнего Новгорода (Дзержинск), Новосибирска (Бердск) и Москвы (Обнинск). На другом краю спектра, со значениями ниже 15 – классические

моногорода Нижнекамск (химия), Норильск (металлургия), Салават (химия), Рубцовск (машиностроение), Белово (ТЭК), Камышин, Елец (машиностроение), Железногорск (металлургия), Серов (металлургия). В категории менее 100 тыс. жителей к ним добавляются Ноябрьск (газодобыча), Новошахтинск (менее 6) и Прокопьевск (менее 10) – уголедобыча, Тобольск (химия). Вместе с тем вновь выделяются приморские центры –

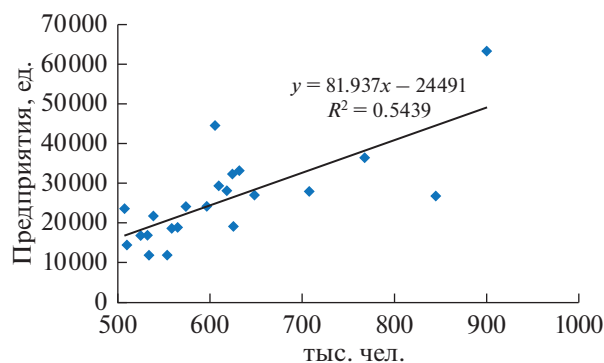


Рис. 4. Распределение российских городов по числу предприятий в зависимости от их численности.

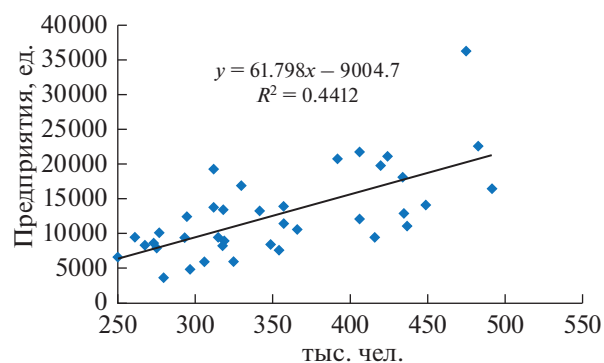


Рис. 5. Распределение российских городов по числу предприятий в зависимости от их численности.

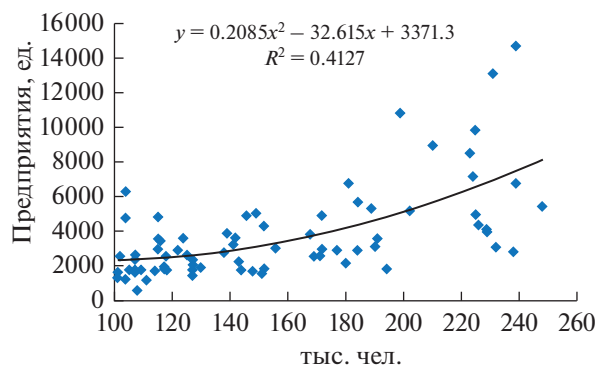


Рис. 6. Распределение российских городов людностью от 100 до 250 тыс. чел. в зависимости от их людности и числа предприятий.

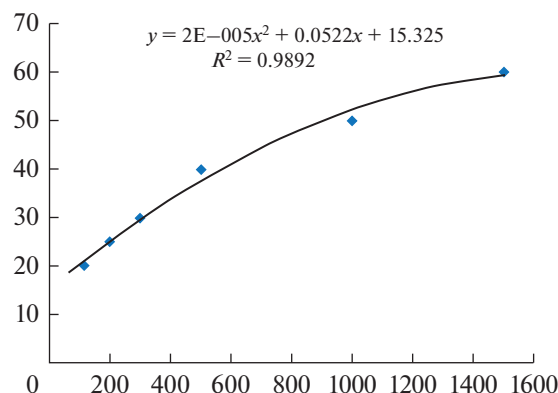


Рис. 7. Теоретическая кривая распределения числа предприятий в зависимости от людности города.

Магадан (более 40), Находка, а также Пятигорск, как ядро агломерации Кавминводы.

Крайне низкие значения разнообразия характерны и для малых столиц наименее развитых республик. Резко сниженное разнообразие характерно для столичных центров республик Северного Кавказа и юга Сибири (Назрань и Кызыл) — менее 20, что сопоставимо с монофункциональными Шахтами и Нижнекамском.

В целом, следует отметить, что в городах с населением более 330 тыс. чел. значения коэффициента не опускаются ниже 20. В то же время на общем фоне выделяется ряд городов с населением около 100 тыс. чел., имеющих достаточно высокие значения коэффициента разнообразия. Если Горно-Алтайск и Магадан имеют высокие значения как региональные центры, то Арзамас явно проявляет свою специфику места, близкого к Кремлевску (Арзамас-16) и Дивеево. Уникален Бердск (более 60), что отражает его положение в составе Новосибирской агломерации. Столь же высокие значения характерны и для Дзержинского (более 50) в составе Нижегородской агломерации. По тем же причинам выделяются Обнинск (более 40), расположенный на периферии Московского столичного региона, и Каспийск (более 30) в составе агломерации Махачкалы. Значения выше 30 отмечаются в Находке (приморское положение и в составе Большого Владивостока), приморском Новороссийске и Пятигорске (ядро агломерации Кавминводы). Выделяется в своей группе приморский Мурманск (более 40) и приграничные Смоленск и Белгород (более 50). Приморское положение и статус региональных центров определяют повышенные значения коэффициента разнообразия у Южно-Сахалинска (более 50) и Петропавловска-Камчатского (более 35).

В целом можно считать установленным закономерный рост разнообразия по мере роста людности городов. Расчет теоретической кривой рас-

пределения количества предприятий на 1000 жителей показал его закономерное снижение от 60 для полуторамиллионного Новосибирска до 50 для городов с людностью около 1 млн чел. (1.1–0.9), до 40 для городов людностью 500 тыс. чел., до 30 для центров с населением около 300 тыс. чел., до 25 для городов с людностью около 200 тыс. чел. и до 20 для городов людностью от 110 до 120 тыс. чел. Для поселений меньших по численности индивидуальные характеристики не укладываются в общие закономерности. (рис. 7).

Анализ теоретического и фактического распределения предприятий по городам в расчете на 1000 жителей показал, что максимальные превышения характерны для Новосибирска, Нижнего Новгорода и Москвы (более 20/1000), а также для приморских Владивостока, Калининграда, Южно-Сахалинска, Магадана, Находки и Ялты (более 20/1000). Вместе с тем аналогичные превышения характерны для Вологды, Петрозаводска, Дзержинского, что может быть предметом отдельного исследования. Среди средних городов высокое превышение характерно для Обнинска, Артема, Бердска (все в составе агломераций), а также малых столиц — Магаса, Анадыря, Нарьян-Мара и Салехарда (более 100), а также Биробиджана и Горно-Алтайска (более 50). При этом статус города и его монопрофильность четко влияют на разнообразие мест приложения труда (табл. 2). Среди городов с наиболее высокими значениями этого показателя преобладают межрегиональные и приморские центры, в то время как среди аутсайдеров — фактически одни монопроизводственные города.

Остается, однако, открытым вопрос о характере взаимосвязи разнообразия и численности населения для муниципальных образований в составе субъектов РФ, как правило, с численностью населения, не превышающей 50 тыс. чел. Эта проблема была рассмотрена на примере Красноярского края (табл. 3).

Таблица 2. Взаимосвязь разнообразия мест приложения труда и типов городов (первые 10 с максимальным разнообразием и последние 10 с минимальным разнообразием)

Город	Численность населения, тыс. чел.	Число предприятий	Число предприятий на 1000 жителей	Тип города
Новосибирск	1613	150 760	93	Межрегиональный центр
Москва	12507	1 001 076	80	Столица РФ
Нижний Новгород	1259	97 931	78	Межрегиональный центр
Калининград	475	36 354	77	Приморский региональный центр
Владивосток	605	44 639	74	Приморский межрегиональный центр
Екатеринбург	1469	104 720	71	Межрегиональный центр
Краснодар	900	63 353	70	Приморско-курортный региональный центр
Санкт-Петербург	5352	345 277	65	Межрегиональный центр
Вологда	312	19 414	62	Региональный центр
Петрозаводск	239	14 771	62	Столица республики
Бердск	104	6 350	61	В составе Новосибирской агломерации
Рубцовск	144	1 792	12	Моногород
Норильск	180	2 220	12	Моногород
Елец	104	1 267	12	Моногород
Нижнекамск	238	2 873	12	Моногород
Копейск	148	1 730	12	Моногород
Белово	127	1 443	11	Моногород
Керчь	151	1 627	11	Моногород
Камышин	111	1 196	11	Моногород
Прокопьевск	194	1 859	10	Моногород
Новошахтинск	108	634	6	Моногород

Составлено по расчетам автора.

Анализ характера взаимосвязи разнообразия мест приложения труда для городов и муниципальных образований с людностью менее 100 тыс. чел. был проведен на примере Красноярского края. Он показал, что на этом уровне преобладающим становятся ЭГП и специализация, а не людность поселений. Из табл. 3 видно, что максимальные значения индексов разнообразия помимо Красноярска имеют два пригородных Емельяновский и Березовский районы, фактически части агломерации, а также два бывших АО, сохранивших часть “национальной” инфраструктуры. Ожидаемо низкие значения у моногородов (Норильска, Канска, Ачинска и других). Среди муниципальных образований минимальны значения индекса для регионов, имеющих аграрную, угледобывающую и транспортно-обслуживающую специализацию.

ВЫВОДЫ

При исследованиях процессов изменения сложности и разнообразия отраслевой структуры обычно выделяют эффекты урбанизации (Джекобс-эффекты) и эффекты локализации (MAR-эффекты). Последние связаны между собой, так как и общности населения, и хозяйствующие субъекты имеют тенденцию к взаимосвязанному наращиванию разнообразия по мере роста числа жителей поселений. Однако в реальной исследовательской практике в центре внимания находились собственно агломерации, в то время как вся совокупность городов в системе расселения оставалась в тени.

Примененный в данном исследовании достаточно простой метод сопоставлений людности городских поселений с числом мест приложения труда в них показал, что наблюдается высокая взаимосвязь этих двух процессов. При этом она

Таблица 3. Распределение предприятий по муниципальным образованиям Красноярского края

Наименование	Число предприятий	Население, тыс. чел.	Индекс разнообразия предприятий на 1000 жителей	Специализация
г. Красноярск	45472	1094.0	41.6	Краевой центр
Емельяновский район	1154	53.8	21.4	Пригород Красноярска, девелопмент, машиностроение, АПК
Эвенкийский район	305	15.1	20.2	Бывший АО, ТЭК
Березовский район	807	42.1	19.2	Пригород Красноярска, девелопмент, с/х, многоотраслевой
г. Железногорск	1609	91.4	17.6	ЗАТО
Таймырский район	524	31.6	16.6	ТЭК, транспорт
г. Лесосибирск	993	64.0	15.5	Лесная
Пировский район	101	6.8	14.9	Лесная, с/х
Кежемский район	301	20.3	14.8	ЭЭ, металлургия
Казачинский район	139	9.4	14.8	С/х, лесная
г. Дивногорск	488	33.5	14.6	ЭЭ, разная
г. Ачинск	1526	106.8	14.3	Металлургия, цементная
г. Минусинск	996	70.8	14.1	Пищевая, машиностроение,
г. Енисейск	244	17.8	13.7	Пищевая, лесная, геологоразведка
Манский район	209	15.6	13.4	С/х, лесная, девелопмент
Туруханский район	209	15.7	13.3	ЭЭ, ТЭК (нефтедобыча на Ванкоре)
Мотыгинский район	179	13.6	13.2	Горнодобывающая
Большеулуйский район	88	7.4	11.9	Нефтепереработка, с/х
г. Назарово	576	49.7	11.6	Угольная, ЭЭ
г. Норильск	2108	182.5	11.6	Металлургия
г. Сосновоборск	473	41.0	11.5	ЗАТО
г. Канск	1007	88.9	11.3	Лесная, ж/д, ОПК
Саянский район	118	10.6	11.1	С/х
Богучанский район	502	45.3	11.1	Лесная, алюминиевая
Балахтинский район	201	18.4	10.9	Лесная
г. Шарыпово	485	46.0	10.5	ЭЭ, Березовская ГРЭС
Бирлюсский район	99	9.4	10.5	Лесная, с/х, добывающая
Ирбейский район	160	15.3	10.5	Лесная, угольная с/х
Енисейский район	234	22.6	10.4	Лесная, геологоразведка, АПК
Партизанский район	93	9.2	10.1	С/х
Дзержинский район	131	13.0	10.1	Лесная, с/х
г. Зеленогорск	609	61.6	9.9	Ядерно-промышленный цикл
Ачинский район	145	14.9	9.7	Транспорт
Шушенский район	302	31.9	9.5	АПК
Уярский район	190	20.7	9.2	АПК, транспорт, строительство
Идринский район	97	10.9	8.9	АПК, лесная
г. Бородино	142	16.0	8.9	Угольная
Тасеевский район	100	11.3	8.8	Лесная, с/х, угольная
Новоселовский район	110	12.7	8.7	С/х, лесная
Тюхтетский район	68	7.9	8.6	С/х, лесная
Абанский район	164	19.7	8.3	С/х, лесная, угольная
Краснотуранский район	116	14.0	8.3	С/х
Северо-Енисейский район	89	10.8	8.2	Золотодобыча, лесная
г. Боготол	158	19.6	8.1	Ж/д
Шарыповский район	111	14.1	7.9	ЭЭ, угольная, АПК
Большемуртинский район	139	18.0	7.7	Лесная, с/х, горнодобывающая
Каратузский район	111	14.7	7.6	С/х
Рыбинский район	229	30.5	7.5	Угольная, с/х
Иланский район	176	23.5	7.5	Строительство, лесная, ж/д
Курагинский район	333	44.6	7.5	Металлургия, АПК
Ермаковский район	141	19.2	7.3	С/х, лесная
Минусинский район	176	25.7	6.8	С/х
Сухобузимский район	135	19.9	6.8	АПК
Канский район	166	24.9	6.7	АПК, угледобыча, лесная
Боготольский район	58	9.5	6.1	Транспорт
Нижнеингашский район	172	29.0	5.9	Транспорт, колония
Ужурский район	181	31.1	5.8	С/х, пищевая, ж/д
Козульский район	85	16.0	5.3	Ж/д, лесная
Солнечный	53	10.0	5.3	В/ч
Назаровский район	81	21.6	3.8	С/х, угледобыча, ЭЭ

более выражена для городов-миллионеров и больших городов, но существенно слабее проявляется у городов с численностью населения менее 250 тыс. чел.

Расчет теоретического распределения и его сопоставления с фактическими значениями позволил провести перекрестную типологию городов по нескольким основаниям, выделив межрегиональные столицы, приморские города вне зависимости от их статуса, “рядовые” центры субъектов федерации и столицы регионов Европейского севера, а также города в составе агломераций с повышенным разнообразием мест приложения труда. В состав центров с пониженным разнообразием мест приложения труда входят моногорода, что особенно характерно для угольных, металлургических и “химических”, центров субъектов федерации из-за совмещения ими функций крупных промышленных узлов (например, Липецк) и малых столиц республик, хотя в них разнообразие мест приложения труда существенно превышает теоретические значения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья написана при поддержке гранта РНФ № 22-27-00425 “Центр–периферийность в российском индустриальном пространстве”.

FUNDING

The article was written with the support of the RSF grant no. 22-27-00425 “Center–periphery in the Russian industrial space.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабурин В.Л., Гладкевич Г.И., Даньшин А.И., Савоскул М.С., Сафронов С.Г. Изменение функции места и территориальные конфликты (на примере Боровского района Калужской области) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 6. С. 72–82.
- Бабурин В.Л., Рыбкин А.В. Оценка потенциала агломерационных процессов в территориальных социально-экономических системах (на примере Иркутской городской агломерации) // Региональные исследования. 2019. № 4. С. 4–19.
- Лобанов М.М. Формирование комплексов и кластеров в промышленности в условиях рыночных отношений // Журн. Новой экономической ассоциации. 2011. Т. 10. С. 178–182.
- Маршалл А. Принципы политической экономии. М.: Прогресс, 1983. Т. 1. 408 с.
- Растворцева С.Н. Управление развитием процессов концентрации экономической активности в регионе: подходы новой экономической географии. М.: Экон-информ, 2017. 131 с.
- Audretsch D.B., Feldman M.P. R&D spillovers and the geography of innovation and production // American Econ. Rev. 1996. Vol. 86. № 3. P. 630–640.
- Beaudry C., Schiffauerova A. Who's right, Marshall or Jacobs? The localization versus urbanization debate // Res. Policy. 2009. Vol. 38. № 2. P. 318–337.
- Glaeser E.L., Kallal H.D., Scheinkmann J.A., Shleifer A. Growth in Cities // J. of Political Econ. 1992. Vol. 100. № 6. P. 1126–1152.
- Jacobs J. The Economy of Cities. NY: Random House, 1969. P. 268.
- Okubo T. et al. Productivity distribution, firm heterogeneity, and agglomeration: evidence from firm-level data // RJETI I. Iscussiot 1 Paper. 2010. № 1001. 33 p.
- Rosenthal S.S., Strange W.C. Geography, industrial organization, and agglomeration // Rev. of Econ. and Statistics. 2003. Vol. 8. № 2. P. 377–393.

The Evolution of Cities and Their Functional Diversity

V. L. Baburin*

Faculty of Geography, Moscow State University, Moscow, Russia

*e-mail: vbaburin@yandex.ru

The article deals with the problems of the relationship between the agglomeration effects of localization and urbanization. As an indicator of these processes, the relationship between the population of cities and the number of enterprises and organizations in them is used. It is assumed that the number of enterprises indirectly reflects the diversity of places of employment, although not weighted by industry structure. As a result of the study, a statistically significant relationship between these two indicators was established both for the subjects of the federation and for cities with a population of more than 100 thousand people. The main focus is on the study and explanation of deviations from the general pattern of the rank of the city/the number of enterprises in it. On this basis, the typology of cities is carried out on several grounds: administrative status, economic and geographical location, the presence of large city-forming enterprises. According to the results of the study, specific parametric characteristics were identified that allow us to distinguish single-industry cities. Using the example of the key, the study was continued for settlements with less population, as a result, it was found that for them, geographical location and specialization are more important than population.

Keywords: effects of urbanization and localization, population density, diversity of places of employment, single-industry, status, economic and geographical location

REFERENCES

- Baburin V.L., Gladkevich G.I., Danshin A.I., Savoskul M.S., Safronov S.G. Changing the function of a place and territorial conflicts (the case of Borovsky district of Kaluga oblast). *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2018, no. 6, pp. 72–82. (In Russ.).
- Baburin V.L., Rybkin A.V. Assessment of the potential of agglomeration processes in territorial socioeconomic systems (the case of the Irkutsk urban agglomeration). *Reg. Issled.*, 2019, no. 4, pp. 4–19. (In Russ.).
- Baudry S., Schiffrava A. Who's right, Marshall or Jacobs? Debates on localization and urbanization. *Research Policy*, 2009, vol. 38, no. 2, pp. 318–337.
- Glaeser E.L., Kallal H.D., Sheinkman J.A., Shleifer A. Growth of cities. *JPE*, 1992, vol. 100, no. 6, pp. 1126–1152.
- Jacobs J. *The economy of cities*. New York: Random House, 1969. 268 p.
- Lobanov M.M. Formation of complexes and clusters in industry in the conditions of market relations. *J. New Economic Association*, 2011, vol. 10, pp. 178–182. (In Russ.).
- Marshall A. *Printsipy politicheskoi ekonomii* [Principles of Political Economy]. Vol. 1. Moscow: Progress, 1983. 408 p.
- Odrech D.B., Feldman M.P. Side effects of R & D and the geography of innovation and production. *AER*, 1996, vol. 86, no. 3, pp. 630–640.
- Okubo T. et al. Productivity distribution, firm heterogeneity, and agglomeration: Firm-level data. *RJETI I discussion Paper*, 2010, no. 1001, 33 p.
- Rosenthal S.S., Strange U.S. Geography, Industrial Organization and Agglomeration. *Rev. of Econ. and Statistics*, 2003, vol. 8, no. 2, pp. 377–393.
- Rastvortseva S.N. *Upravlenie razvitiem protsessov kontsentratsii ekonomicheskoi aktivnosti v regione: podkhody novoi ekonomicheskoi geografii* [Management of the Development of Processes of Concentration of Economic Activity in the Region: Approaches of the New Economic Geography]. Moscow: Ekon-inform, 2017. 131 p.

УДК 911.3

ГОРОДСКИЕ АГЛОМЕРАЦИИ КАЗАХСТАНА: ТЕНДЕНЦИИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

© 2023 г. А. Г. Махрова^а, *, С. Г. Сафронов^а, **, А. Ж. Абилов^б, ***

^аМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

^бКазахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

*e-mail: almah@mail.ru

**e-mail: saffff@mail.ru

***e-mail: aabilov1@mail.ru

Поступила в редакцию 11.06.2022 г.

После доработки 11.08.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

Статья посвящена современному этапу развития агломераций Казахстана, стимулирование формирования которых стало одним из приоритетов государственной политики. Из-за отсутствия критериев границы потенциальных агломераций определены по полуторачасовым изохронам транспортной доступности вокруг городов людностью от 100 тыс. чел. Из этих городов на основе модифицированного коэффициента развитости, учитывающего кроме городских спутников также села людностью свыше 3 тыс. чел., было отобрано восемь центров. На основе ряда социально-экономических индикаторов был проанализирован уровень отрыва ядер агломераций от пригородов и регионов в целом. Пример Казахстана показал, что унаследованная структура экономики и невысокая комфортность среды городов-центров не способствуют развитию большинства агломераций. В течение постсоветского периода их доля в населении республики выросла с 43 до 52%, но административный вариант создания агломераций работает лишь там, где есть объективные предпосылки и эволюционный задел. Из агломераций, статус которых закреплён в правительственных документах в качестве точек роста, к развитым относится агломерация Алматы. Зона тяготения Шымкента включает в основном крупные села, некоторые из которых недавно стали городами. Столичная агломерация Астаны по уровню развитости заметно уступает даже соседней Карагандинской. Актобе способно привлечь жителей лишь северо-западных областей из-за низкой транспортной связности с остальной территорией страны. По показателям социально-экономического развития выделяются столичные агломерации, к которым по степени терциаризации экономики тяготеет третья по величине – Шымкентская. В остальных агломерациях сохраняется повышенная индустриальная занятость, а рост численности населения ввиду невысокой привлекательности происходит за счёт естественного прироста и внутриобластной миграции. Кроме Алматы, в окружении которой наблюдаются признаки субурбанизации, города-ядра растут быстрее зон влияния. Пригороды отличается недостаток мест приложения труда, слабость социальной инфраструктуры, более низкий уровень доходов населения. Такая ситуация, характерная для начальных стадий развития, сдерживает использование преимуществ агломераций.

Ключевые слова: городская агломерация, уровень развитости, население, экономика, социальная сфера, Республика Казахстан

DOI: 10.31857/S2587556623010119, EDN: LKERDP

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Казахстан – страна с разреженным расселением и относительно небольшой площадью хорошо освоенных ареалов, перспективных для создания комфортных условий проживания и привлекательных для бизнеса. В подобных территориях с динамичным развитием, повышенной плотностью населения и концентрацией постиндустриальных и инновационных отраслей экономики складываются условия для формирования городских агломераций (ГА).

С переходом к рынку и ростом пространственной неравномерности в социально-экономическом развитии именно крупнейшие города усиленно притягивали мигрантов из сельской местности, поселков городского типа, малых и средних городов, что привело не только к росту численности населения, но и ускорению формирования агломераций, превратив их в главные центры роста в стране. В свою очередь эти процессы вызвали повышенный интерес к ГА со стороны властей.

Стимулирование роста и формирование ГА для использования преимуществ, связанных с агломерационными эффектами, с 2000-х годов стало одним из приоритетных направлений государственной политики: городские агломерации представлялись как ключевая форма территориальной организации. Статус агломераций и их деление на два уровня по степени значимости был закреплен в целом ряде правительственных документов¹. При этом в их числе не оказалось одной из наиболее развитых городских систем расселения Казахстана — Карагандинской, но в то же время в число центров 2-го уровня попала агломерация Актау.

Главная задача, которую пока видят и формулируют власти страны — создание эффективной системы управления ГА²: ее основным инструментом выступают крупные госпроекты “якорных” компаний и организаций, отвечающих за ведущие направления экономической деятельности конкретных агломераций. Конъюнктура цен на углеводородное сырье позволила Казахстану в 2000-х годах сформулировать достаточно амбициозные цели по развитию этих городских систем расселения в надежде подтянуться по уровню их развития к более развитым государствам. Однако при отсутствии официально закрепленных критериев делимитации агломераций открытым остается вопрос, сколько агломераций сформировалось (формируется) на территории республики. При этом от аналитиков в лучшем случае ждут подтверждения правильности уже принятых решений и выделенных границ агломераций³.

В результате сосуществуют две реальности и два понятия ГА: академическое — как целостно функционирующей и развивающейся по определенной логике системы расселения, выделяемой на основе определенных критериев; и как элемента системы управления, границы которого определяются постановлениями органов власти. На практике все чаще приходится иметь дело со вторым вариантом, нормативными, или административными, агломерациями, которые лишь фор-

мально связаны с исходным научным понятием. При этом внедряется мысль, что развитием агломераций можно довольно эффективно управлять, невзирая на отсутствие или наличие объективных факторов их развития. В большинстве официальных документов достигнутый уровень и перспективы развития ГА оцениваются на основе данных лишь для их центра, а ситуация в других элементах системы, прежде всего в пригородных зонах, остается за скобками. В этой связи цель настоящей работы состоит в попытке анализа динамики ГА Казахстана в постсоветский период по степени развитости на основе апробированных в отечественной практике коэффициентов и по уровню различий социально-экономической ситуации в центральных городах и в агломерации в целом. Это позволяет увидеть контрасты в уровне развития главных элементов агломерации, показывая потенциал укрепления или ослабления интеграционных связей внутри этих городских систем.

ИЗУЧЕННОСТЬ ВОПРОСА

Как уже отмечалось, в настоящее время городские агломерации наиболее часто исследуются в двух направлениях: как категория научного анализа самоорганизующихся систем расселения или как операционный элемент системы управления. Причем второй подход не обязательно предполагает наличие объективно существующей агломерации, скорее — это определенное видение перспектив развития территории в зоне влияния ведущих городских центров, осознание необходимости координации управленческих решений применительно к конкретному ареалу системы расселения.

Несмотря на то, что агломерации в Казахстане уже объявлены в качестве одного из приоритетов государственной политики, изучены они довольно слабо. Большая часть исследователей и аналитических центров ограничивается анализом процессов расселения и урбанизации, делая акцент на росте дифференциации в сети городского расселения, динамике уровня урбанизированности, концентрации населения в городах-миллионниках⁴ (Жумасултанов, Ибраев, 2000; Искалиев, 2016; Nyussupova, Sarsenova, 2012; OECD ..., 2017). При этом проблематика формирования и развития агломераций рассматривается только косвен-

¹ “Основные положения Генеральной схемы организации территории Республики Казахстан” (2013); “Об утверждении Программы развития регионов до 2020 года” (2014); “Прогнозная схема территориально-пространственного развития страны до 2030 года” (2019); “Стратегический план развития Республики Казахстан до 2025 года” (2018); “Национальный план развития Казахстана до 2025 года” (2021).

² Атоянц-Ларина В. Дораста до агломерации // Эксперт-Казахстан. 8 июля 2015. <http://expertonline.kz/a13764> (дата обращения 23.04.2022).

³ В законе РК “О развитии агломераций”, принятом 1 января 2023 г., критерии отнесения населенных пунктов к агломерации сформулированы, как это и свойственно документам такого рода, в общем виде, акцентируя внимание на наличии повседневных трудовых, производственных, социально-культурных и иных связей с центром агломерации, а также на тенденциях к территориальному слиянию с центром агломерации (статья 4).

⁴ Айтказина З.Н. Формирование систем городского расселения в Казахстане // Демоскоп Weekly. № 245-246. 1–21 мая 2006. <http://www.demoscope.ru/weekly/2006/0245/anal-it04.php>; Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. <https://stat.gov.kz/>; Насыров Ш.М., Нусупова Г.Н., Мылкайдаров А.Т., Сарсенова И.Б., Чжан Бинь. Пространственная организация территории Казахстана в ракурсе геополитики в меняющемся мире. Информационно-аналитический центр Сауран. <http://cc-sauran.kz/rubriki/safety/367-prostranstvennaya-organizaciya-territorii-kazakhstan-a-v-rakurse-geopolitiki-v-menyayuschemsya-mire.html>

но, как один из аспектов более широкой тематики, и ограничивается в большинстве случаев динамикой их людности (Афонцев, Зубаревич, 2012; Искалиев, 2016).

В качестве самостоятельного предмета исследования городские агломерации Казахстана анализируются лишь в небольшом числе работ. Главный фокус также сделан на людности ГА, хотя рассматриваются и вопросы делимитации, динамика уровня развитости и возможные сценарии будущего агломерационных процессов в республике (Кириллов, Махрова, 2011; Махрова, Сафронов, 2021). При этом вопросы социально-экономического развития рассматриваются лишь на примере отдельных агломераций (Абилов и др., 2017; Акимжанов, Сафронов, 2014). В некоторых работах проведено сравнение только городов-ядер двух столичных агломераций — Алматы и Астаны — с другими столицами стран постсоветского пространства по ряду социально-экономических индикаторов, включая население, миграцию, структуру экономики (ВРП, промышленность, инвестиции, жилье), различия в потреблении и доходах (Голубчиков, Бадина, 2016; Нефедова и др., 2016; Zubarevich, 2018).

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки процессов реального агломерирования в экономике и социальной сфере исследователи обычно стремятся выявить наличие так называемых эффектов урбанизации (Джекобс-эффекты) и эффектов локализации (MAR-эффекты) (Маршалл, 1983; Jacobs, 1969), для оценки которых нужны данные на уровне субъектов экономической деятельности. В условиях отсутствия сведений по отдельным предприятиям в данном исследовании использована официальная статистика, в том числе в разрезе муниципальных образований, информационно-статистической системы ТАЛДАУ⁵.

На ее основе отобрано ограниченное число индикаторов, характеризующих основные стороны социально-экономического развития агломераций, включая демографию, миграцию, экономику (промышленное производство, торговля, строительство жилья), рынок труда и занятость. Затем был проведен сравнительный анализ состояния агломераций, их ядер и пригородных зон по отношению к среднеобластным и среднереспубликанским значениям (эти данные легче и четче интерпретируются). Временной горизонт исследования охватил постсоветский период с акцентом на последние два десятилетия. При этом для нивелирования шокового влияния COVID-19 на экономику и модели поведения населения в качестве последней точки отсчета была использована информация по состоянию на 2019 г.

Для выделения границ ГА при отсутствии данных о трудовой маятниковой миграции использовался метод изохрон транспортной доступности, который широко применялся в советской, а теперь и современной российской практике геоурбанистики и градостроительства (Антонов, Махрова, 2019; Лаппо, 1978; Полян, 2014). Полуторачасовые изохроны доступности на автомобильном транспорте были построены вокруг всех городов людностью свыше 100 тыс. чел., которые рассматривались в качестве потенциальных ядер ГА.

Для выделенных 19 крупногородских кустов расселения был рассчитан модифицированный коэффициент развитости (K_p), который кроме городских поселений-спутников учитывал крупные села с численностью населения свыше 3 тыс. чел.⁶, чтобы избежать занижения показателя из-за резкого сокращения количества поселков городского типа (почти 40% с 1989 по 2019 г.). Большинство таких сел представляют собой типичные селитебные спутники, когда значительная часть их населения работает в городе-центре⁷.

$$K_p = P (Mm + Nn),$$

где P — людность ГА (млн чел.), M — число городов, N — число поселков городского типа и сел людностью свыше 3 тыс. чел. в составе ГА, m и n — их доли в суммарной численности населения агломерации.

Для ГА Казахстана, формировавшихся за исключением Алматы в относительно мало комфортных для проживания условиях, развитость носит во многом унаследованный характер, связанный с промышленным строительством или ресурсным освоением территории, поэтому в постсоветский период во многих агломерациях она росла медленно или даже снижалась (табл. 1).

Верификация выделенных образований показала, что лишь восемь агломераций с коэффициентом развитости свыше 1 могут считаться сформированными⁸. В их число вошли три центра первого уровня — Алматы, Астана и Шымкент, старейшая агломерация Казахстана — Карагандинская, агломерация второго уровня Актобинская, а

⁶ Принятый в Казахстане критерий людности поселков городского типа составляет 3 тыс. чел.

⁷ Наиболее плотная сеть крупных сел, костяк которой сформировался еще в советский период, располагается вокруг Алматы и Шымкента (соответственно 84 и 76). В составе других ГА такие поселения немногочисленны. Вокруг столицы число этих сел невелико, однако среди них выделяются быстро растущие Косшы, Коянды, Талапке, население которых превышает несколько десятков тысяч человек, а жители ориентированы на маятниковые миграции в Астану (Абилов и др., 2017).

⁸ Вслед за (Полян, 1988) выделяются следующие классы развитости агломераций: наиболее развитые (K_p — свыше 50), сильно развитые (от 10 до 50), развитые (от 5 до 10), слабо развитые (от 2.5 до 5), наименее развитые (менее 2.5).

⁵ <https://taldau.stat.gov.kz/ru>

Таблица 1. Динамика численности населения городских агломераций Казахстана, 1989–2019 гг.*

Агломерация	Численность населения, тыс. чел.		Изменение населения, 2019 к 1989, %	Доля ядра в населении агломерации, %		Коэффициент развитости	
	1989 г.	2019 г.		1989 г.	2019 г.	1989 г.	2019 г.
Алматинская	1769.2	3059.6	172.9	64.0	60.6	7.05	11.38
Шымкентская	1199.3	1985.6	165.6	32.8	50.8	3.8	31.34
Астанинская	448	1238.0	276.3	63.1	87.1	0.83	2.46
Карагандинская	1239.9	940.4	75.8	49.5	52.9	6.6	4.82
Актюбинская	494.7	704.5	142.4	58.4	69.3	1.03	2.88
Костанайская	722.7	618.5	85.6	31.1	39.3	2.03	2.12
Усть-Каменогорская	727.3	612.1	84.2	44.7	56.2	3.18	3.20
Кокшетауская	592.3	420.5	71.0	23.4	37.9	1.58	1.33

* Агломерации приведены в порядке убывания их населения в 2019 г.

Примечание: данные за 1989 и 2019 гг. даны в современных административных границах.

Составлено по данным Бюро национальной статистики РК и расчетам авторов.

также образования вокруг Усть-Каменогорска, Костаная и Кокшетау. Остальные 11 урбанизированных территорий могут рассматриваться только как потенциальные агломерации: большая часть их центров представлена городами людностью менее 250 тыс. чел., а социально-экономического потенциала в условиях разреженной сети расселения и больших расстояний между городами не хватает для формирования пригородной зоны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Численность населения и демографические факторы ее динамики

По состоянию на 2019 г. суммарная людность выделенных восьми агломераций составляет почти 9.6 млн чел., или 52% всего населения республики. В течение последних 30 лет их демографический потенциал увеличился на треть, а доля в населении страны — на 8.6%. При этом динамика показателей была разной в разные периоды и у разных агломераций (см. табл. 1).

В настоящее время, как и в конце советского периода, людность трех агломераций — Алматы, Шымкента и Караганды — превышает 1 млн чел., а две первые из них, несмотря на разный генезис, относятся к развитым. В случае Алматы агломерация формировалась (по терминологии Г.М. Лаппо) “от города” (1978), когда в течение большей части советского периода бывшая столица постепенно обростала пригородами. Таким же эволюционным путем складывалась во второй половине XX в. и Карагандинская агломерация, но ее формирование шло “от района” на базе каменноугольного бассейна, когда город постепенно выделился из шахтных поселков, образовавших

его пригородную зону. В течение постсоветского периода в результате кризиса ведущих отраслей специализации и массового оттока населения по “национальным квартирам” в 1990-е годы, несмотря на положительную динамику в 2000-е годы, агломерация Караганды потеряла более 300 тыс., в том числе город — почти 180 тыс. чел., пропустив вперед стремительно растущую Астану.

Близкая динамика развития была характерна и для других агломераций с промышленной специализацией (Костанайской, Усть-Каменогорской, Кокшетауской). Отличия состояли лишь в том, что их центры, но не сами агломерации, после спада смогли превысить численность своего населения конца советского периода, причем Кокшетау сделал это уже в 2000-е годы. Безусловно, свою роль сыграла миграционная политика, направленная на подпитку северных территорий за счет кандасов (этнических казахов-репатриантов). Особой была траектория развития Актюбинской агломерации, которая стала одним из ведущих нефтяных центров на западе республики. В течение постсоветского периода ее людность увеличилась более чем на 200 тыс. чел., а центр вплотную подошел к рубежу в 500 тыс. чел. (рост почти на 70%).

Близкие темпы роста были характерны и для Алматы (64%), что позволило ему вырасти до города с почти двухмиллионным населением. Еще более динамично развивалась сама агломерация, людность которой превысила 3 млн чел. Несмотря на потерю столичного статуса, в течение постсоветского периода Алматы превратился в современный постиндустриальный центр, который окружают мощные ленты пригородов с почти непрерывной застройкой.

Таблица 2. Компоненты динамики численности населения ГА Казахстана, 1991–2019 гг.

Агломерация	Среднегодовой коэффициент естественного прироста, ‰			Среднегодовой коэффициент нетто-миграции, ‰		
	1991–1999	1999–2009	2009–2019	1991–1999	1999–2009	2009–2019
Актобинская	...	7.9	16.3	...	0.8	1.1
Алматинская	3.7	8.9	14.4	–1.3	9.7	11.1
Карагандинская	1.0	–1.1	5.4	–13.4	–1.4	–2.0
Костанайская	1.7	–1.2	3.1	–12.5	–3.5	0.3
Кошетауская	...	4.6	8.0	...	–6.7	–11.7
Астанинская	3.0	13.6	20.6	11.3	32.1	27.9
Усть-Каменогорская	–3.4	–4.4	1.4	–5.8	–3.0	–0.4
Шымкентская	17.6	18.6	22.9	–10.0	2.3	–0.7

Примечание. ... – нет данных.

Источник. Информационно-статистическая система ТАЛДАУ.

Еще более динамичным было развитие Шымкента и его окружения. Город вырос в 2.5 раза, превысив отметку в 1 млн чел., а агломерация приблизилась к 2 млн чел., обосновавшись на втором месте. При этом сам Шымкент, который сильно расширил свою территорию, включив в свои границы многочисленные сельские поселения, пока напоминает, скорее, разросшийся город восточного типа с обширными пригородами и преимущественно торговыми и другими функциями по обслуживанию окрестного населения.

Безусловным лидером по темпам роста населения стала столичная агломерация (2.8 раза), что было обусловлено развитием ее ядра в качестве новой столицы страны (3.8 раза). Благоприятная конъюнктура цен на углеводородное и минеральное сырье в период 2000-х позволила Казахстану создать новую столицу. Астана, исторически возникшая в зоне разреженного расселения на границе рискованного земледельческого освоения степной и сухостепной зон, в основном поглощает все вокруг себя; времени и ресурсов для формирования полноценной пригородной зоны пока не хватает (Абилов и др., 2017).

В динамике людности выделенных агломераций после завершения периода стрессовых миграций 1990-х годов ведущая роль перешла к естественному движению (табл. 2). В последнее десятилетие естественный прирост почти везде, кроме Кокшетауской ГА, перекрывает отрицательную нетто-миграцию или усиливает положительную. Наиболее высокие темпы характерны для Шымкентской агломерации, расположенной в зоне с незавершенным демографическим переходом, и столицы с ее окружением, выросшей благодаря интенсивному миграционному притоку, который обуславливает и повышенный уровень естественного воспроизводства. Заметно сократила свое отставание от лидеров Актобинская

агломерация, в которой за постсоветский период выросла доля титульного этноса. Минимальные темпы естественного прироста характерны для образований в северной и восточной частях республики с более старой возрастной структурой жителей и пока еще повышенной долей русскоязычного населения.

Ведущая роль миграции в динамике населения, несмотря на некоторое снижение в последнее десятилетие, сохранялась в Астанинской ГА, а также в агломерации бывшей столицы, расположенной в более комфортной для жизни природной зоне. Небольшой миграционный прирост в Актобинской ГА в основном обеспечивался за счет внутриобластных миграций (рис. 1а). Центры еще трех ГА были миграционно привлекательны, хотя агломерации в целом имели отток (Шымкентская, Костанайская, Усть-Каменогорская). Для Караганды и Кокшетау, расположенных на двух флангах быстро растущей столичной агломерации, в последние годы характерен устойчивый миграционный отток населения.

Для большинства ГА внутрирегиональная миграция служит ключевым ресурсом роста или поддержания численности жителей. Масштабы миграционной подпитки зависят как от социально-экономического градиента – разницы в доходах и условиях жизни в пределах и за границами ядер агломераций, так и от демографического потенциала окружающих территорий. Демографическое давление максимально в южных густо населенных областях.

Различия в демографическом потенциале окружения ярко видны при сравнении двух столичных агломераций, в которых хотя основная доля миграционного прироста приходится на межрегиональные потоки, их вес сильно различается. Для Алматинской ГА одноименная область давала в 2015–2019 гг. почти половину миграци-

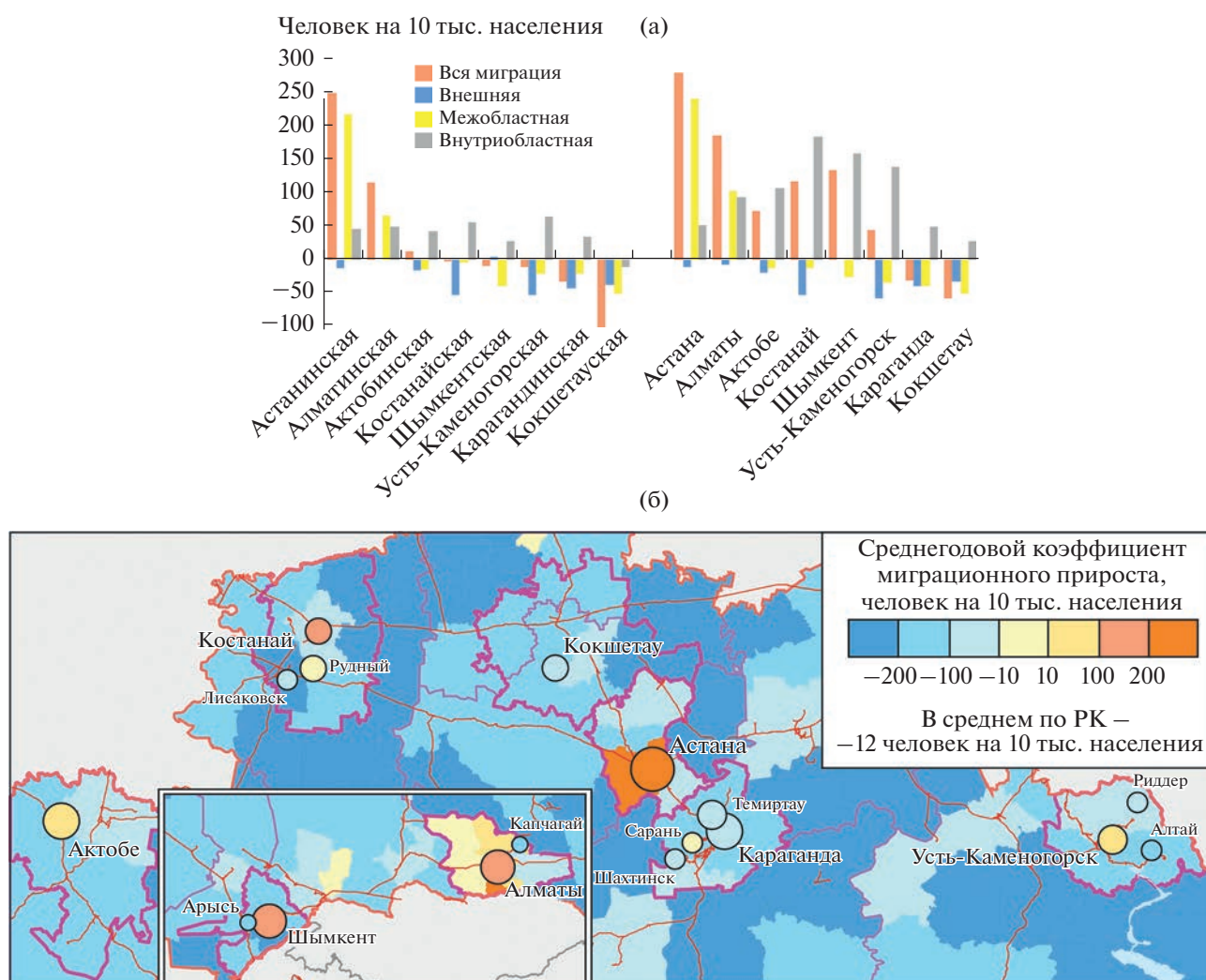


Рис. 1. Среднегодовой коэффициент нетто-миграции в ГА Казахстана и их центральных городах в 2015–2019 гг., чел. на 10 тыс. населения: (а) по видам миграции, (б) всего.

Примечание. В расчетах Шымкент рассматривался в составе Туркестанской (Южно-Казахстанской) области.

онного прироста, а Акмолинская область обеспечивала не более 20% в Астанинской агломерации.

Сальдо международной миграции почти у всех ГА отрицательное из-за остаточной эмиграции русскоязычного населения в Россию, поэтому наибольший удельный отток характерен для агломераций Северного и Восточного Казахстана. Лишь расположенный вблизи государственной границы Шымкент традиционно притягивает жителей соседнего Узбекистана.

Географически миграционно привлекательны отдельные части лишь двух столичных агломераций (рис. 1б). Не считая самой Астаны, максимальный миграционный прирост отмечался в пригородном Целиноградском районе Акмолинской области, выделяющемся и объемами жилищного строительства. Активно растет и зона,

примыкающая к Алматы, которая за последние десять лет несколько раз расширяла свои границы за счет соседних муниципальных образований.

В большинстве остальных агломераций для мигрантов более привлекательными остаются центральные города, комфортность проживания в которых в последние годы заметно выросла. Отрицательное сальдо имеют лишь испытывающие сильное давление и конкуренцию за людей со стороны новой столицы Караганда и Кокшетау. Из городов-спутников численность населения удается сохранять моногородам с экспортоориентированными производствами (Рудный) или логистически удобно расположенным по отношению к областному центру (Абай, Сарань).

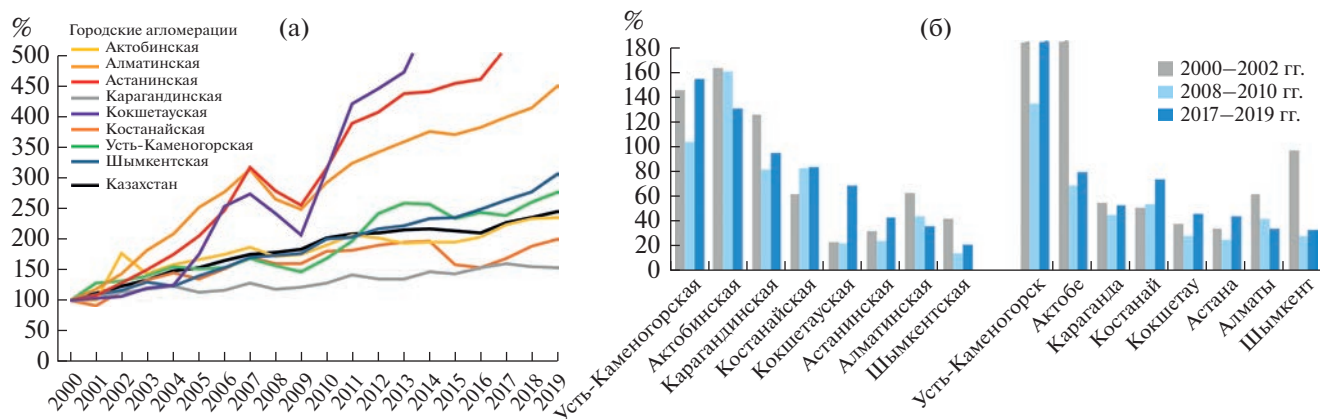


Рис. 2. Динамика промышленного производства в 2000–2019 гг.: (а) индекс физического объема производства в ГА, % к 2000 г.; (б) среднегодовой душевой объем промышленного производства в ГА и их центральных городах к средней по РК (РК = 100%).

Структура экономики

Наиболее интенсивная трансформация экономики Казахстана проходила в 1990-х годах из-за распада советской плановой системы и хозяйственных связей, охватывавших всю страну. В настоящее время территориальная структура и динамика **промышленного производства** довольно точно характеризуют ситуацию в большинстве ГА, в первую очередь тех, у которых вторичный сектор составляет основу специализации. Наиболее “индустриальные” агломерации, имеющие в составе старые центры горнодобывающей и металлургической промышленности (Карагандинская, Костанайская, Актобинская), показывали в 2000-е годы скромные темпы роста, не превышавшие среднереспубликанские (рис. 2а). Сбыт продукции их основных градообразующих предприятий, заметно пострадавших от разных волн экономического кризиса, сильно зависит от мировой конъюнктуры.

На вялую динамику промышленного производства Карагандинской ГА дополнительное негативное влияние оказали как состояние Карагандинского металлургического комбината (АО “АрселорМиттал Темиртау”), так и ограниченность мощностей местной уголедобычи при ее высокой себестоимости. Более динамично развивалась Усть-Каменогорская ГА, к 2019 г. вышедшая в лидеры по душевому объему промышленной продукции, градообразующие предприятия которой провели частичную модернизацию (рис. 2б).

Основная причина быстрого роста производства в Кокшетауской ГА — поэтапный выход на проектную мощность расположенного в 30 км от Кокшетау АО “Алтынтау”, который разрабатывает Васильковское золоторудное месторождение. При этом наиболее высокие реальные темпы роста в 2000-е годы были характерны для имеющей

низкую исходную базу Астанинской и наиболее развитой Алматинской ГА. Компенсационному подъему промышленного производства столичных агломераций, быстрее оправившихся от последствий первой волны кризиса 2009–2010 гг., способствовал рост численности населения и объемов жилищного строительства, обеспечивших собственный спрос на продукцию местных предприятий пищевой и строительной индустрии. С заметным отставанием вслед за столицами следует агломерация третьего города-миллионника Шымкента.

Несмотря на внешнюю схожесть ситуации, перед столичными агломерациями стоят несколько разные задачи. Если быстро терциаризирующейся Алматинской ГА важно сохранить наиболее ценную часть научно-технического потенциала республики и квалифицированных кадров, то в Астане предпринимается попытка провести реновацию старых промышленных площадок, разместив там экологически чистые сборочные машиностроительные производства. Шымкентская ГА, сбросившая в 1990-е годы ряд вредных и громоздких производств, наращивает выпуск продукции пищевой, легкой и промышленности строительных материалов.

Территориальная структура размещения промышленного производства может оказывать противоречивое влияние на социально-экономическую ситуацию в агломерации. Наличие монопрофильных промышленных городов-спутников, которые есть в большинстве ГА Казахстана, несет угрозу обострения проблем безработицы в случае кризиса или оптимизации структуры занятых на градообразующем предприятии. При этом, хотя по отдельным социально-экономическим показателям такие поселения могут выделяться в лучшую сторону, создать там полноценную городскую среду и удержать население удастся редко. Кон-

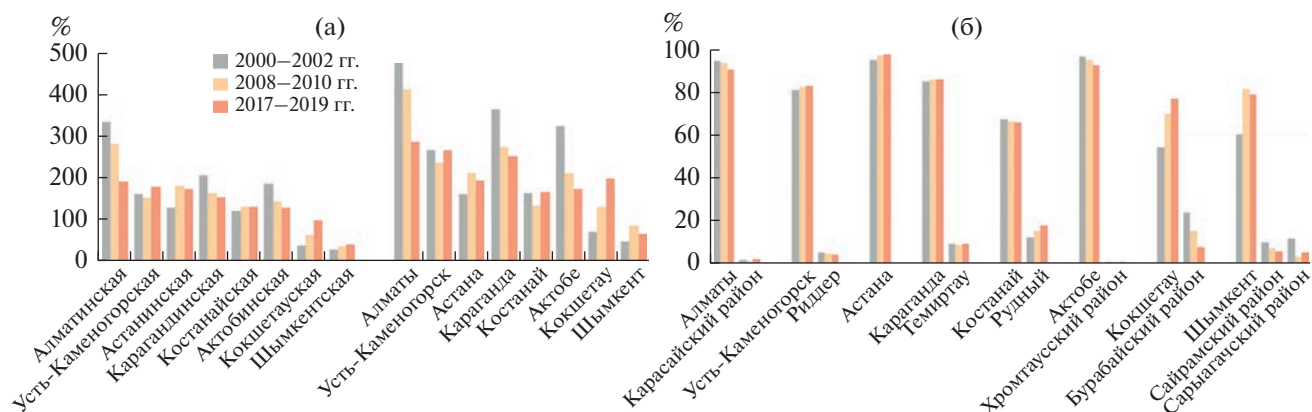


Рис. 3. Розничный товарооборот в 2000–2019 гг.: (а) среднегодовой душевой розничный товарооборот в ГА и их центральных городах (РК = 100%), %; (б) доля отдельных городов и муниципальных образований в розничном товарообороте соответствующих ГА, %.

центрация же всего промышленного производства в одном, как правило, главном городе, обеспечивая большую гибкость рынку труда, не способствует развитию самой агломерации и формированию качественной городской среды в ее центре. Следует отметить, что резкое изменение доли Актюбинской ГА связано с особенностями привязки данных по нефтедобывающим предприятиям.

За 2010-е годы с несколькими волнами экономического кризиса дифференциация ГА Казахстана по душевому обороту *розничной торговли* заметно сократилась. Отрыв лидера — Алматы — от остальных центров сократился до минимума. Положительная, хотя и неустойчивая, динамика характерна для столичной агломерации с более высокими доходами населения и быстро растущим потребительским рынком, и Кокчетавской. Медленный рост Шымкентской агломерации, по-видимому, связан с невысокими душевыми доходами населения и недоучетом объемов торговли в неформальном секторе (рис. 3а).

Территориальная структура розничной торговли, как и других услуг, ориентированных на конечного потребителя, меняется медленно. В большинстве ГА основная часть ее объемов сконцентрирована в центральном городе, а на города-спутники приходится непропорционально малая доля по отношению к их численности населения. При этом она почти нигде не растет, что позволяет говорить об отсутствии положительной динамики в развитии сектора потребительских услуг за пределами центров ГА. В составе Кокшетауской ГА незначительно выделяется лишь район курортного поселка Бурабай, а в Шымкентской — пригородный Сайрамский район с высоким уровнем развития малого предпринимательства и приграничный Сарыагачский район, где сосредоточена часть приграничной торговли с Узбекистаном (рис. 3б).

В 2000-е годы *жилищное строительство* заметно активизировалось во всех ГА Казахстана, однако лишь в трех из них, двух столичных и Актюбинской, душевой ввод жилья был устойчиво выше среднереспубликанского уровня (рис. 4а). По этому показателю к центрам агломераций-лидеров в последние годы приблизился компактный с достаточно комфортной средой Кокшетау. В агломерациях юга Казахстана, прежде всего в Шымкентской, где традиционно значительная часть населения проживает в индивидуальных домах, объемы жилищного строительства могут быть несколько занижены, поскольку климатические условия позволяют длительное время не подключать готовое жилье к инженерным сетям и не ставить его на учет. Наиболее сложная ситуация складывается в Карагандинской ГА, где душевые объемы жилищного строительства составляют не более 2/3 от среднереспубликанского уровня и почти не растут.

Рост объемов строительства происходит в первую очередь в областных центрах, имеющих более качественную городскую среду и лучшую по сравнению с монопрофильными городами-спутниками экологическую ситуацию (рис. 4б). Пригородные районы слабо выделяются по показателям жилищного строительства за исключением двух столичных агломераций (рис. 4в). Вокруг Астаны в жилищное строительство постепенно вовлекаются территории Целиноградского района. В Алматинской ГА аналогичные, но более активные субурбанизационные процессы трудно улавливаются статистически, поскольку бывшая столица несколько раз расширяла свои границы за счет прилегающих районов.

Занятость и заработная плата

Несмотря на сильную трансформацию структуры экономики, *занятость* в промышленности

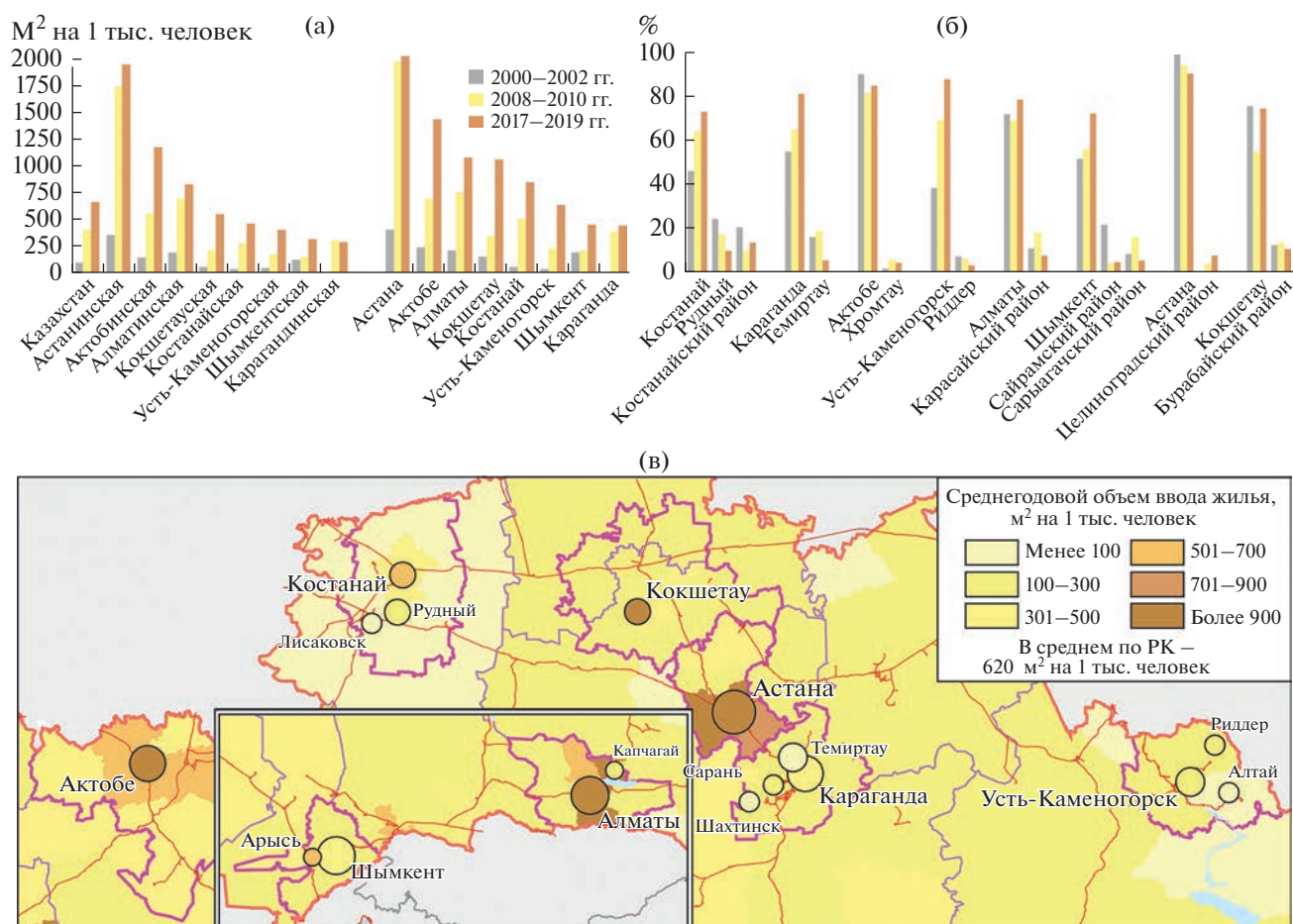


Рис. 4. Динамика жилищного строительства: (а), (в) среднегодовой ввод жилья в ГА и их центральных городах в 2000–2019 гг., m^2 на 1 тыс. жителей; (б) доля отдельных городов во вводе жилья по соответствующим ГА в 2000–2019 гг., %.

и строительстве в наиболее индустриальных агломерациях страны (Карагандинской, Актобинской и Усть-Каменогорской) остается весьма высокой, составляя в 2019 г. около 30% (рис. 5а). Оптимизация персонала на градообразующих предприятиях не привела к радикальному сокращению числа занятых во вторичном секторе, а в г. Актобе в 2014–2019 гг. она даже выросла на 11%. Рост числа занятых в промышленности на 19% произошел и в Астане, где в последние годы открыт ряд сборочных машиностроительных предприятий.

Наиболее интенсивно деиндустриализировалась Шымкентская агломерация, утратившая ряд отраслей специализации, в том числе цветную металлургию и часть химии органического синтеза. Новые же предприятия легкой промышленности — небольшие и не в состоянии заместить на рынке труда ликвидированные гиганты советской индустрии.

Наиболее аграрными остаются две слабо развитые агломерации целинной зоны — Костанайская и Кокшетауская (см. рис. 5а). В агломерациях южного Казахстана — Шымкентской и Алма-

тинской — доля занятых в сельском хозяйстве невелика (12.1 и 7.3% соответственно) и продолжает снижаться.

Говорить о реальном развитии сектора услуг можно применительно лишь к двум столичным агломерациям и г. Шымкенту, где рост относительной доли третичного сектора сопровождается заметным ростом числа занятых (рис. 5б). В остальных ГА его положительная динамика или незначительна, или, как в Караганде, вообще не фиксируется.

Различия в *заработной плате* достаточно точно характеризуют относительные преимущества, влияющие на притягательность ГА в целом и их центров. На протяжении 2000-х годов зарплаты лишь в двух столичных агломерациях были стабильно выше среднереспубликанского уровня (рис. 6а). Астана постоянно увеличивала отрыв от остальных центров, а относительные показатели занимающей второе место Алматинской ГА несколько ухудшились в середине 2010-х годов под влиянием экономического кризиса. В то же время отстающие агломерации, слабо развитая Кок-

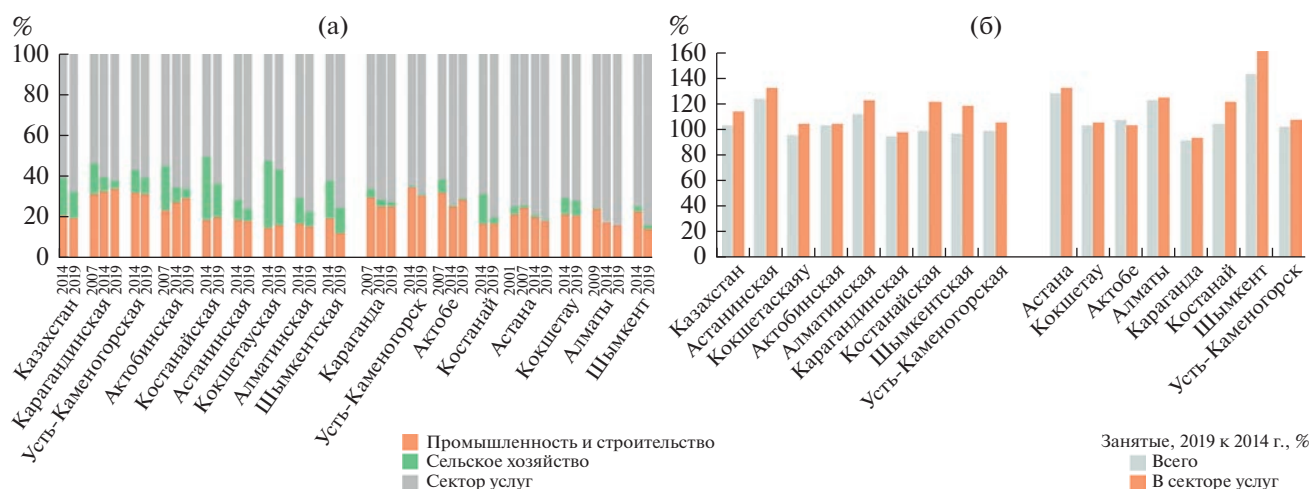


Рис. 5. Занятость в городских агломерациях: (а) структура занятых (включая самозанятых) по основным секторам экономики в 2014 и 2019 гг., %; (б) динамика занятости в экономике в целом и в секторе услуг в ГА и их центральных городах, 2014 к 2019 г., %.

шетауская и южная Шымкентская, в которой есть проблемы с недоучетом теневых доходов, едва дотягивают до 2/3 от республиканского уровня зарплаты (рис. 6б). Нестабильной была ситуация в ГА с крупными экспортоориентированными предприятиями металлургии, испытавших и периоды спада, и компенсационного подъема.

На фоне своих областей кроме обеих столиц заметно выделяется лишь Усть-Каменогорск. Для большинства остальных ГА градиент между их центрами и остальной частью региона слабый. При этом три агломерации — Шымкентская, Карагандинская и Кокшетауская — заметно не дотягивают по зарплатам до среднеобластного уровня. Некоторые из центров агломераций не имеют преимуществ или даже проигрывают своим промышленным городам-спутникам, хотя и отличаются большей стабильностью за счет диверсифицированности экономики.

ВЫВОДЫ

Административный путь создания агломераций может лишь ускорить эволюционный путь их развития. Противоречивость современного этапа развития ГА Казахстана уходит своими корнями в прошлое — гипертрофированно индустриальный профиль подавляющего большинства крупных городов, выросших в процессе создания резервных сырьевых и промышленных баз в глубине страны в советский период. Ведущим критерием оптимальности развития в ту эпоху была эффективная реализация крупных проектов, а не создание комфортных условий жизни для населения, что отложило отпечаток на экономическую специализацию и планировочную структуру будущих агломераций.

Из ГА, выделенных в качестве точек роста, лишь агломерация Алматы, постепенно сформировавшаяся вокруг бывшей столицы, может быть отнесена к развитым. Шымкент выглядит как разросшийся город с обширными сельскими пригородами. Столица в основном стягивает на себя свое окружение, а ее агломерация по уровню развитости заметно уступает соседней Карагандинской. В остальных ГА, включая Актобинскую, с ярко выраженными промышленными функциями, невысокий уровень комфортности среды и социально-экономическая ситуация пока не очень способствуют их привлекательности.

В постсоветский период ГА Казахстана были основными «бенефициарами» нарастания контрастов в развитии социально-экономического пространства, концентрируя финансовые ресурсы и население: с 1990 г. их доля в населении республики в целом выросла с 43 до 52%. Однако различия и среди агломераций весьма велики: миграционно привлекательными в масштабах всего Казахстана были две столичные ГА, в остальных рост численности жителей происходил за счет естественного прироста и внутрирегиональной миграции.

По динамике социально-экономического развития в последние десятилетия заметно выделяются обе столичные агломерации, что хорошо видно по повышенному уровню зарплат, который в большинстве остальных ГА не превосходит среднеобластные значения. Несмотря на трансформацию структуры экономики, наиболее терциаризированы пока только три крупнейшие агломерации, в остальных сохраняется довольно высокая занятость в промышленности. При этом наиболее индустриальным агломерациям с крупными пред-

тия регионов и городов России и стран Ближнего Запада”.

FUNDING

The section “The Results and Discussion” was prepared by A.G. Makhrova and S.G. Safronov under the state budget topic of research work by the Faculty of Geography of Moscow State University, no. 1.17 “Modern Dynamics and Factors of Socioeconomic Development of Regions and Cities of Russia and Countries of the Near Abroad.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абилов А.Ж., Кусаинова Г.К., Махрова А.Г. Социологические исследования при анализе формирования городских агломераций Казахстана (на примере Астаны) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2017. № 4. С. 75–83.
- Акимжанов Х.Р., Сафронов С.Г. Социально-экономическая трансформация территориальной структуры Карагандинской агломерации // Региональные исследования. 2014. № 2. С. 86–96.
- Антонов Е.В., Махрова А.Г. Крупнейшие городские агломерации и формы расселения на агломерационного уровня в России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 4. С. 31–45.
- Афонцев С., Зубаревич Н. Пространственное развитие как механизм модернизации Республики Казахстан // Вопр. экономики. 2012. № 5. С. 53–58. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2012-5-53-58>
- Голубчиков О.Ю., Бадина О.В. Макрорегиональные тенденции развития городов бывшего СССР // Региональные исследования. 2016. № 2. С. 31–42.
- Жумасултанов Т.Ж., Ибраев А.Т. Население Казахстана с древнейших времен до наших дней. Алматы: КИИТУ, 2000. 152 с.
- Искалиев Д.Ж. Городское расселение Казахстана: тенденции и факторы // Наука. Инновации. Технологии. 2017. № 2. С. 131–146.
- Ланно Г.М. Развитие городских агломераций в СССР. М.: Наука, 1978. 152 с.
- Маршалл А. Принципы политической экономии. М.: Прогресс, 1983. Т. 1. 416 с.
- Кириллов П.Л., Махрова А.Г. Сценарии демографического развития агломераций Казахстана // Демографическая ситуация в Казахстане: состояние и перспективы. Вопросы истории и археологии Западного Казахстана. 2011. № 2. С. 10–22.
- Махрова А.Г., Сафронов С.Г. Тенденции развития агломераций Казахстана в XXI в. // Экологические проблемы и устойчивое развитие регионов и городов Республики Казахстан: Материалы Междунар. научн.-практ. конф., посвященной 30-летию Республики Казахстан и 20-летию Казахстанского филиала Московского университета. Нур-Султан, 2021. С. 34–44.
- Нефедова Т.Г., Слепухина И.Л., Браде И. Миграционная привлекательность городов на постсоветском пространстве на примере России, Украины и Беларуси // Изв. РАН. Сер. геогр. 2016. № 2. С. 27–38. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-2-27-38>
- Полян П.М. Методика выделения и анализа опорного каркаса расселения. Ч. 1. М.: АН СССР, Ин-т географии, 1988. 220 с.
- Полян П.М. Территориальные структуры – урбанизация – расселение. Теоретические подходы и методы изучения. М.: Новый Хронограф, 2014. 788 с.
- Jacobs J. The Economy of Cities. N.Y.: Random House, 1969. 268 p.
- Nyussupova G., Sarsenova I. Modern demographic processes in urban areas of the Republic of Kazakhstan // Bul. of Geography. Socio-economic Series. 2012. Vol. 18. P. 99–108.
- OECD Urban Policy Reviews: Kazakhstan. Paris: OECD Publ., 2017. 276 p.
- Zubarevich N.V. Concentration of the population and economy in the capitals of post-Soviet countries // Reg. Res. Russ. 2018. Vol. 8. № 2. P. 141–150.

Urban Agglomerations of Kazakhstan: Trends in Socioeconomic Development

A. G. Makhrova^{1, *}, S. G. Safronov^{1, **}, and A. Zh. Abilov^{2, ***}

¹Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

²Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: almah@mail.ru

**e-mail: saffff@mail.ru

***e-mail: aabilov1@mail.ru

The paper is focused on the recent stage in development of Kazakhstan urban agglomerations, formed as one of the priorities of state policy. Amid the absence of criteria, the boundaries of agglomerations were delimited by 1.5-hour isochrone of transport accessibility around cities with a population of over 100000. Then, eight centers were selected using a modified coefficient of development, which took into account, in addition to urban satellites, villages with a population of over 3000. At the second stage, the degree of separation between the cores of agglomerations and zones of influence or the rest of the regions was analyzed by means of demographic and socio-economic indicators. The case of Kazakhstan has shown that the inherited structure of economy and low-comfort environment of the centers do not contribute toward the development of most agglomerations. During the post-Soviet period, their share in the population of the country increased from 43 to 52%, but the administrative approach of agglomerations “construction” works only where there are objec-

tive prerequisites and an evolutionary backlog. Of the agglomerations whose status is stated in government documents as growth points, the Almaty agglomeration is one of the most developed. The gravity zone of Shymkent includes mainly large villages, some of which have recently become towns. The capital city agglomeration in terms of development is noticeably inferior even to the neighboring Karaganda. Aktobe is able to attract residents only of the north-western regions. According to the dynamics of socio-economic development, both metropolitan agglomerations stand out, which shows the level of wages and the commissioning of housing. The three largest agglomerations are the most tertiarized, while the rest retain high employment in industry, the concentration of which in the cores does not contribute to the development of agglomerations. Except for Almaty, which is surrounded by signs of the starting suburbanization, the core cities are growing faster than their zones of influence. The suburbs lack of places for employment, a weak social infrastructure, and a lower income. This situation, which is typical of the initial stages of development, hinders the use of the classical advantages of agglomerations.

Keywords: urban agglomeration, level of development, population, economy, social sphere, Republic of Kazakhstan

REFERENCES

- Abilov A.Zh., Kusainova G.K., Makhrova A.G. Sociological studies for the analysis of formation of the metropolitan agglomeration in Kazakhstan (case study of the Astana city). *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2017, no. 4, pp. 75–83. (In Russ.).
- Afontsev S., Zubarevich N. Spatial development as a mechanism for the modernization of the Republic of Kazakhstan. *Vopr. Ekonomiki*, 2012, no. 5, pp. 53–58. (In Russ.).
<https://doi.org/10.32609/0042-8736-2012-5-53-58>
- Akimzhanov J.R., Safronov S.G. Social and economic transformation of the Karaganda agglomeration territorial structure. *Reg. Issled.*, 2014, no. 2, pp. 86–96. (In Russ.).
- Antonov E.V., Makhrova A.G. Largest urban agglomerations and forms of settlement pattern at the supra-agglomeration level in Russia. *Reg. Res. Russ.*, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 370–382.
<https://doi.org/10.1134/S2079970519040038>
- Golubchikov O.Yu., Badina O.V. Macro-regional trends in the development of cities of the former USSR. *Reg. Issled.*, 2016, no. 2, pp. 31–42. (In Russ.).
- Iskaliyev D.Zh. Urban settlement of Kazakhstan: trends and factors. *Nauka. Innovatsii. Tekhnologii*, 2017, no. 2, pp. 131–146. (In Russ.).
- Jacobs J. *The Economy of Cities*. New York: Random House, 1969. 268 p.
- Kirillov P.L., Makhrova A.G. Scenarios for the demographic development of the agglomerations of Kazakhstan. *Demograficheskaya Situatsiya v Kazakhstane: Sostoyanie i Perspektivy. Voprosy Istorii i Arkheologii Zapadnogo Kazakhstana*, 2011, no. 2, pp. 10–22. (In Russ.).
- Lappo G.M. *Razvitiye gorodskikh aglomeratsii v SSSR* [Development of Urban Agglomerations in the USSR]. Moscow: Nauka Publ., 1978. 152 p.
- Marshall A. *Printsipy politicheskoi ekonomii* [Principles of Political Economy]. Vol. 1. Moscow: Progress Publ., 1983. 416 p.
- Makhrova A.G., Safronov S.G. Trends in the development of agglomerations of Kazakhstan in the XXI century. In *Ekologicheskie problemy i ustoychivoe razvitiye regionov i gorodov Respubliki Kazakhstan. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 30-letiyu Respubliki Kazakhstan i 20-letiyu Kazakhstanskogo filiala Moskovskogo universiteta* [Ecological Problems and Sustainable Development of Regions and Cities of the Republic of Kazakhstan. Materials of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 30th Anniversary of the Republic of Kazakhstan and the 20th Anniversary of the Kazakhstan Branch of Moscow University]. Nur-Sultan: Kazakhstan branch of Moscow University, 2021, pp. 34–44.
- Nefedova T.G., Slepukhina I.L., Brade I. Migration attractiveness of cities in the post-Soviet space: A case study of Russia, Ukraine and Belarus. *Reg. Res. Russ.*, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 131–143.
<https://doi.org/10.1134/S2079970516020088>
- Nyussupova G., Sarsenova I. Modern demographic processes in urban areas of the Republic of Kazakhstan. *Bull. Geogr.*, 2012, vol. 18, pp. 99–108.
- Polyan P.M. *Metodika vydeleniya i analiza opornogo karkasa naseleniya* [The Method of Selection and Analysis of the Supporting Frame of the Population]. Moscow: AN SSSR, In-t geografii Publ., 1988. 220 p.
- Polyan P.M. *Territorial'nye struktury – urbanizatsiya – ras-selenie. Teoreticheskie podkhody i metody izucheniya* [Territorial Structures – Urbanization – Settlement Pattern. Theoretical Approaches and Methods of Study]. Moscow: Novyi Khronograf Publ., 2014. 788 p.
- OECD *Urban Policy Reviews: Kazakhstan*. Paris: OECD Publ., 2017. 276 p.
- Zhumasultanov T.Zh., Ibraev A.T. *Naselenie Kazakhstana s drevneishikh vremen do nashikh dnei* [The Population of Kazakhstan from Ancient Times to the Present Day]. Almaty: KIITU Publ., 2000. 152 p.
- Zubarevich N.V. Concentration of the population and economy in the capitals of post-Soviet countries. *Reg. Res. Russ.*, 2018, vol. 8, no. 2, pp. 141–150.

УДК 911.37

ДВИЖЕНИЕ ВВЕРХ: МИГРАЦИЯ МЕЖДУ УРОВНЯМИ ПОСЕЛЕНЧЕСКОЙ ИЕРАРХИИ В РОССИИ В 2010-е ГОДЫ

© 2023 г. Н. В. Мкртчян^{a, b, *}, Р. И. Гильманов^c

^aНациональный исследовательский университет “Высшая школа экономики”,
Институт демографии им. А. Г. Вишневского, Москва, Россия

^bРоссийская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, Москва, Россия

^cРосстат, Управление статистики населения и здравоохранения, Москва, Россия

*e-mail: nmkrtchyan@hse.ru

Поступила в редакцию 04.08.2022 г.

После доработки 19.10.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

Впервые на российских данных за 2011–2020 гг. оценивается переток населения между семью уровнями поселенческой иерархии, представленной городами разных размеров и их пригородами, иными городскими и сельскими населенными пунктами. Для уровней иерархии рассчитаны показатели миграционного прироста (убыли) населения и показатели демографической эффективности в виде матриц. Показано, что на масштабы перетока влияют изменения в методологии учета миграции в России в 2010-е годы, а именно – “автоматическое” возвращение мигрантов к месту постоянного проживания по окончании срока регистрации по месту жительства. Бенефициарами вертикальной миграции населения являются города с населением свыше 250 тыс. жителей, в наибольшем выигрыше – агломерации Москвы и Санкт-Петербурга. Каждый следующий уровень поселенческой иерархии отдает население наверх и получает подпитку с более нижних этажей. В отличие от стран, где проводились подобные исследования (США, Канада, Нидерланды и др.), в России отсутствует переток населения сверху вниз, а восходящие потоки имеют очень высокую эффективность, особенно велика она для Москвы, Санкт-Петербурга и их пригородов. Несмотря на перемещение населения между соседними уровнями поселенческой иерархии, его демографический эффект не так велик, как в скачкообразных переселениях. Расчеты базируются на индивидуальных деперсонифицированных данных мигрантов в России, позволяющих детализировать потоки миграции до отдельных населенных пунктов. Пространственная привязка данных осуществлялась на основе 15-значных кодов Росстата, уникальных для каждого населенного пункта, что позволило анализировать миграцию не между муниципальными единицами, а между населенными пунктами, сгруппированными по размеру, а также выявить влияние особенностей учета миграции в 2010-е годы на показатели перетока населения между выделенными группами населенных пунктов.

Ключевые слова: внутренняя миграция, города, населенные пункты, поселенческая иерархия, вертикальная миграция, пригороды, статистика миграции

DOI: 10.31857/S2587556623010132, **EDN:** LUPVRI

ВВЕДЕНИЕ

За 2011–2020 гг. в России зафиксированы 38.9 млн внутривнутригосударственных переселений, связанных со сменой проживания навсегда или на более-менее длительное время. Мигранты переезжают из одних частей страны в другие, в результате чего население перераспределяется между отдельными регионами, население одних регионов сокращается, а других – растет.

С появлением в открытом доступе данных о внутренней миграции, детализированных до уровня муниципального района (городского округа), возможности анализа миграции в России расширились. Исследования показали, что ми-

грация способствует концентрации населения в крупных городах и их пригородах, обширные периферийные пространства теряют жителей. Но даже в регионах устойчивого миграционного оттока региональные столицы продолжают увеличивать население (Денисов, 2017), в то время как даже в регионах, привлекательных для мигрантов, есть обширные территории миграционной депрессии (Нефедова, 2020). Помимо перетока населения между регионами и частями страны действует не менее мощный переток между центрами и периферией, между населенными пунктами разных размеров.

В данной статье предпринята попытка оценки вертикальной миграции в России, под которой понимается движение населения между населенными пунктами разного размера и положения в системе центр–периферия. Мы не просто оцениваем масштабы этого перетока, но и анализируем, между какими уровнями иерархии поселений (населенных пунктов) осуществляется этот переток, имеет ли он строго восходящую или где-то — нисходящую направленность. Эта статья — первый подход к решению названной задачи, исследование с использованием данных за 2011–2020 гг. будет продолжено.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Миграция между поселениями разных размеров, или разными уровнями поселенческой (городской) иерархии, исследуется в развитых странах со второй половины XX в. Работы, позволяющие оценить переток населения вверх и вниз (*moving up and down*) на достаточно детальном пространственном уровне, появились на рубеже столетий и связаны с доступностью статистических данных. В (Plane et al., 2005) переток населения США оценен с выделением семи иерархических уровней поселений, и он не имеет достаточно четкой восходящей или нисходящей направленности. При этом мегаполисы в США теряют население, в том числе в миграции со стоящими на следующем уровне иерархии метрополитенскими ареалами с населением более 1 млн человек (Plane and Henrie, 2012). Подобное исследование по Канаде с выделением 5-уровневой иерархической поселенческой системы (Newbold, 2011) показало, что население перетекает вверх, впрочем, самый верхний иерархический уровень испытывал миграционную убыль. Вертикальная миграция в Канаде происходит не скачкообразно, а ступенчато, между соседними уровнями поселенческой иерархии.

В аналогичном исследовании (de Jong et al., 2016) анализируется переток между пятью уровнями городской иерархии в Нидерландах и констатируется преобладание восходящих потоков, несмотря на высокий уровень урбанизации в стране. Однако другое исследование показало, что в условиях экономического кризиса 2007-го и последующих годов стали преобладать нисходящие движения (van Leeuwen and Venhorst, 2021) и что в целом переток снижается. Экономическая целесообразность миграции в рамках городской иерархии рассматривается также для домохозяйств в Швеции (Korpi et al., 2011), отмечается, что на эффективность миграции влияют не только и не столько возможность увеличения доходов (они значимо растут при движении вверх), но и меняющиеся расходы на жилье. Примеры показывают неоднозначность выбора направления

движения в поселенческой системе. Центрами притяжения населения могут стать и небольшие города, как это происходит в Исландии (Vjarnason et al., 2021).

Все рассмотренные работы, а также (Plane and Jurjevich, 2009) показывают, что движение вверх и вниз по иерархии в разных возрастах сильно различаются и часто общее движение задают наиболее миграционно активные группы населения, прежде всего молодежь.

В России исследования миграции между отдельными уровнями поселенческой иерархии ограничены отсутствием статистических данных, есть только общие представления о нетто-миграции населения для групп поселений¹ разных размеров (Махрова, Кириллов, 2014; Nefedova et al., 2016). При этом расчеты с использованием данных о миграции по муниципальным образованиям показывают, что население концентрируется в крупногородских агломерациях, а периферийные территории, сильно удаленные от крупных городов, имеют устойчивый и интенсивный миграционный отток населения (Karachurina and Mkrtchyan, 2016). Чем крупнее город, тем вероятнее, что он будет иметь устойчивый прирост населения во внутрироссийской миграции (Мкртчян, 2011).

Похожая, но далеко не во всем, ситуация в Китае: исследования показывают высокую привлекательность для мигрантов крупнейших мегаполисов и крупных (по китайским меркам) городов (Liu and Wang, 2020; Yaojun et al., 2019), при этом сдерживающими факторами миграции выступают ценовая недоступность жилья в таких городах и политика властей, ограничивающих доступ к системе социальной поддержки (*Hukou*). В результате, поток мигрантов ориентирован прежде всего на крупные города, а не на мегаполисы (Song and Zhang, 2020), отмечается отток населения из подавляющего большинства сельских территорий (Ma et al., 2018). Полагаем, что более детальные исследования сдерживаются в Китае отсутствием детальных статистических данных.

МЕТОДИКА И ДАННЫЕ

В работе рассматривается миграция в России между поселениями разных размеров — начиная с самых малых и заканчивая крупнейшими городами. Объединенные в группы по размеру, эти населенные пункты образуют этажи поселенческой иерархии. В самом ее низу находятся не крупные сельские поселения, выше — малые и средние города, а на самом верху — Москва и Санкт-Петербург. При этом крупные и средние поселения рассматриваются вместе с их пригородами, которые

¹ В статье слова “поселение” и “населенный пункт” используются как синонимы.

Таблица 1. Группировка населенных пунктов (включая пригороды) и число проживающего в них населения

Группа (уровень поселенческой иерархии)	Радиус выделения пригородов, км	Численность населения, млн чел.		
		центр и пригороды	центр	пригороды
1. Москва и Санкт-Петербург		24.0	16.2	7.8
Москва	100	18.1	11.3	6.8
Санкт-Петербург	100	5.9	4.9	1.0
2. 750–1600 тыс. чел.	50	21.1	15.6	5.5
3. 250–750 тыс. чел.		31.3	24.6	6.7
500–750 тыс. чел.	30	14.7	12.1	2.6
250–500 тыс. чел.	30	16.6	12.5	4.1
4. 100–250 тыс. чел.	20	13.4	10.2	3.1
5. 10–100 тыс. чел.		25.8	17.3	1.6
50–100 тыс. чел.	10	8.4	7.3	1.1
20–50 тыс. чел.	5	10.5	10.0	0.5
10–20 тыс. чел.	...	5.9	...	...
6. 1–10 тыс. чел.		16.4	...	...
3–10 тыс. чел.	...	9.5	...	...
1–3 тыс. чел.	...	6.9	...	...
7. <1 тыс. чел.	...	14.3	...	...

Источник. ВПН-2010; Государственный каталог географических названий. <https://cgkipd.ru/science/names/reestry-gkgm.php>; Яндекс. Карты.

не только находятся с ними в тесной взаимосвязи, но и, как известно, имеют интенсивный миграционный прирост (Karachurina and Mkrtchyan, 2021). Природа этого миграционного прироста связана с расползанием городов за пределы границ их городских округов (Карачурина и др., 2021), а привлекательность для мигрантов пригородов крупных и крупнейших городов базируется на территориальной близости их к крупному городу. Этот эффект также называется агломерационным (Plane and Henrie, 2012). Миграционный баланс населения пригородов коренным образом отличается от периферийных территорий, он зависит не от размера поселений, составляющих пригороды, а от размера города (центра), вокруг которых они формируются. Для миграционного баланса населенного пункта вблизи ядра агломерации не важен его собственный размер, а важна его близость к крупному центру.

Населенные пункты включались в пригороды городов на основании показателя разности координат центра данного поселения и центра ближайшего города определенного размера; мы используем расстояние по прямой. Если рассматриваемый пригород одновременно входит в две и более пригородные зоны (например, городов Стерлитамак и Салават), то он относился к центру более высокого порядка. Если же населенный пункт попадает в зону двух центров одного уров-

ня, то относился к тому, расстояние до которого меньше.

Радиус пригородов определен в зависимости от величины городов, их формирующих (табл. 1). Данный метод выделения пригородов — формально очень простой, естественно, он не может учесть особенности городов, объединенных в ту или иную группу. Основной принцип, на основе которого нами определен радиус выделения пригородов, — примерное расстояние, в пределах которого нетто-миграция пригородов существенно отличается от нетто-миграции окружающей периферии. Радиус был определен для групп городов эмпирическим путем; подобные расчеты на примерах крупногородских агломераций уже проводились (Карачурина и др., 2021). Не все города способны оказывать резко позитивное влияние на миграционный прирост своих пригородов, в особенности это касается городов с населением менее 100 тыс. жителей. В таких случаях при выделении пригородов рассматриваются совместно поселения, фактически сросшиеся или расположенные близко друг к другу, что также может оказывать влияние на их миграционный прирост. Примерами могут служить г. Славянск-на-Кубани и хутор Трудобеликовский (Краснодарский край); г. Дюртюли и с. Иванеево (Республика Башкортостан).

Для Москвы и Санкт-Петербурга пригородами считались поселения, входящие в 100-кило-

метровую зону [в (Plane and Henrie, 2012) к мегаполисам США также приписывались 100-мильные буферные зоны]; чем меньше город, тем меньший радиус отнесенных к нему пригородов.

Для расчета численности населения каждого населенного пункта использовались данные Всероссийской переписи населения 2010 г. (ВПН-2010). Авторы отдают себе отчет в том, что число жителей отдельных населенных пунктов — как крупных (например, Краснодар, Тюмень и т.п.), так и мелких (например, Магас в Республике Ингушетия), могла меняться за рассматриваемый период 2011–2020 гг. существенно, но иного источника численности жителей этих населенных пунктов на момент подготовки статьи не имелось.

В аналитических целях изучения миграции между отдельными уровнями иерархии поселений мы объединили Москву и Санкт-Петербург (с их пригородами), обозначив их как “мегаполисы”. Группа городов с числом жителей 750–1600 тыс. включает, фактически, остальные города-миллионники, так как население Воронежа, Перми, Красноярска к дате ВПН-2010 немного не дотягивало до этого уровня, а Саратов вместе со спутником (г. Энгельс) уже превосходил его. В группу, условно, “полумиллионников”, с населением от 250 до 750 тыс., попали, например, Краснодар и Тюмень, которые в 2010-е годы демонстрировали быстрый рост. Также мы объединили группы поселений с населением 50–100, 20–50 и 10–20 тыс. жителей в единый уровень “малые и средние города”, а поселения с 3–10 и 1–3 тыс. жителей — в группу “крупных сельских населенных пунктов”. Это деление весьма условно, есть сельские населенные пункты с числом жителей больше 10 тыс., есть города, чье население не достигает 10 тыс. жителей, пгт с разным населением, — любая группировка всегда представляет собой компромисс.

Расчеты за 2011–2020 гг. основывались на индивидуальных деперсонифицированных данных мигрантов, которые перемещались в пределах территории России (т.е. внутренних мигрантов). Только такие данные позволяют анализировать миграцию с точностью до отдельных населенных пунктов, что необходимо для их группировки по размерам. Пространственная привязка данных осуществлялась на основе 15-значных кодов Росстата; не удалось привязать очень небольшую долю учтенной Росстатом миграции, за весь период составившую 0.04% от всех переселений. Данные позволяли выделять миграцию, фиксируемую на основе регистрации по месту жительства и месту пребывания.

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТАТИСТИЧЕСКОГО УЧЕТА МИГРАЦИИ В РОССИИ НА ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Важно, что в рассматриваемый период методика учета миграции в России не менялась, однако методика учета долговременной миграции в России в 2011 г. претерпела самую серьезную трансформацию за весь постсоветский период. До этого времени как долговременные мигранты учитывались только те, кто имел регистрацию по месту жительства (аналог постоянной прописки в СССР), но с 2011 г. к ним добавились зарегистрированные по месту пребывания на срок 9 месяцев и более. Тем самым Росстат приблизил методику учета миграции к рекомендациям ООН (Чудиновских, 2019) и достаточно успешно решил проблему недоучета де-факто долговременной миграции, которая была острой в 2000-е годы. Число учтенных внутристрановых мигрантов более чем удвоилось.

Но изменение методики учета породило новую проблему, которая снижает качество наблюдения за миграционными процессами. По окончании срока регистрации лица, у которых она закончилась, автоматически считаются выбывшими к месту постоянного проживания, но происходят ли эти перемещения в реальности, не известно. Кроме того, за срок временного проживания ряд структурных характеристик мигрантов (уровень образования, семейное положение и т.п.) могли измениться, но эти изменения не могут быть зафиксированы статистикой (Мкртчян, 2020). Для данной работы такие автоматические выбытия (в терминологии Росстата “возвращение к месту жительства после временного пребывания на другой территории”, далее — автовозврат) представляют проблему, о чем будет сказано ниже.

Из 38.9 млн чел., переселившихся в пределах России за 2011–2020 гг., 19.7 млн были зарегистрированы по месту жительства (т.е. по методике, которая действовала до 2011 г.), 11.1 млн — по месту пребывания на разный срок, а 8.1 млн, или почти 21%, составил автовозврат (табл. 2). Направления автовозврата всегда противоположны доминирующим направлениям миграции, он существенно нивелирует эффект перераспределения населения между регионами страны, между поселениями разных размеров. К одной из наиболее массовых категорий мигрантов, которых фиксирует автовозврат, относятся выпускники учреждений среднего профессионального образования и высшего профессионального образования, у которых заканчивается регистрация по месту пребывания.

Но эффект автовозврата проявился не сразу, что породило представление о резком росте потока населения между частями страны, концентрации мигрантов в крупных городах в начале

Таблица 2. Число прибывших по видам регистрации, Россия, 2011–2020 гг.

Год	Всего	Зарегистрированы по месту жительства		Зарегистрированы по месту пребывания		Автовозврат	
		тыс. чел.	%	тыс. чел.	%	тыс. чел.	%
2011	3057.6	2058.0	67.3	988.8	32.3	10.8	0.4
2012	3774.8	2239.4	59.3	1110.3	29.4	425.1	11.3
2013	3787.3	2042.1	53.9	1166.8	30.8	578.4	15.3
2014	3883.1	1982.1	51.0	1070.7	27.6	830.3	21.4
2015	4128.8	2005.1	48.6	1247.8	30.2	875.9	21.2
2016	4126.8	1895.8	45.9	1212.2	29.4	1018.8	24.7
2017	4179.7	1921.6	46.0	1201.9	28.8	1056.2	25.3
2018	4337.3	2026.4	46.7	1195.3	27.6	1115.7	25.7
2019	4055.3	1895.5	46.7	1053.2	26.0	1106.6	27.3
2020	3521.2	1609.4	45.7	828.8	23.5	1083.0	30.8
Итого, 2011–2020	38851.9	19675.4	50.6	11075.9	28.5	8100.6	20.8

Источник. Росстат.

2010-х годов и о последующем его постепенном ослаблении к концу десятилетия. Как можно видеть (см. табл. 2), после 2016 г. масштабы автовозврата практически сравнялись с числом зарегистрированных по месту пребывания, а в 2020 г. даже превысили их. Благодаря использованным в данной статье индивидуальным данным, которые позволяют выделить автовозврат во всех анализируемых потоках мигрантов, мы имеем возможность отследить его эффект для оценки масштабов перетока населения между поселениями разных размеров.

В наиболее общем виде рассмотрим миграционный прирост/убыль (или нетто-миграцию²) между крупными городами (с населением 250 тыс. жителей и более) и их пригородами, с одной стороны, и поселениями меньшего размера — с другой. Как видно на рис. 1, миграционный прирост населения как крупных, так и более мелких населенных пунктов в результате миграции, сопровождающейся регистрацией по месту жительства и месту пребывания, был стабильным вплоть до 2019 г. (линии “зарегистрированы по месту жительства”, “зарегистрированы по месту пребывания” и суммарная — “в пределах России — без автовозврата”). Однако линия “в пределах России — всего”, включающая автовозврат, показывала нисходящий тренд, начиная с 2014 г. Именно это (с учетом автовозврата) перераспределение населения между поселениями разных размеров публикуют Росстат и его территориальные органы, например, в Базе данных показателей муниципальных образований (БД ПМО) или при оценке

миграции между городскими и сельскими поселениями. Но надо понимать, что рост перетока между поселениями разных размеров в 2011–2013 гг. был обусловлен фиксацией дополнительного объема переездов в связи с изменением методики учета, а последующий спад — появлением автовозврата. Пожалуй, только в 2019–2020 гг. имел место реальный спад, когда Росстат зафиксировал снижение объемов как зарегистрированных по месту жительства, так и по месту пребывания.

Мы не утверждаем, что по мере окончания регистрации по месту пребывания никто не возвращается к месту постоянного проживания, т.е. миграционные перемещения, фиксируемые как автовозврат, не реализуются в реальности. Но и полагать, что никто не остается проживать без регистрации, не переезжает к новому месту постоянного или временного проживания, также не можем. Истина — где-то посередине. Поэтому будем считать, что миграция с учетом автовозврата и без него — это своего рода верхняя и нижняя границы возможных изменений перераспределения населения.

В данной работе, имеющей, скорее, разведывательный характер, оценивается роль миграции в перераспределении населения между отдельными, достаточно сильно агрегированными этапами иерархии поселений в России — ее абсолютные масштабы и “эффективность”, по методике, использованной в (Plane et al., 2005) и других работах D. Plane и его соавторов (Plane and Henrie, 2012; Plane and Jurjevich, 2009), а также в исследованиях по другим странам (de Jong et al., 2016).

² Нетто-миграция — термин, аналогичный чистой миграции. В англоязычной литературе ему соответствует часто используемый показатель *net migration*.

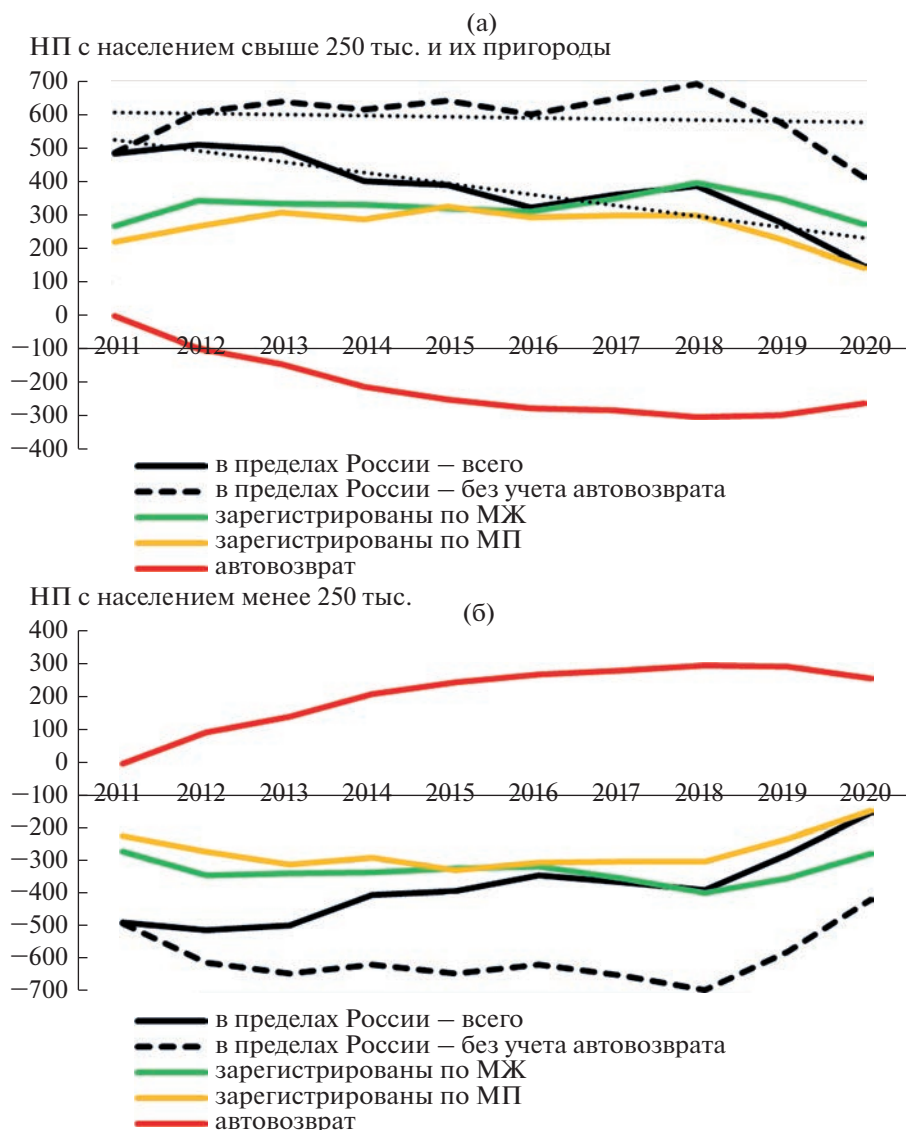


Рис. 1. Нетто-миграция населения (а) населенных пунктов людностью свыше 250 тыс. чел. (с пригородами) и (б) других населенных пунктов, 2011–2020 гг., тыс. чел.

Источник: Росстат.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчеты по семи уровням поселенческой иерархии, кратко охарактеризованным выше (см. табл. 1), показали объем миграционного перераспределения населения между ними (табл. 3). Учитывая, что весь переток был направлен вверх — от самых мелких населенных пунктов к более крупным и крупнейшим (включая их пригороды), его диапазон можно оценить в интервале от 6 до 9.1 млн чел., в зависимости от того, принимать ли во внимание автовозврат или нет. Автовозврат существенно снижает роль вертикального перетока: без его учета 9.1 млн чел., перераспределяющиеся на более высокие уровни иерархии, составляют 29.8% всех фиксируемых Росстатом внутривнутрипереселений (см. табл. 2); если же его учитывать,

то она снижается до 15.4%, т.е. почти вдвое. Масштабы и доля вертикальной миграции зависят от числа выделенных в данной работе уровней пространственной иерархии: чем их больше, тем больше будет перемещающихся с уровня на уровень. Это как в странах (регионах) с менее или более дробным административным делением: чем больше административных единиц, переселения между которыми учитываются как миграция, тем больше ее масштабы. Но расчет по дополнительно выделенным уровням иерархии (см. табл. 1) показал, что переток возрастает несильно, что подтверждает достаточность выделенных в работе семи уровней иерархии поселений.

Также важно отметить, что масштабы перетока с учетом автовозврата лишь незначительно превы-

Таблица 3. Перераспределение населения между семью уровнями поселенческой иерархии в России в результате внутренней миграции, 2011–2020 гг., млн чел.

Показатель	Миграция в пределах России		
	всего	внутрирегиональная	межрегиональная
Всего (с учетом автовозврата)	6.0	3.0	3.0
Без учета автовозврата	9.1	4.2	4.9
зарегистрированы по месту жительства	5.2	2.7	2.5
зарегистрированы по месту пребывания	3.9	1.5	2.4
Автовозврат	–3.1	–1.2	–1.9

Таблица 4. Миграционный прирост (убыль) населения по отдельным уровням иерархии поселений, с учетом автовозврата, 2011–2020 гг., тыс. чел.*

В обмене населением с уровнем:	Всего	Миграционный прирост (убыль) для уровня иерархии:						
		Москва и Санкт-Петербург	750–1600 тыс. чел.	250–750 тыс. чел.	100–250 тыс. чел.	10–100 тыс. чел.	1–10 тыс. чел.	<1 тыс. чел.
Всего	0.0	2076.2	769.7	902.7	–222.8	–925.7	–1009.3	–1590.8
Москва и Санкт-Петербург	–2076.2	0.0	–281.8	–599.8	–286.9	–507.9	–213.2	–186.6
750–1600 тыс. чел.	–769.7	281.8	0.0	–67.2	–137.4	–395.8	–238.3	–212.8
250–750 тыс. чел.	–902.7	599.8	67.2	0.0	–171.3	–538.3	–471.5	–388.6
100–250 тыс. чел.	222.8	286.9	137.4	171.3	0.0	–92.7	–146.3	–133.7
10–100 тыс. чел.	925.7	507.9	395.8	538.3	92.7	0.0	–222.4	–386.6
1–10 тыс. чел.	1009.3	213.2	238.3	471.5	146.3	222.4	0.0	–282.4
<1 тыс. чел.	1590.8	186.6	212.8	388.6	133.7	386.6	282.4	0.0

Примечание. *Поселения 1–5 уровней – с учетом пригородов, см. табл. 1.

шают переток мигрантов, регистрирующихся по месту жительства (т.е. по той методике, которая действовала до 2011 г.). Перераспределение резко усилилось в начале 2010-х годов (см. рис. 1), но вернулось к прежним значениям уже к 2014–2015 гг. Так что изменение методики учета миграции в 2011 г., которое привело к росту ее масштабов, мало повлияло на переток мигрантов по городской иерархии, их концентрации в крупных городах. Если же не учитывать автовозврат, то эффект получился существенно большим.

Это можно видеть на примере отдельных уровней поселенческой иерархии (табл. 4 и 5). За десятилетие переток в Москву и Санкт-Петербург с их пригородами составил от 2.1 до 3.3 млн чел., на три верхних уровня суммарно – от 3.7 до 5.9 млн чел. Соответственно, столько потеряли за этот период четыре нижних уровня.

Полностью корректный расчет интенсивности нетто-миграции населения на отдельных уровнях поселенческой иерархии с использованием данных о населении на дату ВПН-2010 невозможен, так как это население – на самое начало доста-

точно продолжительного временного периода. Поэтому показатель интенсивности для верхних этажей будет несколько завышен, а для нижних – занижен. Если все же пренебречь недостаточной корректностью данных для расчета, то получается, что позитивный эффект от перераспределения населения нарастал к самому верху поселенческой иерархии, а наиболее негативный эффект отмечен в самом ее низу. Москва и Санкт-Петербург с пригородами приобрели в результате миграции снизу за 2011–2020 гг. 8.7–13.9% относительно начальной численности жителей, а малые периферийные сельские населенные пункты (менее 1 тыс. жителей) потеряли от 11.2–16.6%.

На тех же данных были рассчитаны коэффициенты интенсивности перетока населения между отдельными уровнями поселенческой иерархии (табл. 6). Поскольку население перемещается между двумя уровнями, то миграционный прирост мы соотносим с суммарным их населением. Например, переток из населенных пунктов с числом жителей менее 1 тыс. чел. в населенные пункты с числом жителей от 1 до 10 тыс. чел. делится на население,

Таблица 5. Миграционный прирост (убыль) населения по отдельным уровням иерархии поселений, без учета автовозврата, 2011–2020 гг., тыс. чел.*

В обмене населением с уровнем:	Всего	Миграционный прирост (убыль) для уровня иерархии:						
		Москва и Санкт-Петербург	750–1600 тыс. чел.	250–750 тыс. чел.	100–250 тыс. чел.	10–100 тыс. чел.	1–10 тыс. чел.	<1 тыс. чел.
Всего	0.0	3322.1	1169.6	1397.2	–357.2	–1523.7	–1641.5	–2366.4
Москва и Санкт-Петербург	–3322.1	0.0	–443.6	–928.4	–461.3	–815.0	–354.5	–319.3
750–1600 тыс. чел.	–1169.6	443.6	0.0	–97.8	–203.0	–595.1	–373.9	–343.3
250–750 тыс. чел.	–1397.2	928.4	97.8	0.0	–260.4	–809.2	–725.8	–628.0
100–250 тыс. чел.	357.2	461.3	203.0	260.4	0.0	–138.4	–218.9	–210.3
10–100 тыс. чел.	1523.7	815.0	595.1	809.2	138.4	0.0	–309.2	–524.8
1–10 тыс. чел.	1641.5	354.5	373.9	725.8	218.9	309.2	0.0	–340.8
<1 тыс. чел.	2366.4	319.3	343.3	628.0	210.3	524.8	340.8	0.0

Примечание. * Поселения 1–5 уровней – с учетом пригородов, см. табл. 1.

Таблица 6. Интенсивность миграционного перетока населения между уровнями иерархии поселений, с учетом автовозврата, 2011–2020 гг., на 1000 чел. их суммарного населения*

В обмене населением с уровнем:	Миграционный прирост (убыль) для уровня иерархии:						
	Москва и Санкт-Петербург	750–1600 тыс. чел.	250–750 тыс. чел.	100–250 тыс. чел.	10–100 тыс. чел.	1–10 тыс. чел.	<1 тыс. чел.
Москва и Санкт-Петербург	...	–6.3	–10.9	–7.7	–10.4	–5.3	–4.9
750–1600 тыс. чел.	6.3	...	–1.3	–4.0	–8.6	–6.4	–6.0
250–750 тыс. чел.	10.9	1.3	...	–3.8	–9.6	–9.9	–8.5
100–250 тыс. чел.	7.7	4.0	3.8	...	–2.4	–4.9	–4.8
10–100 тыс. чел.	10.4	8.6	9.6	2.4	...	–5.4	–9.9
1–10 тыс. чел.	5.3	6.4	9.9	4.9	5.4	...	–9.2
<1 тыс. чел.	4.9	6.0	8.5	4.8	9.9	9.2	...

Примечание. *Поселения 1–5 уровней – с учетом пригородов, см. табл. 1.

проживающее на дату ВПН-2010 в обеих этих группах населенных пунктов.

С учетом разной численности населения, проживающего на отдельных этажах предложенной иерархии поселений, самый интенсивный переток осуществлялся в 2010-е годы в агломерации Москвы и Санкт-Петербурга с уровня 3, представленного городами с числом жителей 250–750 тыс. чел. и их пригородами, и с уровня 5 (10–100 тыс.). Высока также интенсивность перетока в города с численностью жителей 250–750 тыс. и их пригороды с уровнями 5 и 6. Отметим, что интенсивность перетока населения между соседними уровнями (значения сразу под основной диагональю матрицы) поселенческой иерархии невелика, кроме перетока с уровня 7 на уровень 6, т.е.

из малых сельских населенных пунктов в, условно, более крупные.

В (Plane et al., 2005) и ряде других рассматриваемых выше исследований, посвященных изучению вертикальной миграции, производился расчет показателя демографической эффективности миграции, исчисляемой в процентах. Расчет этого показателя прост и представляет собой отношение нетто-миграции к брутто-миграции, или миграционного прироста к миграционному обороту между каждым уровнем поселенческой иерархии. Демографическая эффективность гипотетически колеблется от 0%, если потоки в обоих направлениях равны по размеру, до 100%, если бы был поток миграции только в одном направлении. Результат расчета схематично представлен на рис. 2. Стрелки показывают направление пере-

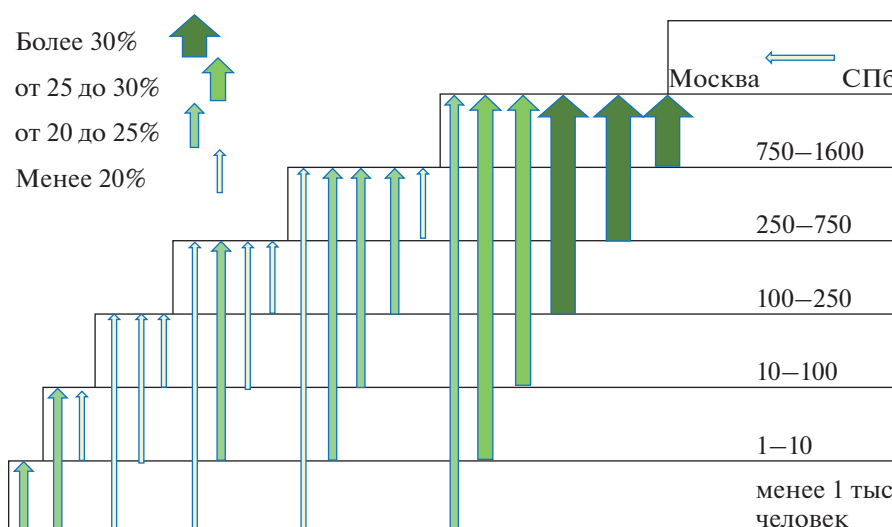


Рис. 2. Эффективность миграции между уровнями поселенческой иерархии, с учетом автовозврата, 2011–2020 гг., %.

тока населения, их толщина и интенсивность цвета означает показатель эффективности миграции. На схеме мы также дополнительно привели эффективность перетока населения между отдельными частями верхнего уровня — агломерациями Москвы и Санкт-Петербурга, она невелика и составляет всего 8.5% в пользу столицы.

Мы также рассчитали эффективность для миграции без учета автовозврата, все ее показатели характеризуются еще более высокими (порядка 50% и более) значениями, но посчитали излишним их подробно характеризовать ввиду схожести картины (см. рис. 2).

В отличие от США и других стран, в России в 2010-е годы все потоки миграции перераспределяют население снизу вверх, перетока в обратном направлении нет. Также отметим, что эффективность перетока высока. В (Plane et al., 2005) наибольшая эффективность миграции между отдельными уровнями определена в 25%, в случае же России это близкая к средней эффективность.

Самый эффективный переток практически со всех уровней осуществляется на самый верх — в агломерации Москвы и Санкт-Петербурга, причем из агломераций крупных городов разного размера. Это — явная специфика России. Напротив, низкая эффективность перетока — между соседними уровнями поселенческой иерархии (исключая два самых верхних и самых нижних). Не велика также (по российским меркам) эффективность перетока между самым нижним уровнем иерархии и самым верхним.

ВЫВОДЫ И ДИСКУССИЯ

В данной статье впервые дается оценка перераспределения населения России между отдельными

уровнями поселенческой иерархии, которых было выделено семь. Методической особенностью работы является группировка и совместное рассмотрение крупных и средних населенных пунктов с их пригородами. Данный подход продиктован, во-первых, детерминированностью показателей миграции в малых и средних населенных пунктах их положением в центрально-периферийной системе (Mkrtchyan, 2019), во-вторых, расширением многих крупных городов за пределы административных границ своих городских округов и, в-третьих, — практически повсеместным миграционным приростом населения пригородов, по интенсивности превосходящим миграционный прирост городов, вокруг которых они формируются.

Мы полагаем, что анализ миграции в России правильнее вести не по отдельным населенным пунктам, а по системам расселения, которые образуют, прежде всего, крупные города и их пригороды. На высоких уровнях поселенческой иерархии эти системы близки крупногородским агломерациям. Это логично и на обыденном уровне: человек или домохозяйство в пригороде крупного города сильно вовлечены в его жизнь посредством трудовых, учебных, бытовых, рекреационных связей. Человек, проживающий в пригороде (например, Москвы, Санкт-Петербурга), зачастую ассоциирует себя прежде всего с крупным городом, а не с населенным пунктом в его пригороде.

Оценки вертикальных миграционных потоков, проведенные в данном исследовании, и анализ их результатов были бы невозможны без использования данных о миграции на уровне населенных пунктов, без выделения миграционных потоков между населенными пунктами разных размеров и их локализации в центрально-периферий-

ной системе. Такую возможность дают деперсонифицированные индивидуальные данные, которые до этого в анализе миграции не применялись. Расчеты на их основе позволили прийти к следующим выводам.

1. *Оценки масштабов перетока населения между отдельными уровнями поселенческой иерархии и его эффективности в сильной мере зависят от изменения методики учета долговременной миграции*, а именно — учета регистрирующихся по месту пребывания и их автовозврата после ее окончания. Полагая, что точные оценки перетока невозможны, мы предлагаем характеризовать их интервальной величиной. В результате, переток населения на верхние уровни поселенческой иерархии в города с числом жителей 250 тыс. и более и их пригороды оценивается за 2010-е годы в интервале от 3.7 до 5.9 млн чел., а переток между семью уровнями вверх — от 6 до 9.1 млн чел.

2. *Переток населения со всех уровней поселенческой иерархии осуществляется только вверх*, что говорит о продолжении в России зрелой крупногородской стадии урбанизации, которую маркирует концентрация населения в крупных и крупнейших городах. Судя по нашим данным, России еще далеко до наступления стадии контрурбанизации, которую уже давно отмечают исследователи во многих западных странах (Fielding, 1982) и элементы которой время от времени находят в России (Нефедова, Трейвиш, 2017). Единственное, что может поставить под сомнение данный тезис — население концентрируется не столько в крупных городах, сколько в их ближайших пригородах (Karachurina and Mkrtchyan, 2021), но это связано, прежде всего, с разрастанием городов. Таким образом, тенденция к концентрации населения в крупных городах и их пригородах, отмеченная в исследованиях по России (Karachurina and Mkrtchyan, 2016), подтверждается.

3. *Однонаправленность перераспределения населения вверх по иерархии поселений — явная особенность России*, ничего подобного уже давно не наблюдается, судя по известным нам исследованиям, в США, Канаде и ряде европейских стран. Эффект этого перетока достигается не столько большим объемом движения вверх (Россия вообще не отличается интенсивностью миграции, существенно уступая названным странам), а крайней слабостью движения вниз. С одной немаловажной оговоркой — если не рассматривать переток из крупных городов в их ближайшие пригороды; в западных странах именно этот поток мощный, но мы не можем точно сказать, какую долю он составляет в движении вниз в отдельных странах, в данном же исследовании по России он не рассматривается.

С чем связано отсутствие движения вниз по поселенческой иерархии? Переселившись в

крупный город или родившись в нем, россияне крайне неохотно соглашаются на переезд в малый город, село или поселок на периферии. Против этого работает все, начиная от слабой диверсификации рынка труда на периферии, разницы зарплат (Нефедова, 2020), доступа к социальным услугам и социальной поддержке (Зубаревич, 2012), рисков преждевременной смертности (Щур, 2019) и заканчивая общей неудовлетворенностью сельской жизнью. Кроме того, даже де-факто уехав из крупного города (например и прежде всего, — из Москвы), люди не оформляют регистрацию по новому месту жительства или пребывания. Об этом свидетельствует, в частности, переоценка численности жителей Москвы и недооценка населения Московской области, выявленные в исследовании с использованием данных сотовых операторов (Махрова, Бабкин, 2018).

4. *Переток населения между соседними уровнями поселенческой иерархии сравнительно невелик*. Это объясняется, видимо, слабой мотивированностью такого рода переездов: при переселении из города с числом жителей 200 тыс. чел. в город с 300–400 тыс. жителей условия жизни меняются мало или не меняются совсем. Равно как и при переезде из поселка в 6–7 тыс. жителей в малый город. Единственное исключение из правила — интенсивный переезд в агломерации Москвы и Санкт-Петербурга из городов-миллионников и полумиллионников. Во-первых, переезд в столицы, мегаполисы способен привести к сильному качественному рывку в условиях жизни (недаром московская и ленинградская прописка всегда были особенно вожделенны). Во-вторых, возможно, именно жители крупных и крупнейших городов не испытывают такого сильного стресса в плане разницы цен на приобретение (аренду) жилья в мегаполисах. При этом исследование взаимосвязи миграции и рынка жилья (Куричев, Куричева, 2018) показывает, что среди покупателей жилья в столице выделяются жители окружающих Москву регионов, а также жители Санкт-Петербурга и богатых нефтегазовых регионов, а вот жители городов-миллионников в числе активных покупателей жилья в Москве не замечены. В-третьих, жителям крупных городов, возможно, проще приспособиться к специфическому ритму жизни мегаполиса.

Это не значит, что люди не переезжают между поселениями, близкими по размеру, но эти переезды не однонаправленные: потоки в ту и другую сторону сомасштабны, практически равны. И это не свидетельствует о нераспространенности ступенчатой миграции (в нашем случае ее маркируют переезды между соседними уровнями поселенческой иерархии). Переселения эти есть и фиксируются статистикой, но они идут во встречных направлениях, и поэтому редко дают эффект перетока в пользу одного или другого уровня.

Возможно, мы имеем дело с “фоновыми” перемещениями (Plane and Henrie, 2012), связанными с переездами на учебу и обратно, с иными подобными переездами. Значимый переток есть между самыми нижними уровнями поселенческой иерархии — из малых сельских населенных пунктов в крупные или в пгт. В любом случае, этот вопрос требует детального изучения, учета особой роли пригородов в ступенчатой миграции.

Проведенное исследование позволило рассмотреть лишь самые общие закономерности миграции в России между поселениями разного размера и положения в системе центр—периферия. В следующих работах мы планируем детально рассмотреть миграцию между городами разных размеров и их пригородами, возрастные особенности миграции между отдельными этапами поселенческой иерархии и ряд других вопросов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья подготовлена в рамках научно-исследовательской работы государственного задания Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят А.Э. Райсиха за предоставленные данные о численности населения по населенным пунктам и их пространственной привязке.

FUNDING

The article was prepared as part of the research work of the state assignment of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank A.E. Raysikh for providing data on the population by settlements and their spatial reference.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Денисов Е.А. Миграционные процессы в городах российского Севера в 1990–2010-е гг. // Регион. исслед. 2017. № 2. С. 44–55.
- Зубаревич Н.В. Рента столичного статуса // Pro et Contra. 2012. Т. 16. С. 6–18.
- Карачурина Л.Б., Мкртчян Н.В., Петросян А.Н. Пространственные особенности миграционного прироста пригородов региональных столиц России // Вестн. Моск. ун-та. Сер.5: География. 2021. № 6. С. 123–134.
- Куричев Н.К., Куричева Е.К. Региональная дифференциация активности покупателей на первичном рынке жилья московской агломерации // Регион. исслед. 2018. № 1. С. 22–38.
- Махрова А.Г., Бабкин Р.А. Анализ пульсаций системы расселения московской агломерации с использованием данных сотовых операторов // Регион. исслед. 2018. № 2. С. 68–78.
- Махрова А.Г., Кириллов П.Л. “Жилищная проекция” современной российской урбанизации // Регион. исслед. 2014. № 4. С. 134–144.
- Мкртчян Н.В. Миграционный баланс российских городов: к вопросу о влиянии размера и положения в системе центр-периферийных отношений // Науч. труды: ИНП РАН / гл. ред. А.Г. Коровкин. М.: МАКС Пресс, 2011. Т. 9. С. 416–430.
- Мкртчян Н.В. Проблемы в статистике внутрироссийской миграции, порожденные изменением методики учета в 2011 г. // Демографическое обозрение. 2020. Т. 7. № 1. С. 83–99.
<https://doi.org/10.17323/demreview.v7i1.10821>
- Нефедова Т.Г. Контрасты социально-экономического пространства в центре России и их эволюция: два “разреза”-профиля // Регион. исслед. 2020. № 2. С. 18–38.
- Нефедова Т.Г., Трейвиш А.И. Перестройка расселения в современной России: урбанизация или дезурбанизация? // Регион. исслед. 2017. № 2. С. 12–23.
- Чудиновских О.С. О пересмотре Рекомендаций ООН 1998 года по статистике миграции и российском контексте // Вопросы статистики. 2019. № 8. С. 61–76.
<https://doi.org/10.34023/2313-6383-2019-26-8-61-76>
- Щур А.Е. Города-миллионники на карте смертности России // Демографическое обозрение. 2019. Т. 5. № 4. С. 66–91.
<https://doi.org/10.17323/demreview.v5i4.8663>
- Bjarnason T., Stockdale A., Shuttleworth I., Eimermann M., Shucksmith M. At the intersection of urbanisation and counterurbanisation in rural space: Microurbanisation in Northern Iceland // J. of Rural Stud. 2021. Vol. 87. P. 404–414.
<https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.09.009>
- de Jong P.A., Brouwer A.E., McCann P. Moving up and down the urban hierarchy: age-articulated interregional migration flows in the Netherlands // Annals of Reg. Sci. 2016. Vol. 57. № 1. P. 145–164.
<https://doi.org/10.1007/s00168-016-0772-7>
- Fielding A.J. Counterurbanisation in Western Europe // Progress in Plan. 1982. Vol. 17. P. 1–52.
- Karachurina L.B., Mkrtychyan N.V. Intraregional Population Migration in Russia: Suburbs Outperform Capitals // Reg. Res. Russ. 2021. Vol. 11. № 1. P. 48–60.
<https://doi.org/10.1134/S2079970521010068>
- Karachurina L.B., Mkrtychyan N.V. The role of migration in enhancing settlement pattern contrasts at the municipal level in Russia // Reg. Res. Russ. 2016. Vol. 6. № 4. P. 332–343.
<https://doi.org/10.1134/S2079970516040080>
- Korpi M., Clark W.A.V., Malmberg B. The urban hierarchy and domestic migration: The interaction of internal migration, disposable income and the cost of living, Swe-

- den 1993–2002 // *J. Econ. Geogr.* 2011. Vol. 11. № 6. P. 1051–1077.
<https://doi.org/10.1093/jeg/lbq043>
- Liu T., Wang J. Bringing city size in understanding the permanent settlement intention of rural-urban migrants in China // *Population, Space and Place*. 2020. Vol. 26. № 4. e2295. (In press).
<https://doi.org/10.1002/psp.2295>
- Ma T., Lu R., Zhao N., Shaw S.-L. An estimate of rural exodus in China using location-aware data // *PLoS ONE*. 2018. Vol. 13. № 7. e0201458. (In press).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201458>
- Mkrtchyan N.V. Regional Capitals of Russia and Their Suburbs: Specifics of the Migration Balance // *Reg. Res. Russ.* 2019. Vol. 9. № 1. P. 12–22.
<https://doi.org/10.1134/S2079970519010076>
- Nefedova T.G., Slepukhina I.L., Brade I. Migration Attractiveness of Cities in the Post-Soviet Space: A Case Study of Russia, Ukraine, and Belarus // *Reg. Res. Russ.* 2016. Vol. 6. № 2. P. 131–143.
<https://doi.org/10.1134/S2079970516020088>
- Newbold K.B. Migration Up and Down Canada's Urban Hierarchy // *Canadian J. Urban Res.* 2011. Vol. 20. № 1. P. 131–149
- Plane D.A., Henrie C.J. The role of hierarchical proximity in migration and population growth: Urban shadow versus urban synergy effects // *Stud. Reg. Sci.* 2012. Vol. 42. № 1. P. 109–128.
<https://doi.org/10.2457/srs.42.109>
- Plane D.A., Henrie C.J., Perry M.J. Migration up and down the urban hierarchy and across the life course // *Proceedings of the National Acad. of Sci. of the United States of America (PNAS)*. 2005. Vol. 102. № 43. P. 15313–15318.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0507312102>
- Plane D.A., Jurjevich J.R. Ties That No Longer Bind? The Patterns and Repercussions of Age-Articulated Migration // *Professional Geographer*. 2009. Vol. 61. № 1. P. 4–20.
<https://doi.org/10.1080/00330120802577558>
- Song Y., Zhang C. City size and housing purchase intention: Evidence from rural-urban migrants in China // *Urban Stud.* 2020. Vol. 57. № 9. P. 1866–1886.
<https://doi.org/10.1177/0042098019856822>
- van Leeuwen E.S., Venhorst V.A. Do households prefer to move up or down the urban hierarchy during an economic crisis? // *J. Geogr. Sys.* 2021. Vol. 23. P. 263–289.
<https://doi.org/10.1007/s10109-021-00353-7>
- Yaojun Z., Danlin Y., Qiao C. Investigating China's interprefecture migration from a place attractiveness perspective, its spatial patterns, and demographic characteristics // *Demographic Res.* 2020. Vol. 41. P. 1007–1020.
<https://doi.org/10.4054/DemRes.2019.41.34>

Moving Up: Migration between Levels of the Settlement Hierarchy in Russia in the 2010s

N. V. Mkrtchyan^{1, 2, *} and R. I. Gilmanov³

¹HSE University, Vishnevsky Institute of Demography, Moscow, Russia

²Russian Presidential Academy of National Economy and State Service, Moscow, Russia

³Federal State Statistics Service, Department of Population and Health Statistics, Moscow, Russia

*e-mail: nmkrtchyan@hse.ru

For the first time on Russian data for 2011–2020 the flow of population between 7 levels of the settlement hierarchy is estimated. Levels of the settlement hierarchy are represented by cities of different population sizes and their suburbs, other urban and rural settlements. Indicators of migration increase (decrease) of the population and indicators of demographic efficiency in the form of matrices are calculated for the hierarchy levels. It is shown that the scale of this flow is affected by changes in the system of migration registration in Russia in the 2010s, namely, the automatic return of migrants to their place of permanent residence after the end of the period of registration at the place of residence. The beneficiaries of the population “vertical migration” are cities with over 250 thous. inhabitants, the biggest winners are the urban agglomerations of Moscow and St. Petersburg. Each next settlement hierarchy level gives the population “up” and receives replenishment from the lower “layers.” In contrast to countries where similar studies were conducted (USA, Canada, the Netherlands, etc.), there is no population flow from top to bottom in Russia, and upward flows have a very high efficiency; it is especially high for Moscow, St. Petersburg, and their suburbs. Despite the population movement between neighboring settlement hierarchy levels, its demographic effect is not as great as in irregular migrations. The research calculations are based on the migrants’ individual depersonalized data, which allow detailing migration flows to individual settlements in Russia. Spatial data referencing was carried out based on 15-digit Rosstat codes unique for each settlement. This made it possible to analyze migration not between administrative units, but between settlements grouped by population size. It was also possible to identify the influence of the features of accounting for migration on the population flow between the selected groups of settlements in the 2010s.

Keywords: internal migration, settlements, urban hierarchy, moving up and down, suburbs, migration statistics

REFERENCES

- Bjarnason T., Stockdale A., Shuttleworth I., Eimermann M., Shucksmith M. At the intersection of urbanisation and counterurbanisation in rural space: Micro-urbanisation in Northern Iceland. *J. Rural Studies*, 2021, vol. 87, pp. 404–414. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.09.009>
- Chudinovskikh O.S. On Revision of the UN Recommendations on Statistics of Migration (1998) and the Russian Context. *Vopr. Statistiki*, no. 8, pp. 61–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.34023/2313-6383-2019-26-8-61-76>
- Denisov E.A. Migration processes in the cities of the Russian North in the 1990s–2000s. *Reg. Res. Russ.*, 2018, vol. 8, no. 2, pp. 158–168.
- de Jong P.A., Brouwer A.E., McCann P. Moving up and down the urban hierarchy: age-articulated interregional migration flows in the Netherlands. *Ann. Reg. Sci.*, 2016, 57 (1), pp. 145–164. <https://doi.org/10.1007/s00168-016-0772-7>
- Fielding A.J. Counterurbanisation in Western Europe. *Progress in Planning*, 1982, vol. 17, pp. 1–52.
- Karachurina L.B., Mkrtchyan N.V. Intraregional Population Migration in Russia: Suburbs Outperform Capitals. *Reg. Res. Russ.*, 2021, 11 (1), pp. 48–60. <https://doi.org/10.1134/S2079970521010068>
- Karachurina L.B., Mkrtchyan N.V. The role of migration in enhancing settlement pattern contrasts at the municipal level in Russia. *Reg. Res. Russ.*, 2016, 6 (4), pp. 332–343. <https://doi.org/10.1134/S2079970516040080>
- Karachurina L.B., Mkrtchyan N.V., Petrosian A.N. Spatial Patterns of Net Migration in the Suburbs of Russian Regional Centers. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2021, no. 6, pp. 123–134. (In Russ.).
- Korpi M., Clark W.A.V., Malmberg B. The urban hierarchy and domestic migration: The interaction of internal migration, disposable income and the cost of living, Sweden 1993–2002. *J. Economic Geogr.*, 2011, vol. 1, no. 6, pp. 1051–1077. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbq043>
- Kurichev N.K., Kuricheva E.K. Regional differentiation of buyers' activity in the primary housing market of the Moscow agglomeration. *Reg. Res. Russ.*, 2018, vol. 8, no. 4, pp. 322–333.
- Liu T., Wang J. Bringing city size in understanding the permanent settlement intention of rural-urban migrants in China. *Popul. Space Place*, 2020, vol. 26, no. 4, e2295. (In Press). <https://doi.org/10.1002/psp.2295>
- Ma T., Lu R., Zhao N., Shaw S.-L. An estimate of rural exodus in China using location-aware data. *PLoS One*, 2018, vol. 13, no. 7, e0201458. (In Press). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201458>
- Makhrova A.G., Babkin R.A. Analysis of Moscow agglomeration settlement system pulsations based mobile operators data. *Reg. Issled.*, 2018, no. 2, pp. 68–78. (In Russ.).
- Makhrova A.G., Kirillov P.L. The 'Housing dimension' of contemporary urbanization in Russia. *Reg. Issled.*, 2014, no. 4, pp. 134–144. (In Russ.).
- Mkrtchyan N.V. Migration balance of Russian cities: on the role of population size and position in the system of central peripheral relations. *Nauchnye trudy: INP RAN, Korovkin A.G., Ed. Moscow: MAKSS Press Publ.*, vol. 9, pp. 416–430. (In Russ.).
- Mkrtchyan N. Problems in the statistics of internal Russian migration caused by changes in accounting methods in 2011. *Demographic Rev.*, 2020, 7(1), pp. 83–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.17323/demreview.v7i1.10821>
- Mkrtchyan N.V. Regional Capitals of Russia and Their Suburbs: Specifics of the Migration Balance. *Reg. Res. Russ.*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 12–22. <https://doi.org/10.1134/S2079970519010076>
- Nefedova T.G. Contrasts of socio-economic space in the center of Russia and their evolution: two cross-section cases. *Reg. Issled.*, 2020, no. 2, pp. 18–38. (In Russ.).
- Nefedova T.G., Slepukhina I.L., Brade I. Migration attractiveness of cities in the post-Soviet space: A case study of Russia, Ukraine and Belarus. *Reg. Res. Russ.*, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 131–143. <https://doi.org/10.1134/S2079970516020088>
- Nefedova T.G., Treyvish A.I. The Urbanization and Seasonal Deurbanization in Modern Russia. *Reg. Res. Russ.*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1134/S2079970519010088>
- Newbold K.B. Migration Up and Down Canada's Urban Hierarchy. *Canadian J. Urban Research*, 2011, vol. 20, no. 1, pp. 131–149.
- Plane D.A., Henrie C.J. The role of hierarchical proximity in migration and population growth: Urban shadow versus urban synergy effects. *Studies Reg. Sci.*, 2012, vol. 42, no. 1, pp. 109–128. <https://doi.org/10.2457/srs.42.109>
- Plane D.A., Henrie C.J., Perry M.J. Migration up and down the urban hierarchy and across the life course. *Proc. Nat. Acad. Sci. United States of America (PNAS)*, 2005, vol. 102, no. 43, pp. 15313–15318. <https://doi.org/10.1073/pnas.0507312102>
- Plane D.A., Jurjevich J.R. Ties That No Longer Bind? The Patterns and Repercussions of Age-Articulated Migration. *Professional Geographer*, 2009, vol. 61, no. 1, pp. 4–20. <https://doi.org/10.1080/00330120802577558>
- Schur A.E. Cities of over a million people on the mortality map of Russia. *Demographic Rev.*, 5(4), 66–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.17323/demreview.v5i4.8663>
- Song Y., Zhang C. City size and housing purchase intention: Evidence from rural-urban migrants in China. *Urban Studies*, 2020, vol. 57, no. 9, pp. 1866–1886. <https://doi.org/10.1177/0042098019856822>
- van Leeuwen E. S., Venhorst V.A. Do households prefer to move up or down the urban hierarchy during an economic crisis? *J. Geog. Sys.* 2021, vol. 23, pp. 263–289. <https://doi.org/10.1007/s10109-021-00353-7>
- Yaojun Z., Danlin Y., Qiao C. Investigating China's interprefecture migration from a place attractiveness perspective, its spatial patterns, and demographic characteristics. *Demographic Res.*, 2019, vol. 41, pp. 1007–1020. <https://doi.org/10.4054/DemRes.2019.41.34>
- Zubarevich N. Moscow as a rentier city. *Pro et Contra*, 2012, vol. 16, pp. 6–18. (In Russ.).

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.4.042

СКОРОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ГОРНЫХ ОЗЕРАХ КАВКАЗА КАК ИНДИКАТОРЫ ТЕМПОВ ДЕНУДАЦИИ НА ИХ ВОДОСБОРАХ

© 2023 г. Н. В. Кузьменкова^{a, b, *}, В. Н. Голосов^{a, c}, Е. А. Грабенко^a, М. Ю. Александрин^a,
В. А. Шишков^a, О. Н. Быхалова^d

^aИнститут географии РАН, Москва, Россия

^bХимический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^cГеографический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^dФГБУ “Государственный заповедник “Утриш”, Анапа, Россия

*e-mail: kuzmenkovanv@my.msu.ru

Поступила в редакцию 04.04.2022 г.

После доработки 18.08.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

Исследованы темпы осадконакопления пяти озер Западного и Центрального Кавказа в позднем голоцене на основе радиоизотопного датирования (^{137}Cs глобального и Чернобыльского происхождения, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, ^{14}C). Озера расположены в различных ландшафтных зонах и отличаются по своему происхождению. Водосборы исследованных озер минимально подвержены антропогенному воздействию, поэтому поступление наносов в водоем, скорости осадконакопления и их изменения во времени контролируются в основном природными факторами. Установлено, что для двух озер среднегорной зоны и зоны с залуженными и залесенными водосборами, современные скорости накопления отложений составляют 0.05–0.07 см/год, из которых практически половину составляют органические остатки. Скорости осадконакопления в высокогорном оз. Донгуз-Орун имеют тенденцию к росту и составляют в последние 30 лет 0.32 см/год без учета значительного объема наносов, которые переоткладываются в дельте перед водоемом. Противоположенный тренд скоростей осадконакопления выявлен для высокогорного оз. Гарабаши, отличительной особенностью которого является отсутствие в настоящее время ледников на его водосборе и достаточно высокое продуктивное покрытие водосбора растительностью. Скорости осадконакопления в оз. Сухой Лиман, расположенном в низкогорной зоне, составляют 0.1 см/год с трендом небольшого роста, обусловленным некоторым увеличением антропогенного воздействия, связанном с локальными вырубками и ростом рекреационной нагрузки.

Ключевые слова: скорости осадконакопления, озера, радионуклидное датирование, темпы денудации, Кавказ

DOI: 10.31857/S2587556623010107, **EDN:** LJZPYG

ВВЕДЕНИЕ

Донные осадки водоемов — это важнейший природный архив, фиксирующий информацию об изменениях окружающей среды за период седиментации. В частности, знания о скоростях накопления и составе донных отложений озер позволяют судить об интенсивности процессов денудации на их водосборах. В качестве хрономаркеров для выявления скоростей осадконакопления за различные интервалы времени используются радионуклиды природного и техногенного происхождения. Неравновесный (атмосферный) $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ и ^{137}Cs давно применяется для оценки скоростей отложения наносов в водоемах (Corbett et al., 2007; Putyrskaya et al., 2020; Rose et al., 2011; Semertizidou et al., 2019; Su and Huh, 2002; Yamada

and Aono, 2003). В сочетании с использованием датировок донных отложений с применением ^{14}C возникает возможность проводить оценки темпов аккумуляции за более длительные временные интервалы (Carbon Isotope Techniques, 1991; Luque and Julià, 2002). В результате совместного использования перечисленных выше радиоизотопов можно определить тенденции изменений темпов денудации на водосборах исследуемых водоемов по десятилетиям (для 150-летнего периода) и столетиям (в зависимости от детальности отбора проб для радиоуглеродного анализа), и тем самым охватывать временные интервалы в несколько тысяч лет.

В горах достаточно отчетливо проявляется влияние высотной поясности, которая определяет проективное покрытие поверхности почвы, а

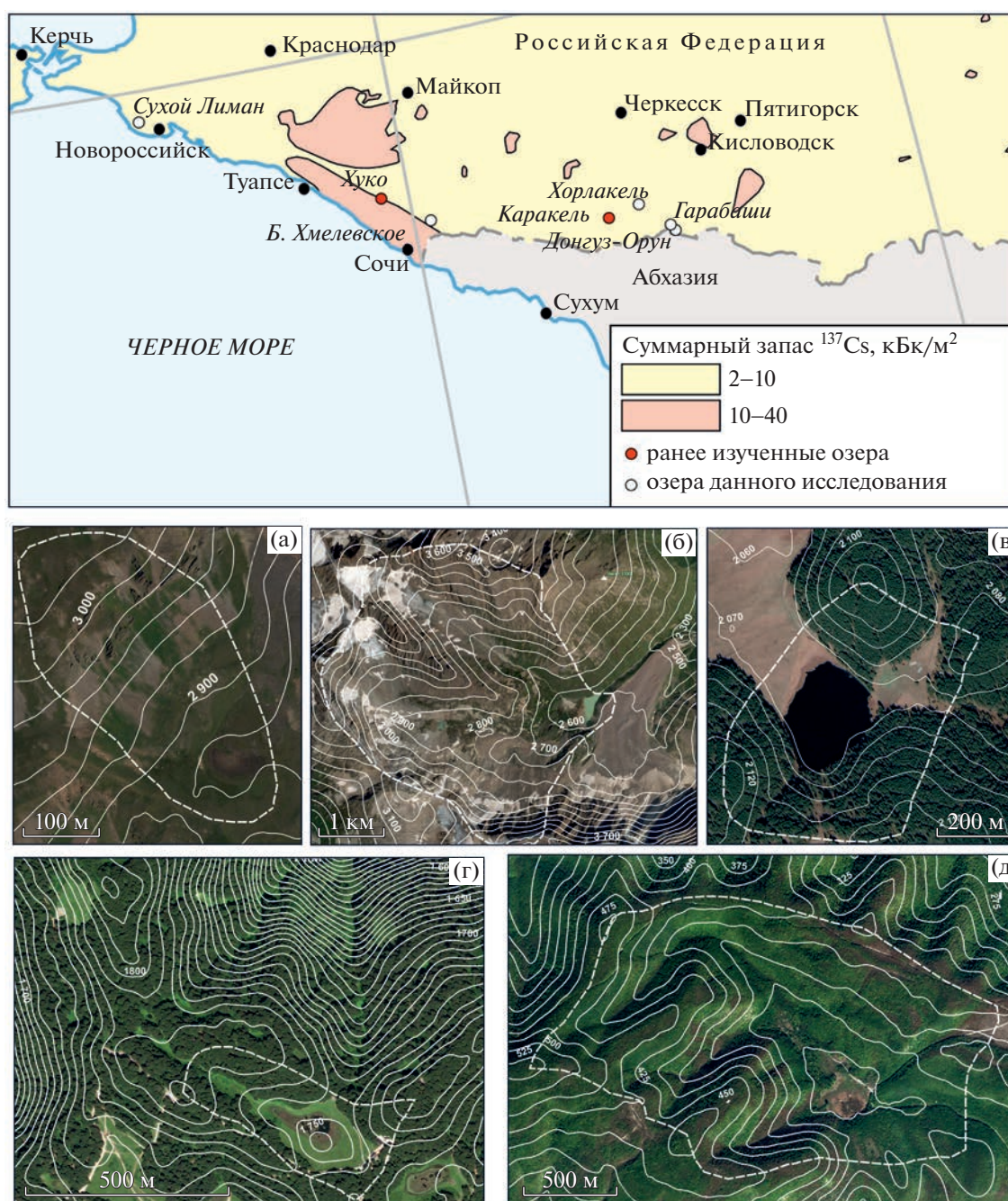


Рис. 1. Положение исследуемых озер на карте Чернобыльских выпадений 1998 г. (Izrael, n.d.), границы водосборов (показаны пунктиром) и конфигурация их водного зеркала: (а) Гарабиши, (б) Донгуз-Орун, (в) Хорлакель, (г) Б. Хмелевское, (д) Сухой Лиман.

также степень антропогенного воздействия на водосборы озер, что, в свою очередь, наряду с особенностями выпадения стокоформирующих осадков, определяет темпы осадконакопления и их изменения во времени (Hutchinson et al., 2016; Rose et al., 2011). Обычно для горных территорий изменения темпов осадконакопления в большей степени связаны с изменениями антропогенной нагрузки на их водосборы (Ahn, 2018; Ahn et al., 2009) — чем

выше нагрузка, тем интенсивнее происходит осадконакопление.

Ранее в пределах российской части Западного и Центрального Кавказа был изучен ряд кернов, отобранных в озерах Хуко (1744 м над ур. м.) и Каракель (1335 м над ур. м.). Скорость осадконакопления в этих водоемах за последние две тысячи лет была оценена в 0.03 и 0.034 см/год соответственно (Александрин и др., 2019; Grachev et al.,

Таблица 1. Основные характеристики исследованных озер Кавказского хребта

Название	Высота, м над ур. м.	Площадь водного зеркала, м ²	Средняя глубина, м	Происхождение котловины озера	Площадь водосбора, км ²	Средне- годовая сумма осадков, мм	¹³⁷ Cs*, сумм. загр., кБк/м ²	Удельный водосбор	Амплитуда высот внутри водосбора, м	Растительность водосборов
Гарабаши	2880	1200	1.5	Ледниковое	0.065	948	2–10	83.3	140	Альпийская, луговая с фрагментами субнивальных лишайниковых пустошей
Донгуз-Орун	2545	105000	10	Ледниковое	13.3	948	2–10	126	1200	Альпийская, луговая
Хорлакель	2040	437000	6	Ледниковое	0.63	1046	2–10	5.72	60	В верхней части хвойно- широколиственные леса, у озера – субальпийская, высокотравные луга на полянах у верхней гра- ницы леса
Б. Хмелевское	1752	9390	2	Тектоническое	0.96	1607	10–40	102	104	В верхней части широко- лиственные леса верхней границы леса, у озера – субальпийская, высоко- травные луга на лесных полянах верхнегорных лесов
Сухой Лиман	275	40000	1	Тектоническое	2.57	560	2–10	803	280	Широколиственные полидоминантные леса

Примечание. * Приведены данные на 1998 г. С тех пор площадная оценка выпадений ¹³⁷Cs в данном регионе не проводилась.

2021). В этом регионе помимо ^{137}Cs глобального происхождения отмечаются и выпадения Чернобыльского происхождения, местами существенно превышающие глобальные (Izrael, 1998). В итоге совместное использование ^{137}Cs и $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ позволяет построить более точную модель осадконакопления в водоемах Западного и Центрального Кавказа. Регион исследования характеризуется высокой вариабельностью модуля стока взвешенных наносов: от 100–150 т/км²/год в предгорной зоне, расположенной к северу от Главного Кавказского хребта, до 600 т/км²/год в низкогорной зоне Черноморского побережья Кавказа (Golosov and Tsyplov, 2021). Большая часть исследованных озер находится в труднодоступных, слабо подверженных антропогенному влиянию районах. Кроме того, почти все, за исключением оз. Донгуз-Орун, исследованные озера имеют относительно небольшую площадь водосбора, и в этой связи темпы аккумуляции в них более резко реагируют на происходящие изменения на их водосборах.

Целью исследования является оценка скоростей осадконакопления в озерах и их изменений во времени для Центрального и Западного Кавказа, что позволяет судить о темпах денудации на их водосборах. Для этого были проанализированы керны донных отложений, отобранные из 5 озер, расположенных в разных высотных зонах.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследований выбрано 5 озер, расположенных в различных высотных зонах Западного и Центрального Кавказа. Два озера (Гарабаши и Донгуз-Орун) располагаются в высокогорной зоне, два озера (Хорлакель и Б. Хмелевское) находятся в среднегорье и одно озеро (Сухой Лиман) — в предгорно-низкогорной зоне на небольшом удалении от Черного моря. Основные параметры озер представлены в табл. 1, а их местоположение, конфигурация водосборов и самих озер показаны на рис. 1.

Озеро Донгуз-Орун (43°13'24" с.ш.; 42°29'41.26" в.д.) находится на Центральном Кавказе в Приэльбрусье. Оно образовано в результате подпруживания постоянного водотока боковой мореной ледника Донгуз-Орун. Озеро проточное, с двумя впадающими ручьями и вытекающей из него р. Донгуз-Орун. Наличие дельты, площадью 0.15 км², способствует перехвату значительной части наносов, поступающих с водосбора, и только наиболее тонкие фракции поступают в водоем. Согласно данным Каталога ледников СССР (1970), на водосборе озера находятся четыре ледника юго-восточной и северо-восточной экспозиций. Питание оз. Донгуз-Орун смешанное и включает: талые ледниковые воды; сток, формирующийся при таянии снежного покрова и выпа-

дении ливневых осадков. Собственная биопродуктивность озера минимальна из-за низких температур. Вклад органического вещества, смываемого со склонов, в общий объем донных отложений также незначителен. Можно интерпретировать накопленный в озере рыхлый осадок в качестве прямого продукта разрушения коренных пород водосбора ледниковой экзарацией и другими экзогенными процессам. Среднегодовая температура 2.6°C, средняя температура теплого периода — 11.4°C, средняя температура зимнего периода — 6.3°C. Среднегодовая сумма осадков 948 мм с максимумом в июле.

Озеро Гарабаши (43°16'29.29" с.ш.; 42°28'51.06" в.д.) расположено на правом борту долины руч. Гарабаши (приток р. Баксан), верховья которого располагаются на южном склоне горы Эльбрус. В бассейне водосбора озера сохранились морены, сформировавшиеся в период существования приклинкового ледника, в настоящее время уже несуществующего. Озеро имеет перелив — ручей сброса, функционирующий в период его активного питания. В настоящее время озеро регулярно пересыхает в конце лета, что приводит к растрескиванию и, возможно, частичному перемешиванию верхних сантиметров донных отложений. Поверхностный сток на склонах водосбора формируется при таянии снега в мае — начале июня и при выпадении ливней в период с июня по начало сентября. Поверхность склонов водосбора задернована. Мощность рыхлообломного чехла склоновых отложений составляет 10–15 см. Климатические характеристики в районе озера такие же, как и для оз. Донгуз-Орун, так как они располагаются на относительно небольшом удалении друг от друга и в пределах одного диапазона высот.

Озеро Хорлакель (43°29'35" с.ш.; 42°13'06" в.д.) расположено на северном склоне Передового хр. в междуречье рр. Худес и Хурзук на высоте 2040 м над ур. м. Межморенная озерная котловина площадью около 1 км² в центральной части погребена под пологим конусом выноса, разделяющим ее на две части. Современный водосбор озера в основном залесен, а на остальной части залужен, и характеризуется достаточно плотным дерновым покровом. Залуженная часть водосбора используется в качестве пастбища, но нагрузка на него невысокая. Суммарное количество осадков составляет 1046 мм/год, среднегодовая температура воздуха — 4.1°C.

Озеро Большое Хмелевское (43°43'04" с.ш.; 40°12'02.60" в.д.) расположено на вершинной поверхности восточного отрога хр. Ачишко. Оно имеет тектоническое происхождение и является наиболее крупным среди Хмелевских озер. Питается озеро в основном атмосферными осадками, в том числе талыми водами. В озеро не впадают и не вытекают постоянные водотоки. Хорошо выражен-

Таблица 2. Характеристика отобранных кернов из озер Западного и Центрального Кавказа и число проанализированных образцов на содержание радионуклидов (R) и ^{14}C

Название	Год отбора	Мощность исследованной части керна, см	Глубина водоема, с которой проводился отбор керна, м	R	^{14}C
Гарабаши	2018	103	0	16	1
Донгуз-Орун	2014	60	12	41	—
Хорлакель	2017	110	8	26	5
Большое Хмелевское	2012	19	2	19	—
Сухой Лиман	2021	21	0	21	—

ных в рельефе зон аккумуляции на водосборе озера не обнаружено. Около 50% водосбора — крутые склоны, окружающие озеро. Их нижние части заняты травянистыми сообществами, выше растёт густой лиственный лес. Водосбор озера является рекреационной зоной. Среднегодовая температура составляет 7.6°C . Среднегодовая сумма осадков — 1607 мм с максимумом в мае.

Озеро Сухой Лиман ($44^{\circ}45'16''$ с.ш.; $37^{\circ}27'22''$ в.д.) — это небольшой, бессточный водоем, расположенный в горной долине между горами Шахан и Кобыла на расстоянии около 5.5 км от пос. Малый Утриш. Котловина оз. Сухой Лиман сейсмогенного происхождения с плоским дном и относительно пологими склонами. Во время выпадения сильных ливней, паводки, формирующиеся во временных водотоках, приводят к увеличению зеркала озера до 4 га. В межень озеро может почти полностью пересыхать и выделяется в рельефе плоским бурым понижением, заросшим камышом. На водосборе озера преобладают леса (см. табл. 1). Рыхлые отложения имеют довольно мощный слабогумусированный (содержание гумуса в верхнем слое всего 3.6%) профиль с признаками оглеения (чередование сизых и ржавых пятен). Питание озера преимущественно дождевое. Среднегодовая сумма осадков — 560 мм. Среднегодовая температура воздуха 13°C .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб донных осадков на исследуемых озерах проводился в разные годы в период с 2012 по 2021 г. (табл. 2). Два озера (Гарабаши и Сухой Лиман) в момент отбора проб были высохшими, что позволило отбирать пробы в центральной части чаши водоемов. Бурение донных осадков на оз. Сухой Лиман проводилось с использованием бура Качинского (диаметр 3.5 см). Отбор донных наносов на оз. Гарабаши проводилось цилиндрическим отборником с внутренним диаметром 50 мм. Кроме того, рядом с местом отбора керна был выкопан шурф и сделано подробное описание отложений.

На остальных озерах проводилось эхолотирование с составлением карты глубин. Для отбора колонок донных отложений выбиралась наиболее глубокая часть водоема. При отборе керна донных отложений использовался модифицированный поршневой бур ударного типа (Nesje, 1992) с внутренним диаметром пробоотборника 110 мм. Пробоотбор проводился в теплое время года со специально подготовленной платформы, установленной на надувном катамаране.

Послойный отбор проб отложений (рис. 2) на фронтальной части дельты оз. Донгуз-Орун, общая площадь которой составляет 0.15 км^2 , выполнен с помощью пробоотборника с внутренним диаметром 3 см. Точки опробования находились на одинаковой высоте от уреза воды, кроме точки DOD-2, которая находилась на 5 м выше остальных. Нарезка проб на слои мощностью 3 см производилась непосредственно внутри пробоотборника. После этого, в полевых условиях, каждая из проб упаковывалась в отдельные пластиковые пакеты, а пробоотборник очищался с помощью влажных салфеток. Всего было отобрано и проанализировано на содержание радионуклидов 57 образцов. Для последующего проведения аналитических исследований на содержание радионуклидов, производился в лаборатории послойный отбор образцов из центральной части кернов площадью $2.7 \times 2.8\text{ см}$. Керна из озер Гарабаши и Донгуз-Орун были поделены на слои по 0.5 см. Керна из остальных озер нарезались на слои 1 см. Каждый из образцов просушивался при температуре 105°C в течение 8 ч, был перетерт и помещен в емкость с заданной геометрией для дальнейшего проведения гамма-спектрометрического анализа.

Определение содержания гамма-активных радионуклидов осуществлялось при помощи гамма-спектрометра ORTEC GEM-C5060P4-B с применением полупроводникового детектора из сверхчистого германия (HPGe) с бериллиевым окном, и относительной эффективностью 20%. Исследовалось содержание в образцах следующего набора радионуклидов естественного и техногенного происхождения: ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{210}Pb и

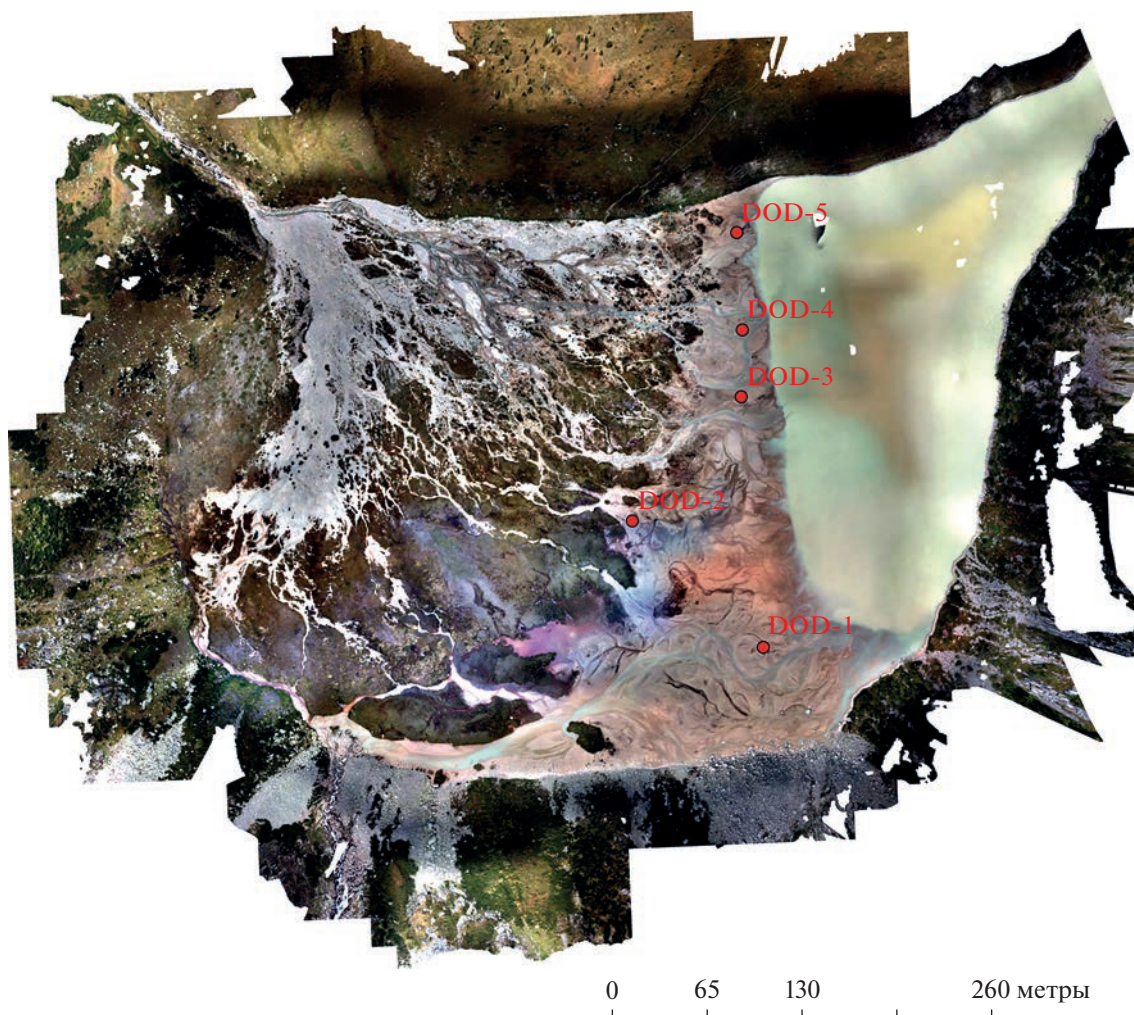


Рис. 2. Дельта оз. Донгуз-Орун и места отбора проб (DOD-1).

^{241}Am . Удельная активность ^{226}Ra оценивалась по двум линиям, одной принадлежащей самому радию (186 keV), и другой — его дочернему ^{214}Bi (609 keV). Массы образцов составили от 1.2 до 12 грамм. Время измерения было не менее 60000 с. Систематические неопределенности включали в себя: погрешность пробоотбора — 3%, погрешность пробоподготовки — 2%, погрешность средств измерения — 2% и в сумме не превышали 8%.

Для определения возраста донных отложений на основе содержания $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ использовалась модель постоянного потока (Abril, 2022; Corbett and Walsh, 2015):

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A(\infty)}{A(x)},$$

где: t — возраст осадка, лет; $A(\infty)$ — активность поверхностного горизонта, рассчитанная исходя из сглаженной функции распределения запасов по

глубине; Бк/м^2 , $A(x)$ — удельная активность горизонта; Бк/м^2 , λ — постоянная радиоактивного распада ^{210}Pb .

Для выполнения расчетов с помощью данной модели должно соблюдаться условие постоянства потока через раздел фаз вода–осадок. Поэтому модель справедливо применять для непересыхающих озер. Для озер Гарабаши и Сухой Лиман датировка проводилась только на основе анализа эпюры вертикального распределения ^{137}Cs в толще донных наносов.

Для определения возраста отдельных слоев донных отложений с помощью техногенного ^{137}Cs на эпюре его вертикального распределения были выделены пики, нижний из которых, при его наличии, соответствует максимуму глобальных выпадений в 1963 г. (основные испытания ядерного оружия в Северном полушарии), а верхний соответствует поверхности донных отложений в 1986 г. (авария на Чернобыльской АЭС) (Golosov et al., 2018).

Из кернов донных наносов озер Хорлакель и Гарабаши были отобраны образцы органического вещества для определения возраста радиоуглеродным методом. Датирование осадка радиоуглеродным методом было проведено с помощью ускорительной масс-спектрометрии (AMS) в Университете Джорджии (США), пробоподготовка и графитизация осуществлялась в Лаборатории радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии Института географии РАН. Для построения возрастной модели была использована калибровочная кривая IntCal13 (Reimer et al., 2013).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Важным отличием оз. Донгуз-Орун от остальных исследованных озер является относительно большая площадь водосбора с наличием двух постоянных водотоков, питающихся от ледников и наличие крупной дельты, перехватывающей значительную часть, транспортируемых водотоками наносов. В итоге на современных скоростях накопления в озере не сказывается периодическое формирование экстремальных паводков, так как основной объем наносов, транспортируемых ими, перекладывается в дельте. КERN, отобранный в оз. Донгуз-Орун, представлен бежево-коричневым пылеватым суглинком с редкими линзами песка и имеет ярко выраженную слоистость. Слоистость регулярная по всей длине керна со средней мощностью отдельных слоев около 1.5 мм. В оз. Донгуз-Орун скорость аккумуляции наносов была определена ранее на основе анализа эпюр вертикального распределения ^{137}Cs . Было выявлено ее постепенное нарастание от в среднем 0.2 см/год в период 1963–1986 и до 0.32 см/год в период с 1986 по 2014 г. (Kuzmenkova et al., 2020). Во внутрипрофильном распределении ^{137}Cs четко выделяются 2 пика: глобальных (1.2 кБк/м^2) и чернобыльских (2.8 кБк/м^2) выпадений, которые совпадают с расчетом осадконакопления на основе модели постоянного потока (рис. 3).

Результаты исследования содержания ^{137}Cs в отложениях фронтальной части дельты указывают на неравномерное поступление наносов по ее площади (рис. 4). В поверхностном горизонте (0–10 см) обнаружено примерно одинаковые запасы ^{137}Cs ($0.09\text{--}0.21 \text{ кБк/м}^2$). В южной и центральной частях дельты аккумуляция наносов идет постоянно, и можно предположить, что за пост-Чернобыльский период темпы аккумуляции здесь превышают 1 см/год. Поступление наносов в северную часть дельты происходит менее регулярно и с перерывами. Выделяются четкие пики ^{137}Cs в точках 4 и 5, которые можно связать с Чернобыльскими выпадениями. В этом случае скорости отложения наносов здесь составляют — 0.5 см/год

(точка 4) и 1 см/год (точка 5). Высокие запасы $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (свыше 3 кБк/м^2) в отдельных горизонтах указывают на перерывы в осадконакоплении. Пробы в дельте отбирались в ее фронтальной части, так как здесь состав отложений, преимущественно, суглинистый. По мере удаления от озера постоянно нарастает доля грубообломочного материала. Таким образом, дельта перехватывает значительный объем наносов.

Вертикальное распределение ^{137}Cs и $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ в донных отложениях оз. Гарабаши однозначно указывает на практически полное отсутствие поступления наносов с площади водосбора за последние как минимум 60–70 лет (рис. 5). Верхняя часть отложений оз. Гарабаши 0–21 см представляет собой серые средние суглинистые однородные плотные отложения, предположительно турбидит. Отсутствие какой-либо слоистости в верхнем 20-см слое донных отложений и его достаточно однородный состав позволяет предположить, что данная толща сформирована за счет смещения переувлажненного и разжиженного грунта. Таким образом, весь временной интервал, когда поверхность водосбора озера была задернована, характеризуется очень низким поверхностным смывом. Момент стекания переувлажненного рыхлого грунта, сформировавшего верхнюю 20 см пачку донных отложений, определить достаточно сложно, но более вероятно, что это произошло еще до формирования устойчивого травянистого покрова на водосборе.

Начиная с глубины 21 см и до 64.5 см донные отложения озера имеют слоистый характер, различную дисперсность и окраску. Данная толща формировалась за счет ручейкового и плоскостного смыва на склоновом водосборе озера в период с момента начала активного таяния ледника, конечная морена которого и привела к формированию плотины водоема. Продукты смыва постепенно оттаивались в водоеме, что в связи с их разной крупностью привело к образованию охристых прослоев и ленточных глин с регулярным чередованием. На глубине 64.5–75 см имеется горизонт оторфованного песка, радиоуглеродный возраст которого составляет $1505 \pm 20 \text{ BP}$ ($\text{IGAN}_{\text{AMS}} 6847$). Таким образом, суммарная аккумуляция за последние 15 столетий составила порядка 70–75 см, или 0.05 см/год. Можно предположить, что темпы аккумуляции постепенно затухали по мере таяния ледника и последовавшего за этим освоения склонов травянистой растительностью. На глубине 75–103 см супеси перемешаны с щебнем и линзами крупного песка, ниже которых расположен крупный валунно-щебнистый горизонт. Вероятно, что этот материал был доставлен при фронтальном движении склонового ледника. Он был промыт в период начала активного таяния лед-

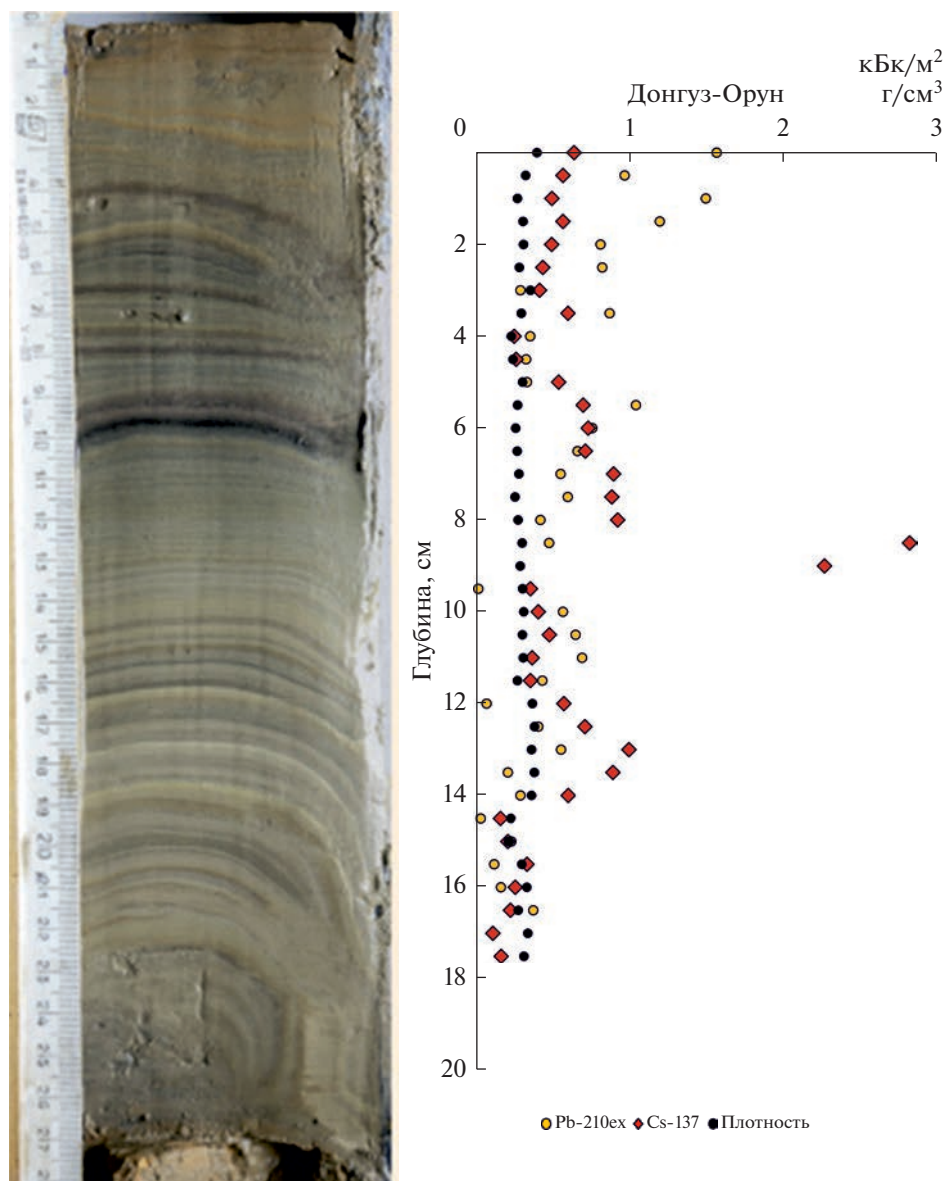


Рис. 3. Вертикальное распределение ^{137}Cs (кБк/м²), $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (кБк/м²) и плотность осадков (г/см³) оз. Донгуз-Орун (фото керна).

ника, при котором часть воды вытекала из формирующегося водоема при его переполнении.

Суммарные запасы ^{137}Cs в донных отложениях озера составляют 1.37 кБк/м², что соответствует его среднему содержанию в глобальных выпадениях на территориях, не подвергшихся влиянию Чернобыльской АЭС (Израэль, 2009). Это также является косвенным подтверждением того, что за последние 60–70 лет поступление наносов с водосбора было ничтожно малым.

Донные отложения озер Большое Хмелевское и Хорлакель представлены темно-серым сапропелем со значительной долей слабо разложившихся растительных остатков. Более чем метро-

вый слой донных отложений оз. Хорлакель представляет собой сапропель, насыщенный влагой (95%) с небольшим количеством минерального вещества и очень низкой плотностью. Результаты радиоуглеродного датирования и вертикальные распределения ^{137}Cs и $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ по глубине свидетельствуют о том, что из-за очень низкой плотности верхний слой донных отложений был утерян при отборе (рис. 6). Учитывая очень низкую плотность отложений всей толщи, составившей порядка 0.12 г/см³ (см. рис. 6), можно утверждать, что как минимум за последние 1800 лет с водосбора в озеро поступало ничтожно малое количество наносов. При этом относительная равномерность

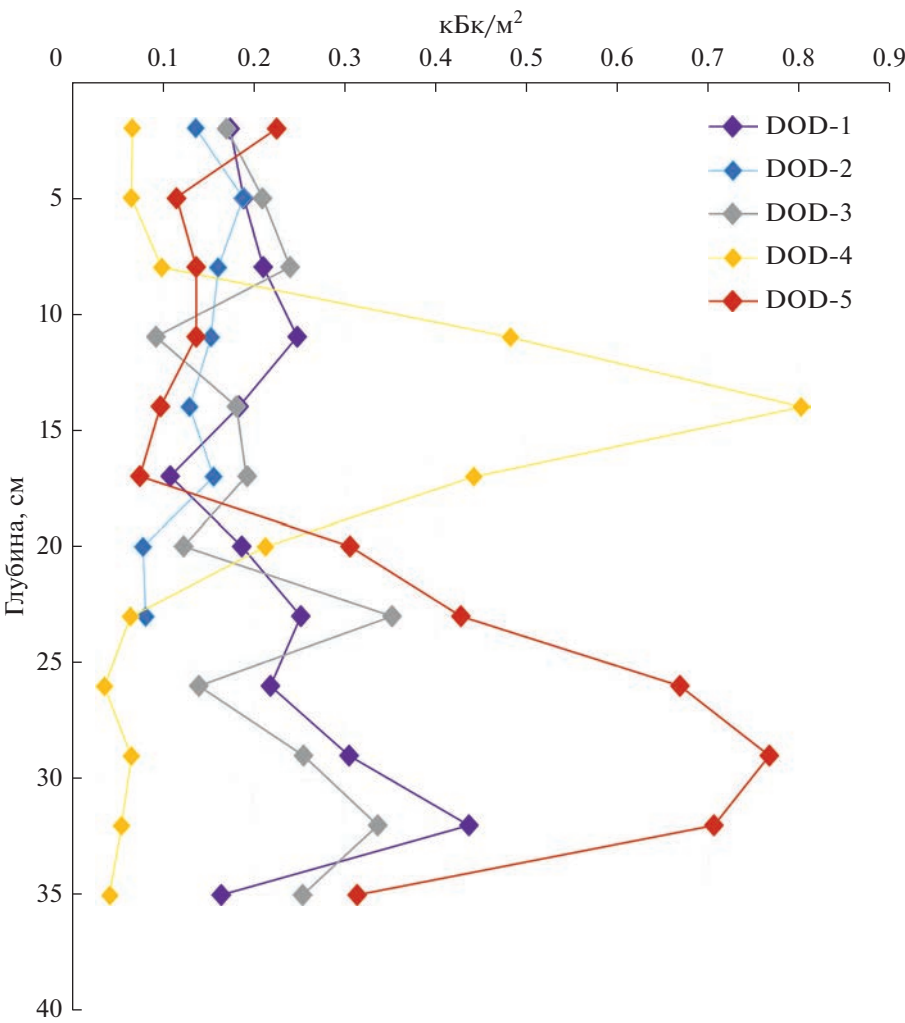


Рис. 4. Вертикальное распределение ¹³⁷Cs (кБк/м²) в пойменных отложениях оз. Донгуз-Орун.

накопления сапропеля в озере за этот временной интервал, судя по датировкам (табл. 3), позволяет предположить, что даже температурный режим озера сохранялся неизменным, что косвенно свидетельствует об относительно неизменных условиях формирования стока на водосборе. КERN представляет собой слабо уплотненные органические остатки разной степени разложенности, поэтому мы видим результат активной вертикальной миграции радионуклидов, а осадконакопление обусловлено в основном накоплением органического вещества озерного происхождения.

В случае с оз. Большое Хмелевское, проанализированная верхняя пачка донных наносов также представлена слабо уплотненным сапропелем. Но в данном случае при отборе керн не было потерь донных отложений. Максимумы ¹³⁷Cs и ²¹⁰Pb_{ex} расположены в поверхностном слое, что указывает на крайне низкие темпы накопления органического вещества в последние 30 лет. Пик

¹³⁷Cs на глубине 3.5–4.5 см можно интерпретировать как максимум глобальных выпадений. Это предположение косвенно подтверждается характером эпюры вертикального распределения ²¹⁰Pb_{ex} (рис. 7). В любом случае скорости накопле-

Таблица 3. Результаты радиоуглеродного датирования донных отложений озер Гарабаши и Хорлакель

Ключевой объект	Материал	Горизонт	¹⁴ C, ВР (1σ)
Гарабаши	Оторфованный песок	64.5–75	1505 ± 20
Хорлакель	Сапропель	1–2 см	560 ± 30
Хорлакель	Сапропель	30–31	560 ± 30
Хорлакель	Сапропель	60–61	1160 ± 30
Хорлакель	Сапропель	90–91	1510 ± 30
Хорлакель	Сапропель	117–118	1890 ± 20

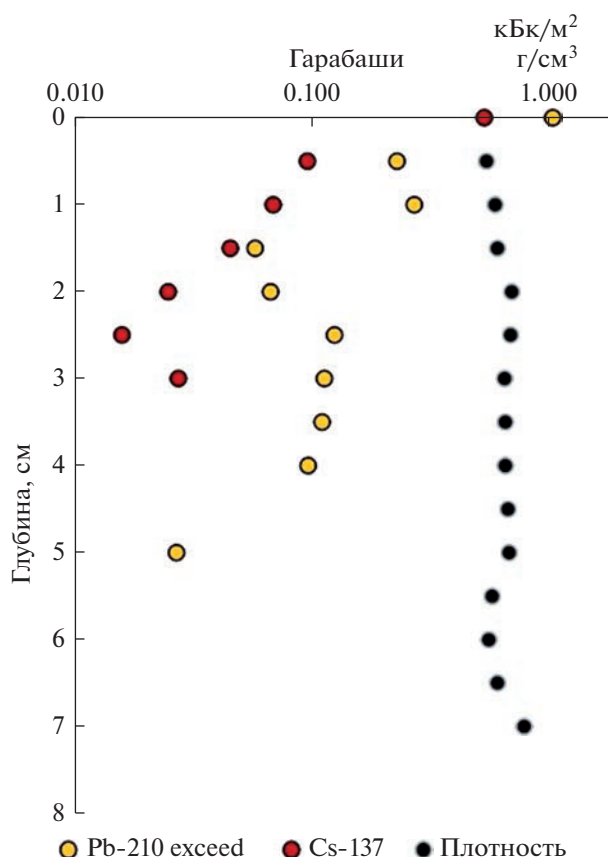


Рис. 5. Вертикальное распределение ^{137}Cs (кБк/м²), $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (кБк/м²) и плотность осадков (г/см³) оз. Гарабаши (фото верхних 12 см керна).

ния органического вещества на оз. Большое Хмелевское даже ниже, чем на оз. Хорлакель, что вероятно обусловлено меньшей освещенностью данного водоема, который располагается в узкой котловине, а поступление минерального вещества с площади его водосбора ничтожно мало. Результаты расчета скорости роста осадка на основе вертикального распределения $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ с помощью модели постоянного потока определили ее на уровне 0.05–0.07 см/год за последние 120 лет.

Для оз. Сухой Лиман эпоры вертикального распределения ^{137}Cs и $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ показывают, что наносы поступали в озеро относительно равномерно в последнее столетие (рис. 8). По своему механическому составу донные отложения представлены суглинком, с увеличением от легкого к тяжелому сверху вниз по толще, однородного коричневого цвета, встречаются песчаные включения, а также корни растений. С учетом очень низких запасов ^{137}Cs мы предполагаем, что весь обнаруженный цезий — результат глобальных

выпаждений. Таким образом, при учете достоверной фиксации $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ до глубины 20 см можно предположить, что для данного керна мы можем оценить скорость осадконакопления за период 120–150 лет в 0.1–0.16 см/год.

ОБСУЖДЕНИЕ

Выявленные скорости аккумуляции наносов и органического вещества отражают особенности развития процессов денудации на склонах водосборов и тепловой режим водоемов в части развития в нем водной растительности. Для бассейна оз. Донгуз-Орун влияние повышенного стока воды и наносов за счет наличия двух постоянных водотоков и больших размеров водосбора по сравнению с другими озерами (см. табл. 1) сглаживается присутствием обширной дельты, в которой происходит рассредоточение стока и перетолжение всех донных и значительной части взвешенных наносов, выносимых с водосборов двух ручьев. Скорости аккумуляции в оз. Донгуз-

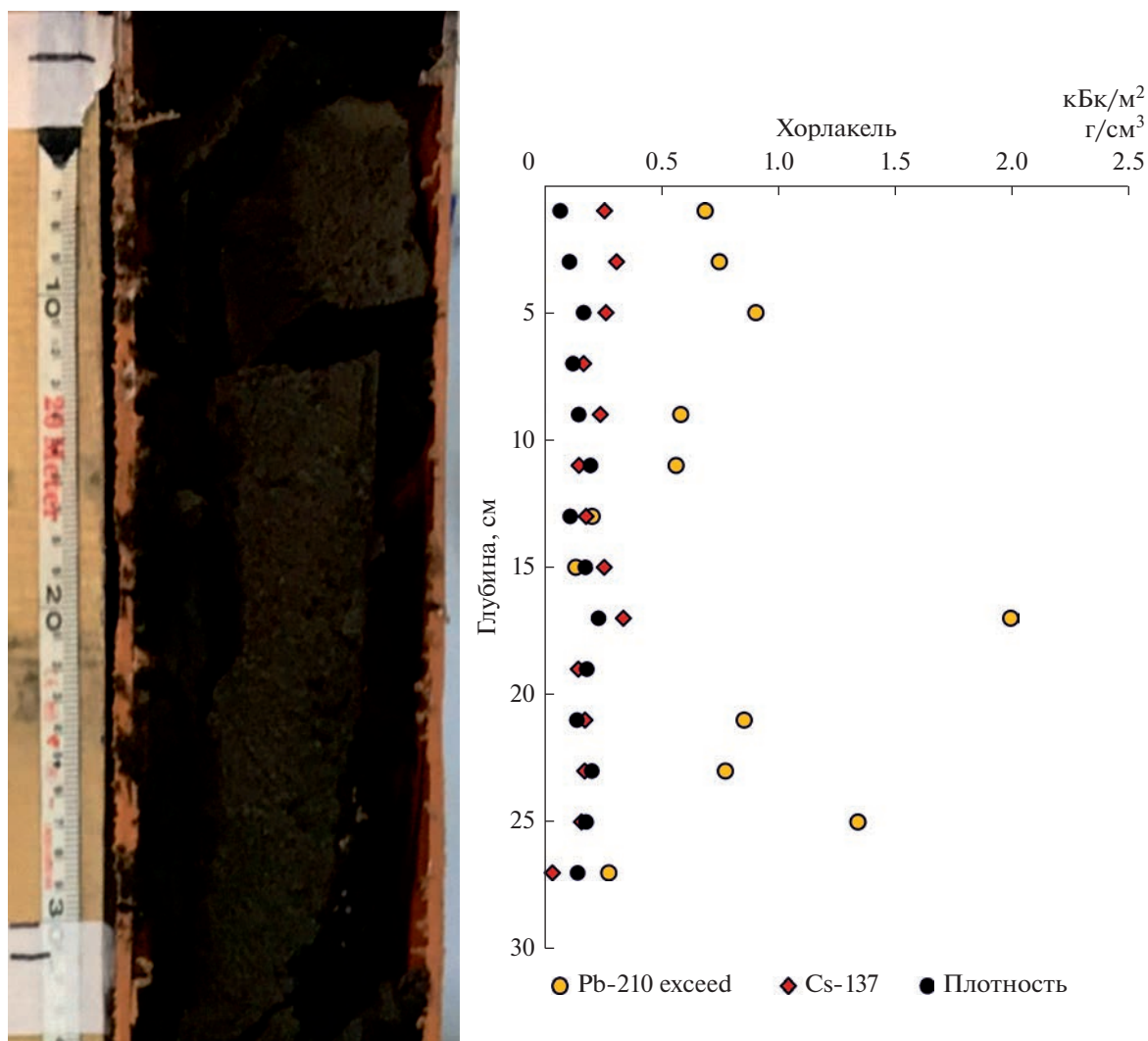


Рис. 6. Вертикальное распределение ^{137}Cs (kBq/m²), $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (kBq/m²) и плотность горизонтов (г/см³) в донных отложениях озера Хорлакель (фото керна).

Орун выросли практически в полтора раза за период с 1986 г., но вероятнее всего основной прирост произошел со второй половины 1990-х, так как именно в этот период резко ускорилось таяние ледников Эльбруса после периода относительного замедления таяния, который продолжался с начала 1970-х (Михаленко, 2020). Этот тренд характерен и для приледниковых озер в других частях европейского континента (Xu et al., 2015). Однако установленные темпы аккумуляции в оз. Донгуз-Орун практически на порядок ниже, чем на большинстве озер такого типа. Это связано с тем, что основной объем наносов, формирующихся на водосборе озера, перекладывается в пределах дельты. Площадь дельты в 2.5 раза превышает площадь зеркала озера, и при этом скорости аккумуляции даже во фронтальной части дельты как минимум в 2–3 раза выше, чем в самом озере (рис. 3–4). Из-за преобладания грубообломочного материала на большей части

дельты невозможно достоверно датировать отложения. Но, как минимум, исходя из особенностей формирования дельт, они не ниже, чем в ее фронтальной части. С учетом аккумуляции наносов в дельте современные темпы денудации в пределах водосбора оз. Донгуз-Орун можно оценить в 1.2–1.5 мм/год, что сопоставимо с темпами современной денудации высокогорной зоны Альп (Hinderer et al., 2013; Otto et al., 2009; Schlunegger and Hinderer, 2003). Оценки современных темпов денудации на водосборе оз. Донгуз-Орун также сопоставимы с темпами денудации водосбора р. Джанкуат, полученными на основе измерений расходов воды и наносов (Golosov and Tsyplenkov, 2021). Данный приледниковый водосбор располагается в Центральном Кавказе на удалении в несколько десятков километров от оз. Донгуз-Орун.

Скорости аккумуляции на водосборе оз. Гарабаши отражают этапы изменения денудации типичного высокогорного склона с момента начала

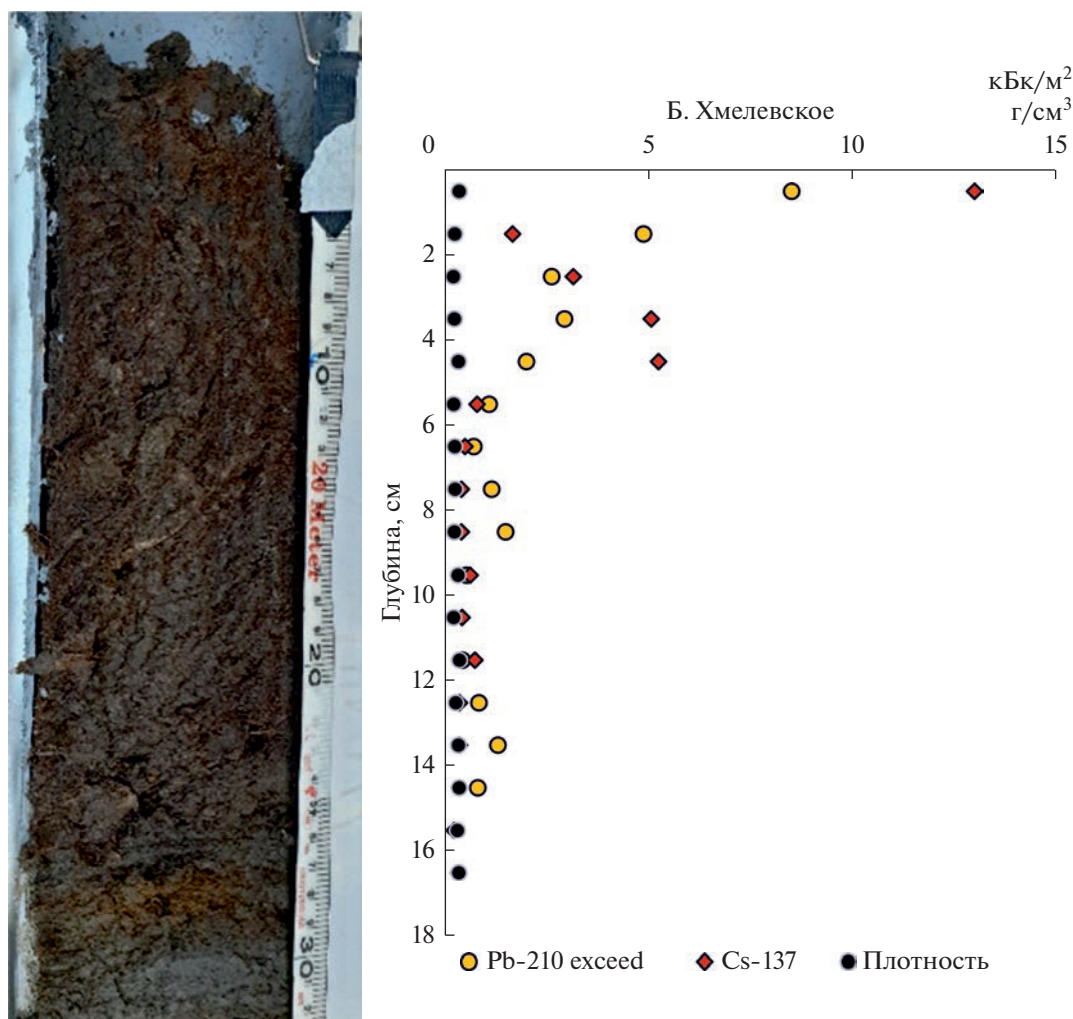


Рис. 7. Вертикальное распределение ^{137}Cs (кБк/м²), $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (кБк/м²), плотность осадков (г/см³) оз. Большое Хмелевское (фото керна).

таяния ледника, фронтальная морена которого послужила плотиной образовавшегося в период отступления ледника водоема. Учитывая небольшие размеры склонового водосбора водоема (см. табл. 1, рис. 1а) в период между его образованием и началом формирования дернового покрова на водосборе после того, как ледник полностью растаял, коэффициент доставки наносов в водоем был порядка 0.8–0.9, что характерно для небольших водосборов водоемов прогляциальной зоны (Carrivick and Tweed, 2013; Xu et al., 2015). Учитывая, что в целом площадь ледников Центрального Кавказа за период с конца XIX в. к настоящему времени сократилась практически наполовину (Котляков и др., 2015), а также ничтожно малое поступление наносов в оз. Гарабаши в последние как минимум 70 лет, максимально период с отсутствием проективного покрытия травянистой растительностью на водосборе можно оценить в 1350 лет. Следует также учитывать, что на освое-

ние травянистой растительностью освободившихся от ледника частей водосбора в зависимости от температурного режима уходит от 50 до 200 лет (Klaar et al., 2015). В итоге минимальные темпы денудации на водосборе оз. Гарабаши за период от начала активного таяния ледника и до формирования травянистого покрова составляют 0.01 мм/год. Однако очевидно, что часть наносов, поступавших со склонов в водоем вместе со стоком при экстремальных событиях, в связи с переполнением водоема могли транспортироваться в р. Гарабаши. Но в любом случае скорости осадконакопления в период до образования травянистого покрова на водосборе оз. Гарабаши сопоставимы со скоростями аккумуляции в приледниковых озерах (Hasholt et al., 2000). После формирования устойчивого травянистого покрова на водосборе темпы денудации сократились как минимум на порядок.

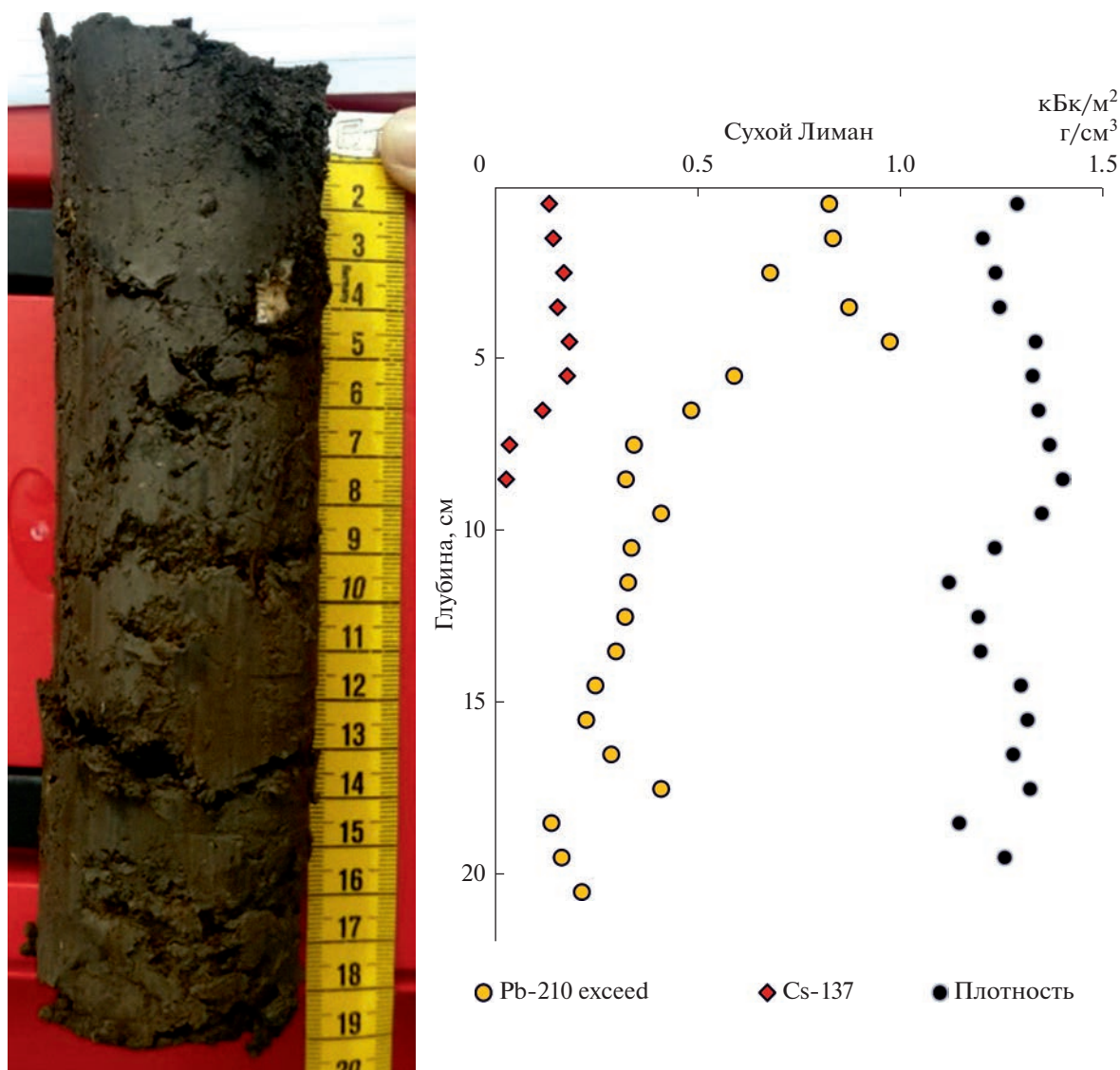


Рис. 8. Вертикальное распределение ^{137}Cs (кБк/м²), $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (кБк/м²) и плотность осадков (г/см³) оз. Сухой Лиман (фото керна).

Скорости аккумуляции наносов в озерах Хорламель и Хмелевское очень невысокие и сопоставимы со скоростями аккумуляции в озерах аналогичных размеров и типа в Британской Колумбии (Owens and Slaymaker, 1992) и Европе (Rose et al., 2011). Однако, в отличие от большинства небольших горных озер Европы, где наблюдается отчетливый тренд прироста темпов аккумуляции донных отложений в последние столетия, исследованные горные озера Кавказа характеризуются стабильно низкими в течение последних 2–3 тысячелетий скоростями осадконакопления в основном за счет органического вещества. Небольшой рост темпов осадконакопления в оз. Б. Хмелевское с середины 1960-х годов с 0.002 мм/год в предшествующие 50 лет до 0.004 мм/год в период общего потепления климата можно связать с не-

которым увеличением накопления органического вещества, а также за счет вовлечения этой территории в рекреационное использование. Несомненно, низким темпам денудации (<0.0001 мм/год) помимо высокого проективного покрытия склонов травянистой растительностью, способствуют небольшие размеры водосборов (см. табл. 1) и отсутствие линейных эрозионных форм в их пределах, где бы мог концентрироваться сток. Ранее было показано, что скорости аккумуляции в малых горных озерах растут по мере роста площади водосбора (Owens and Slaymaker, 1992).

Скорости осадконакопления в оз. Сухой Лиман, расположенном в низкорослой части Западного Кавказа, умеренные (0.1–0.16 см/год) по сравнению с озерами среднегорной зоны. Это

обусловлено двумя факторами, а именно: а) высокой неравномерностью выпадения осадков при их довольно небольшим по сравнению с водосборами других озер слое (см. табл. 1); б) наличием антропогенной нагрузки на водосбор. С 1955 по 1978 г. в непосредственной близости от оз. Сухой Лиман был размещен лесопункт, в радиусе 2 км активно велась рубка леса. Оба этих фактора способствуют нарушению проективного покрытия склонов водосбора травянистой растительностью. Кроме того, для данного региона, находящегося на небольшом удалении от Черного моря, характерно выпадение экстремальных осадков. Это приводит к периодическому формированию интенсивного поверхностного стока и смыва. Однако, учитывая размеры водосбора, средний слой денудации за 70-летний период оценивается всего в 0.0003 мм/год, что существенно ниже, чем наблюдается в горных прибрежных территориях с аналогичным сухим средиземноморским климатом (García-Ruiz et al., 2013). Основная причина подобных различий кроется в меньшей антропогенной нарушенности водосбора оз. Сухой Лиман по сравнению водосборами озер сухих субтропиков Средиземноморья, и, вероятно, связана с переотложением значительной части наносов, вовлеченных в смыв на локально нарушенных участках по пути их транспортировки в водоем. Также, большое значение имеют морфологические особенности водосбора, связанные с положением озера в рельефе. В котловину Сухого Лимана открывается целая серия сухих долин с крутыми бортами.

ВЫВОДЫ

Динамика осадконакопления и некоторые ее особенности в позднем голоцене определены для 5 озер Западного и Центрального Кавказа. Закономерно наибольшие скорости осадконакопления (0.2–0.32 см/год) с отчетливым трендом роста в 1.5 раза в период с 1986–2014 гг. по сравнению с периодом 1963–1986 гг. выявлены для высокогорного оз. Донгуз-Орун, имеющего наибольший по площади водосбор среди исследованных озер и преимущественно ледниковое питание. Водосборы остальных исследованных озер небольшие по размеру. Скорости осадконакопления в них, по сути, отражают современные темпы денудации на склонах их водосборов. Общей закономерностью для водосборов всех озер, несмотря на их расположение в большом диапазоне высот (275–2880 м), является относительно высокое проективное покрытие поверхности склонов травянистой растительностью, предохраняющей почву от размыва, и низкая антропогенная нагрузка. Темпы современной денудации водосборов озер оцениваются в интервале от 0.0001–0.0003 мм/год. Наиболее высокие темпы (0.0004 мм/год) уста-

новлены для водосбора низкогорного оз. Сухой Лиман, в пределах которого имеются участки локальных антропогенных нарушений (вырубка леса). Для водосборов озер среднегорной зоны (Хорлакель и Б. Хмелевское) выявлены минимальные темпы денудации, в целом, равномерные за период как минимум в течении последних 1800 лет. Водосбор высокогорного оз. Гарабаши расположен в приледниковой зоне и, судя по датировкам, примерно 1600 лет назад был занят склоновым ледником, фронтальная морена которого и является в настоящее время плотиной сезонно пересыхающего озера. В период таяния небольшого склонового ледника, продолжавшегося порядка 1200–1300 лет, и до момента освоения водосбора травянистой растительностью темпы денудации составляли как минимум 0.01 мм/год, тогда как в настоящее время они соответствуют темпам, рассчитанным для водосборов озер среднегорной зоны. Установленные скорости осадконакопления в озерах и полученные по ним оценки темпов денудации на их водосборах в целом соответствуют опубликованным данным по скоростям осадконакопления в озерах аналогичного типа, расположенных в Альпах и других горных странах. Некоторым исключением является оз. Сухой Лиман, находящееся в прибрежной низкогорной зоне. На водосборе данного озера темпы денудации существенно ниже, чем на водосборах аналогичных озер Средиземноморья, что объясняется гораздо меньшим антропогенным воздействием по сравнению с территориями низкогорий средиземноморского пояса.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Раздел данной работы по методам подготовлен в рамках госзадания № 0148-2019-0005 (AAAA-A19-119021990091-4). Работа над остальным текстом велась при финансовой поддержке РФФ, проект № 19-17-00181 “Количественная оценка бассейновой составляющей стока наносов и ее изменений в голоцене на реках Кавказа”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность член.-корр. РАН О.Н. Соломиной, к. г. н. П.А. Торопову, к. г. н. И.А. Корневой, а также к.г.н. М.М. Иванову за консультации во время работы над текстом.

FUNDING

The section of this work on methods was prepared within the state order no. 0148-2019-0005 (AAAA-A19-119021990091-4). Work on the rest of the text was carried out with the support of the Russian Science Foundation, project no. 19-17-00181p “Quantitative assessment of the

basin component of sediment runoff and its changes in the Holocene of the Caucasus rivers.”

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to O.N. Solomina, P.A. Toropov, I. Korneva, and M. Ivanov for consultations while working on the text.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрин М.Ю., Дарьин А.В., Грачев А.М., Соломина О.Н. Динамика региональных климатических условий за последние 2000 лет по данным литолого-геохимических исследований донных осадков озера Каракель (Западный Кавказ) // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 1. С. 73–85.
https://doi.org/10.31857/S2587-55662019173-85
- Израэль Ю.А. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси / под ред. Ю.А. Израэля, И.М. Богдевича. Минск: Белкартография, 2009. 140 с.
- Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Попова В.В., Чернова Л.П., Муравьев А.А., Ротомеева О.В., Никитин С.А., Зверкова Н.М. Современные изменения ледников горных районов России. М.: КМК, 2015. 288 с.
- Михаленко В.Н. Ледники и климат Эльбруса. М.—СПб.: Нестор-История, 2020. 372 с.
- Abril J.M. On the use of ^{210}Pb -based records of sedimentation rates and activity concentrations for tracking past environmental changes // J. Environ. Radioact. 2022. Vol. 244–245. 106823.
https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106823
- Ahn Y.S. Recent Changes in Sedimentation Rate in Three Lakes of Ishikari Wetland, Northern Japan Determined by ^{210}Pb Dating // Wat. Res. 2018. Vol. 45. P. 795–802.
https://doi.org/10.1134/S009780781805024X
- Ahn Y.S., Nakamura F., Kizuka T., Nakamura Y. Elevated sedimentation in lake records linked to agricultural activities in the Ishikari River floodplain, northern Japan // Earth Surf. Process. Landf. 2009. Vol. 34. P. 1650–1660.
https://doi.org/10.1002/esp.1854
- Appleby P.G., Oldfield F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment // CATENA. 1978. Vol. 5. P. 1–8.
https://doi.org/10.1016/S0341-8162(78)80002-2
- Carrivick J.L., Tweed F.S. Proglacial lakes: character, behaviour and geological importance // Quat. Sci. Rev. 2013. Vol. 78. P. 34–52.
https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.07.028
- Corbett D.R., Vance D., Letrick E., Mallinson D., Culver S. Decadal-scale sediment dynamics and environmental change in the Albemarle Estuarine System, North Carolina // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2007. Vol. 71. № 3–4. P. 717–729.
https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.09.024
- Corbett D.R., Walsh J.P. ^{210}Pb and ^{137}Cs : establishing a chronology for the last century / I. Shennan, A.J. Long, B.P. Horton (Eds.). Handbook of Sea-Level Research. UK, Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 2015. P. 361–372.
https://doi.org/10.1002/9781118452547.ch24
- Doering C., Akber R., Heijnis H. Vertical distributions of ^{210}Pb excess, ^7Be and ^{137}Cs in selected grass covered soils in Southeast Queensland, Australia // J. Environ. Radioact. 2006. Vol. 87. P. 135–147.
https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.11.005
- Gao J., Long Y., Zhang X., Collins A.L., He X., Zhang Y., Shi Z. Interpreting sedimentation dynamics at Longxi catchment in the Three Gorges Area, China, using Cs-137 activity, particle size and rainfall erosivity // J. Mt. Sci. 2016. Vol. 13. P. 857–869.
https://doi.org/10.1007/s11629-015-3637-0
- García-Ruiz J.M., Nadal-Romero E., Lana-Renault N., Beguería S. Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges // Geomorphol. 2013. Vol. 198. P. 20–36.
https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.023
- Golosov V., Tsyplenkov A. Factors Controlling Contemporary Suspended Sediment Yield in the Caucasus Region // Water. 2021. Vol. 13 (22). 3173.
https://doi.org/10.3390/w13223173
- Grachev A.M., Novenko E.Y., Grabenko E.A., Alexandrin M.Y., Zazovskaya E.P., Konstantinov E.A., Shishkov V.A., Lazukova L.I., Chepurayeva A.A., Kuderina T.M., Ivanov M.M., Kuzmenkova N.V., Darin A.V., Solomina O.N. The Holocene paleoenvironmental history of Western Caucasus (Russia) reconstructed by multi-proxy analysis of the continuous sediment sequence from Lake Khuko // Holocene. 2021. Vol. 31. P. 368–379.
https://doi.org/10.1177/0959683620972782
- Hasholt B., Walling D.E., Owens P.N. Sedimentation in arctic proglacial lakes: Mittivakkat Glacier, south-east Greenland // Hydrol. Process. 2000. Vol. 14. P. 679–699.
https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(200003)14:4<679::AID-HYP966>3.0.CO;2-E
- Hinderer M., Kastowski M., Kamelger A., Bartolini C., Schlunegger F. River loads and modern denudation of the Alps – A review // Earth-Sci. Rev. 2013. Vol. 118. P. 11–44.
https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.01.001
- Hutchinson S.M., Akinyemi F.O., Mindrescu M., Begy R., Feurdean A. Recent sediment accumulation rates in contrasting lakes in the Carpathians (Romania): impacts of shifts in socio-economic regime // Reg. Environ. Change. 2016. Vol. 16. P. 501–513.
https://doi.org/10.1007/s10113-015-0764-7
- Izrael Y.A. The atlas of caesium-137 contamination of Europe after the Chernobyl accident / A. Karaoglou, G. Desmet, G.N. Kelly, H.G. Menzel (Eds.). The radiological consequences of the Chernobyl accident. Brussels: European Commission, EUR 16544 EN., 1996. P. 1–10.
- Klaar M.J., Kidd C., Malone E., Bartlett R., Pinay G., Chapin F.S., Milner A. Vegetation succession in deglaciated landscapes: implications for sediment and landscape stability // Earth Surf. Process. Landf. 2015. Vol. 40. P. 1088–1100.
https://doi.org/10.1002/esp.3691
- Kuzmenkova N.V., Ivanov M.M., Alexandrin M.Y., Grachev A.M., Rozhkova A.K., Zhizhin K.D.,

- Grabenko E.A., Golosov V.N. Use of natural and artificial radionuclides to determine the sedimentation rates in two North Caucasus lakes // *Environ. Pollut.* 2020. Vol. 262. 114269.
https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114269
- Luque J.A., Julià R. Lake sediment response to land-use and climate change during the last 1000 years in the oligotrophic Lake Sanabria (northwest of Iberian Peninsula) // *Sediment. Geol.*, 2002. Vol. 148. P. 343–355.
https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00225-1
- Nesje A. A Piston Corer for Lacustrine and Marine Sediments // *Arct. Alp. Res.* 1992. Vol. 24. P. 257–259.
https://doi.org/10.1080/00040851.1992.12002956
- Otto J.-C., Schrott L., Jaboyedoff M., Dikau R. Quantifying sediment storage in a high alpine valley (Turtmanntal, Switzerland) // *Earth Surf. Process. Landf.* 2009. Vol. 34. P. 1726–1742.
https://doi.org/10.1002/esp.1856
- Owens P., Slaymaker O. Late Holocene sediment yields in small alpine and subalpine drainage basins, British Columbia / D.E. Walling, T.R. Davies, B. Hasholt (Eds). *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions*. IAHS Publication 209. IAHS: Wallingford, 1992. P. 147–154.
- Putyrskaya V., Klemt E., Röllin S., Corcho-Alvarado J.A., Sahli H. Dating of recent sediments from Lago Maggiore and Lago di Lugano (Switzerland/Italy) using ^{137}Cs and ^{210}Pb // *J. Environ. Radioact.* 2020. Vol. 212. 106135.
https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106135
- Rose N.L., Morley D., Appleby P.G., Battarbee R.W., Alliksaar T., Guilizzoni P., Jeppesen E., Korhola A., Punning J.-M. Sediment accumulation rates in European lakes since AD 1850: trends, reference conditions and exceedance // *J. Paleolimnol.* 2011. Vol. 45. P. 447–468.
https://doi.org/10.1007/s10933-010-9424-6
- Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck W.J., Blackwell P.G., Ramsey C.B., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hafflidason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser F.K., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott M.E., Southon J.R., Staff R.A., Turney C., van der Plicht J. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50e000 Years cal BP // *Radiocarb.* 2013. Vol. 55. №. 4. P. 1869–1887.
https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947
- Schlunegger F., Hinderer M. Pleistocene/Holocene climate change, re-establishment of fluvial drainage network and increase in relief in the Swiss Alps // *Terra Nova*. 2003. Vol. 15. P. 88–95.
https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2003.00469.x
- Semertizidou P., Piliposian G.T., Chiverrell R.C., Appleby P.G. Long-term stability of records of fallout radionuclides in the sediments of Brotherswater, Cumbria (UK) // *J. Paleolimnol.* 2019. Vol. 61. P. 231–249.
https://doi.org/10.1007/s10933-018-0055-7
- Su C.-C., Huh C.-A. ^{210}Pb , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ in East China Sea sediments: sources, pathways and budgets of sediments and radionuclides // *Mar. Geol.* 2002. Vol. 183. P. 163–178.
https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00165-2
- Wang F., Wang H., Li J., Pei Y., Fan C., Tian L., Shang Z., Song M., Geng Y. ^{210}Pb and ^{137}Cs measurements in the Circum Bohai Sea coastal region: sedimentation rates and implications // *Front. Earth Sci. China*. 2008. Vol. 2. P. 276–282.
https://doi.org/10.1007/s11707-008-0046-5
- Xu M., Bogen J., Wang Z., Bonsnes T.E., Gytri S. Pro-glacial lake sedimentation from jökulhlaups (GLOF), Blåmannsisen, northern Norway // *Earth Surf. Process. Landf.* 2015. Vol. 40. P. 654–665.
https://doi.org/10.1002/esp.3664
- Yamada M., Aono T. ^{210}Pb and ^{234}Th in settling particles collected by time-series sediment traps in the Okinawa Trough // *Deep Sea Res. P. II: Top. Stud. Ocean.* 2003. Vol. 50. № 2. P. 487–501.
https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00466-6

Sedimentation Rates Evaluation in Caucasus Mountain Lakes as Indicators of Their Catchments Denudation

N. V. Kuzmenkova^{1, 2, *}, V. N. Golosov^{1, 3}, E. A. Grabenko¹, M. Y. Alexandrin¹,
V. A. Shishkov¹, and O. N. Byhalova⁴

¹*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Faculty of Chemistry, Moscow State University, Moscow, Russia*

³*Faculty of Geography, Moscow State University, Moscow, Russia*

⁴*FGBU "State Reserve Utrish," Anapa, Russia*

*e-mail: kuzmenkovav@my.msu.ru

The sedimentation rates of five lakes in the Western and Central Caucasus in the late Holocene were studied on the basis of radioisotope dating (^{137}Cs of global and Chernobyl origin, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, ^{14}C). The lakes are located in different landscape zones and has different origin. The selection of bottom sediment cores was carried out after a reservoir map of the depths monitoring based in areas with average maximum depths. The studied lakes catchments are minimally affected by anthropogenic impact; therefore, the reservoir influx of sediments, the sedimentation rate and their changes over time are mainly controlled by natural factors. It has been established that for two lakes in the mid-mountains with tinned and forested catchments, the current sediment accumulation rate is 0.05–0.07 cm/year, and half of it consist organic matter. Sedimentation rates in the high-

mountain Donguz-Orun Lake increases and have been equal to 0.32 cm/year in the last 30 years without taking into account the significant amount of sediment that is redeposited in the front of the reservoir delta. The opposite trend of sedimentation rates was revealed for the high-mountain Garabashi Lake, the distinctive feature of which is the absence of glaciers at present and a rather high projective cover of vegetation catchment. Sedimentation rates in the coastal Sukhoi Liman Lake, located in the low-mountain zone, are 0.1 cm/year with a slight growth trend due to some increase in anthropogenic load associated with local clearcuts and an increase in recreational load.

Keywords: sedimentation rates, lakes, radionuclides dating, denudation temps, Caucasus

REFERENCES

- Abril J.M. On the use of ^{210}Pb -based records of sedimentation rates and activity concentrations for tracking past environmental changes. *J. Environ. Radioact.*, 2022, vol. 244–245, p. 106823. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106823>
- Ahn Y.S. Recent changes in sedimentation rate in three lakes of Ishikari Wetland, Northern Japan determined by ^{210}Pb dating. *Water Resour.*, 2018, vol. 45, pp. 795–802. <https://doi.org/10.1134/S009780781805024X>
- Ahn Y.S., Nakamura F., Kizuka T., Nakamura Y. Elevated sedimentation in lake records linked to agricultural activities in the Ishikari River floodplain, northern Japan. *Earth Surf. Process. Landf.*, 2009, vol. 34, no. 12, pp. 1650–1660. <https://doi.org/10.1002/esp.1854>
- Aleksandrin M.Yu., Dar'in A.V., Grachev A.M., Solomina O.N. Dynamics of regional climatic conditions over the past 2000 years according to lithological and geochemical studies of bottom sediments of Lake Karakel (Western Caucasus). *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2019, no. 1, pp. 73–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019173-85>
- Appleby P.G., Oldfield F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. *Catena*, 1978, vol. 5, no. 1, pp. 1–8. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(78\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(78)80002-2)
- Carbon Isotope Techniques, 1991. Elsevier.
- Carrivick J.L., Tweed F.S. Proglacial lakes: character, behaviour and geological importance. *Quat. Sci. Rev.*, 2013, vol. 78, no. 15, pp. 34–52. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.07.028>
- Corbett D.R., Vance D., Letrick E., Mallinson D., Culver S., Decadal-scale sediment dynamics and environmental change in the Albemarle Estuarine System, North Carolina. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 2007, vol. 71, nos. 3–4, pp. 717–729. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.09.024>
- Corbett D.R., Walsh J.P. ^{210}Pb and ^{137}Cs : establishing a chronology for the last century, In *Handbook of Sea-Level Research*. Shennan I., Long A.J., Horton B.P., Eds. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2015, pp. 361–372. <https://doi.org/10.1002/9781118452547.ch24>
- Doering C., Akber R., Heijnis H. Vertical distributions of ^{210}Pb excess, ^7Be and ^{137}Cs in selected grass covered soils in Southeast Queensland, Australia. *J. Environ. Radioact.*, 2006, vol. 87, no. 2, pp. 135–147. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.11.005>
- Gao J., Long Y., Zhang X., Collins A.L., He X., Zhang Y., Shi Z. Interpreting sedimentation dynamics at Longxi catchment in the Three Gorges Area, China, using Cs-137 activity, particle size and rainfall erosivity. *J. Mt. Sci.*, 2016, vol. 13, pp. 857–869. <https://doi.org/10.1007/s11629-015-3637-0>
- García-Ruiz J.M., Nadal-Romero E., Lana-Renault N., Beguería S. Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges. *Geomorphology*, 2013, vol. 198, pp. 20–36. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.023>
- Golosov V., Tsyplenkov A. Factors Controlling Contemporary Suspended Sediment Yield in the Caucasus Region. *Water*, 2021, vol. 13, 3173. <https://doi.org/10.3390/w13223173>
- Grachev A.M., Novenko E.Y., Grabenko E.A., Alexandrin M.Y., Zazovskaya E.P., Konstantinov E.A., Shishkov V.A., Lazukova L.I., Chepurnaya A.A., Kuderina T.M., Ivanov M.M., Kuzmenkova N.V., Darin A.V., Solomina O.N. The Holocene paleoenvironmental history of Western Caucasus (Russia) reconstructed by multi-proxy analysis of the continuous sediment sequence from Lake Khuko. *Holocene*, 2021, vol. 31, pp. 368–379. <https://doi.org/10.1177/0959683620972782>
- Hasholt B., Walling D.E., Owens P.N. Sedimentation in arctic proglacial lakes: Mittivakkat Glacier, south-east Greenland. *Hydrol. Process.*, 2000, vol. 14, pp. 679–699. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(200003\)14:4<679::AID-HYP966>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(200003)14:4<679::AID-HYP966>3.0.CO;2-E)
- Hinderer M., Kastowski M., Kamelger A., Bartolini C., Schlunegger F. River loads and modern denudation of the Alps – A review. *Earth-Sci. Rev.*, 2013, vol. 118, pp. 11–44. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.01.001>
- Hutchinson S.M., Akinyemi F.O., Mindrescu M., Begy R., Feurdean A. Recent sediment accumulation rates in contrasting lakes in the Carpathians (Romania): impacts of shifts in socio-economic regime. *Reg. Environ. Change*, 2016, vol. 16, pp. 501–513. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0764-7>
- Izrael Yu.A. *Atlas sovremennykh i prognoznykh aspektov posledstviy avarii na Chernobyl'skoi AES na postradavshikh territoriyakh Rossii i Belarusi* [Atlas of Modern and Forecast Aspects of the Consequences of the Chernobyl Accident in the Affected Territories of Russia and Belarus]. Izrael Yu.A., Bogdevich I.M., Eds. Minsk: Belkartografiya, 2009. 140 p.
- Izrael Yu.A. The atlas of caesium-137 contamination of Europe after the Chernobyl accident. In *The radiological*

- consequences of the Chernobyl accident*. Brussels: European Commission, EUR 16544 EN. 1996, pp. 1–10.
- Klaar M.J., Kidd C., Malone E., Bartlett R., Pinay G., Chapin F.S., Milner A. Vegetation succession in deglaciated landscapes: implications for sediment and landscape stability. *Earth Surf. Process. Landf.*, 2015, vol. 40, pp. 1088–1100.
<https://doi.org/10.1002/esp.3691>
- Kotlyakov V.M., Khromova T.Y., Nosenko G.A., Popova V.V., Chernova L.P., Muraviev A.Y., Rototaeva O.V., Nikitin S.A., Zverkova N.M. *Recent Glacier Changes in Mountain Regions of Russia*. Moscow: KMK Scientific Press. 2015. 288 p.
- Kuzmenkova N.V., Ivanov M.M., Alexandrin M.Yu., Grachev A.M., Rozhkova A.K., Zhizhin K.D., Grabenko E.A., Golosov V.N. Use of natural and artificial radionuclides to determine the sedimentation rates in two North Caucasus lakes. *Environ. Pollut.*, 2020, vol. 262, 114269.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114269>
- Luque J.A., Julià R. Lake sediment response to land-use and climate change during the last 1000 years in the oligotrophic Lake Sanabria (northwest of Iberian Peninsula). *Sediment. Geol.*, 2002, vol. 148, pp. 343–355.
[https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00225-1](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00225-1)
- Mikhaleiko V.N., Kutuzov S.S., Lavrentiev I.I., Toropov P.A., Abramov A.A., Aleshina M.A., Gagarina L.V., Doroshina G.Ya., Zhino P., Kozachek A.V., Legrand M., Lim S., Nagornov O.V., Nosenko G.A., Polyukhov A.A., Potemkin A.D., Proinkert S., Rototaeva O.V., Smirnov A.M., Tarasov D.L., Tyufin S.A., Khairidinova A.G., Chernyakov G.A., Shestakova A.A., Yarynich Yu.I. *Ledniki i klimat Elbrusa* [Glaciers and Climate of Elbrus]. Moscow–St. Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2020. 372 p. ISBN: 978-5-4469-1671-9
- Nesje A. A Piston corer for lacustrine and marine sediments. *Arct. Alp. Res.*, 1992, vol. 24, pp. 257–259.
<https://doi.org/10.1080/00040851.1992.12002956>
- Otto J.-C., Schrott L., Jaboyedoff M., Dikau R. Quantifying sediment storage in a high alpine valley (Turtmannal, Switzerland). *Earth Surf. Process. Landf.*, 2009, vol. 34, pp. 1726–1742.
<https://doi.org/10.1002/esp.1856>
- Owens P., and Slaymaker O. Late Holocene sediment yields in small alpine and subalpine drainage basins, British Columbia. In *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions*, Walling D.E., Davies T.R., Hasholt B., Eds. IAHS Publication 209. IAHS: Wallingford, 1992, pp. 147–154.
- Putyrskaya V., Klemm E., Röhlén S., Corcho–Alvarado J.A., Sahli H. Dating of recent sediments from Lago Maggiore and Lago di Lugano (Switzerland/Italy) using ^{137}Cs and ^{210}Pb . *J. Environ. Radioact.* 2020, vol. 212, 106135.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106135>
- Rose N.L., Morley D., Appleby P.G., Battarbee R.W., Alkisaar T., Guilizzoni P., Jeppesen E., Korhola A., Punning J.-M. Sediment accumulation rates in European lakes since AD 1850: trends, reference conditions and exceedence. *J. Paleolimnol.* 2011, vol. 45, pp. 447–468.
<https://doi.org/10.1007/s10933-010-9424-6>
- Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck W.J., Blackwell P.G., Ramsey C.B., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hafflidsen H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser F.K., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott M.E., Southon J.R., Staff R.A., Turney C., van der Plicht J. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, 2013, vol. 55, no. 4, pp. 1869–1887.
https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947
- Schlunegger F., Hinderer M. Pleistocene/Holocene climate change, re-establishment of fluvial drainage network and increase in relief in the Swiss Alps. *Terra Nova*, 2003, vol. 15, pp. 88–95.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2003.00469.x>
- Semertizidou P., Piliposian G.T., Chiverrell R.C., Appleby P.G. Long-term stability of records of fallout radionuclides in the sediments of Brotherswater, Cumbria (UK). *J. Paleolimnol.* 2019, vol. 61, pp. 231–249.
<https://doi.org/10.1007/s10933-018-0055-7>
- Su C.-C., Huh C.-A. ^{210}Pb , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ in East China Sea sediments: sources, pathways and budgets of sediments and radionuclides. *Mar. Geol.*, 2002, vol. 183, pp. 163–178.
[https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00165-2](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00165-2)
- Wang F., Wang H., Li J., Pei Y., Fan C., Tian L., Shang Z., Song M., Geng Y. ^{210}Pb and ^{137}Cs measurements in the Circum Bohai Sea coastal region: sedimentation rates and implications. *Front. Earth Sci. China*, 2008, vol. 2, pp. 276–282.
<https://doi.org/10.1007/s11707-008-0046-5>
- Xu M., Bogen J., Wang Z., Bonsnes, T.E., Gytri, S. Proglacial lake sedimentation from jökulhlaups (GLOF), Blåmannsisen, northern Norway. *Earth Surf. Process. Landf.*, 2015, vol. 40, pp. 654–665.
<https://doi.org/10.1002/esp.3664>
- Yamada M., Aono T. ^{210}Pb and ^{234}Th in settling particles collected by time-series sediment traps in the Okinawa Trough. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanogr.*, 2003, vol. 50, no. 2, pp. 487–501.
[https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00466-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00466-6)

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.583:556.161

СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ ОСАДКОВ И АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В РЕЧНЫХ БАССЕЙНАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

© 2023 г. В. В. Попова*, **

Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: valeria_popova@mail.ru

**e-mail: popova@igras.ru

Поступила в редакцию 16.02.2022 г.

После доработки 20.09.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

Обсуждаются современные тенденции изменений атмосферных осадков и крупномасштабной атмосферной циркуляции, значимые для сезонной структуры и многолетних изменений стока в речных бассейнах средней полосы и севера европейской территории России (ЕТР). С учетом сезонных вариаций и фазового режима проводится анализ региональных и частотно-временных особенностей изменений атмосферных осадков, их связи с крупномасштабной циркуляцией и проявлений в изменениях годовых и средних месячных расходов в бассейнах рр. Северная Двина, Мезень, Ока и Белая. Изменения количества жидких осадков в периоды установления/разрушения снежного покрова коррелируют с температурой воздуха в указанные сезоны. Их связь с продолжающимся потеплением дает основание расценивать их как тенденцию, в отличие от максимальных расходов и объемов весеннего половодья на севере ЕТР, которые в основном определяются вариациями крупномасштабной циркуляции и носят колебательный характер. Полученные регрессионные и спектральные оценки вклада Скандинавской моды в изменчивость годового стока Северной Двины показывают, что определяющим фактором его колебаний является усиление/ослабление зонального переноса, описываемое этой циркуляционной модой в противофазе.

Ключевые слова: атмосферные осадки, твердая и жидкая фаза, многолетняя изменчивость, региональные особенности, речной сток, сезонные аномалии, крупномасштабная атмосферная циркуляция

DOI: 10.31857/S2587556623010144, **EDN:** LUTRNE

ВВЕДЕНИЕ

К началу третьего десятилетия XXI в. потепление климата распространяется на все регионы России и демонстрирует высокие темпы роста температуры во все сезоны.¹ Наиболее значительные изменения, 3.2°C за 45 лет, наблюдаются зимой на европейской территории России (ЕТР); на северо-западе и вдоль арктического побережья они достигают наиболее высоких значений среди регионов России — около 4.5°C за 45 лет. Существенный рост наблюдается и весной, хотя на ЕТР он ниже по сравнению с Сибирью и Дальним Востоком, около 2°C в среднем по территории. Наряду с ростом осадков (Доклад ..., 2021) потепление этих сезонов приводит к изменениям их фазовой структуры и сокращению периода снежной аккумуляции (Попова и др., 1918; Шмакин, 2010). В летний и осенний сезоны потепление запаздывало примерно на 10 лет, но в целом за 1976–2020 гг. демонстрирует высокие темпы —

2.1°C и 2.5°C, а также отличается большим по сравнению с другими сезонами вкладом на фоне межгодовой изменчивости. Последнее говорит об усилении воздействия этих сезонов на увлажнение речных бассейнов и их состояние к началу зимы, особенно на фоне наблюдающейся тенденции к дефициту осадков на юге ЕЧР.²

Изменения термического режима, характеризующиеся частыми оттепелями, уменьшением промерзания почв и сокращением периода залегания снежного покрова, способны существенно изменить сезонную структуру стока. В условиях умеренных широт вклад осадков в формирование аномалий речного стока также может значительно различаться в зависимости от фазового состояния. В связи с этими климатическими изменениями на большей части Европейской территории России отмечается увеличение водности межени и сокращение объема половодья (Георгиевский, Шалыгин, 2012; Фролова и др., 2015a; Dzhamalov

¹ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020. М., 2021. 104 с.

² Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020. М., 2021. 104 с.

et al., 2015).³ Аномалии зимнего стока на юге бассейна Верхней Волги в 1980–2005 гг. по данным (Алексеевский и др., 2013) достигали 50–100% (по сравнению с таковыми за предшествующее 30-летие), практически не имея аналогов в XX в.

Нарушение однородности многолетних рядов зимнего стока Волги вследствие повышения температуры зимних месяцев констатируется и другими исследователями (Болгов и др., 2014). Другая сторона этой тенденции может проявляться в снижении рисков экстремальных гидрологических явлений вследствие уменьшения высоты и объемов половодья (Попова и др., 2019; Фролова и др., 2015а).

С начала текущего столетия на большей части ЕЧР тенденция к росту увлажненности и увеличению годового стока сохраняется, хотя и не выходит за пределы межгодовой изменчивости (Второй ..., 2014; Гельфан и др., 2021). Изучение сценарных прогнозов изменений водного режима рек конца XXI в. (Гельфан и др., 2021; Laine et al., 2014) подтверждает выводы Второго оценочного доклада Росгидромета⁴ о вероятном незначительном повышении нормы годового стока для большей части территории России при умеренных сценариях антропогенного потепления в XXI в. Несмотря на закономерный рост осадков, связанный с потеплением климата, аномалии атмосферных осадков отличаются значительной пространственной и временной неоднородностью, связанной с вариациями атмосферной циркуляции (Попова, 2021; Ророва, 2007; Vihma et al., 2016). Внутренняя климатическая изменчивость может быть причиной возникновения неблагоприятных гидрологических ситуаций для экономики и окружающей среды. Примером таких ситуаций может быть 2014 г., отмеченный маловодьем в бассейне Северной Двины (Фролова и др., 2015а)⁵, а также резким снижением водности в бассейне Волги, повлекшим нарушение условий судоходства и его временную отмену на ряде участков⁶.

Основываясь на результатах анализа изменений составляющих водного баланса в крупных речных бассейнах ЕР, исследователи (Григорьев и др., 2018) обращают внимание на простран-

ственную неоднородность изменений речного стока в бассейнах, находящихся в близких климатических условиях, и необходимость ее учета в гидрологических прогнозах. Регионализация изменчивости осадков и толщины снежного покрова и ее связь с циркуляционными модами (Попова, 2021; Ророва, 2007) показывает, что эта неоднородность может быть связана с региональной структурой изменчивости стока твердых осадков и основным определяющим ее фактором – крупномасштабной атмосферной циркуляцией.

Цель данной работы – выявление закономерностей пространственного распределения современных тенденций климатических аномалий ЕТР значимых для увлажнения и речного стока и выявлении ведущих циркуляционных факторов подобных аномалий. Среди задач исследования выделены: изучение региональной структуры аномалий твердых и жидких осадков и ответственных за их формирование мод крупномасштабной атмосферной циркуляции, а также их проявлений в изменчивости речного стока на примере бассейнов Северной Двины и Мезени, а также притоков Волги – Оки и Белой, не испытывающих существенного антропогенного воздействия в верхнем течении.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Месячные суммы жидких и твердых осадков рассчитывались на основе суточных данных об осадках и температуре приземного воздуха из архива ВНИИГМИ МЦД (<http://www.meteo.ru>), полученных из наблюдений на 64 метеостанциях (рис. 1) Европейской России за 1970–2018 гг. Указанные станции прошли предварительный отбор, условием которого была однородность рядов и не более 15% пропусков в наблюдениях. Критерием для определения фазы осадков принималась средняя суточная температура, пороговое значение установлено из результатов моделирования снежного покрова и его верификации для разных физико-географических условий (Шмакин и др., 2009). Осадки учитывались как “жидкие”, если средняя суточная температура превышала +1°C. На основе многолетних рядов месячных осадков рассчитывались сезонные и годовые суммы с учетом твердой и жидкой фазы, а также аномалии от средних значений за 1970–2018 гг., которые затем интерполировались с разрешением 2.5×2.5 градуса, что соответствует плотности сети метеостанций. Были получены многолетние ряды аномалий указанных характеристик осадков в регулярной сетке; на следующем этапе для выявления пространственно-временной структуры и получения объективной основы для районирования изучаемой территории по однородности колебаний осадков проводился анализ эмпирических ортогональных функций (ЭОФ).

³ Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. I. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.

⁴ Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. I. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.

⁵ Государственный доклад о состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2014 г. М.: НИА-Природа, 2015. 270 с.

⁶ <https://iz.ru/880522/evgeniipriemskaja/bez-vody-vinovatyeh-schem-sviazanovesennoe-obmelenie-volgi>; Морские вести России, 2016. <http://www.morvesti.ru/news/1679/55690/>.

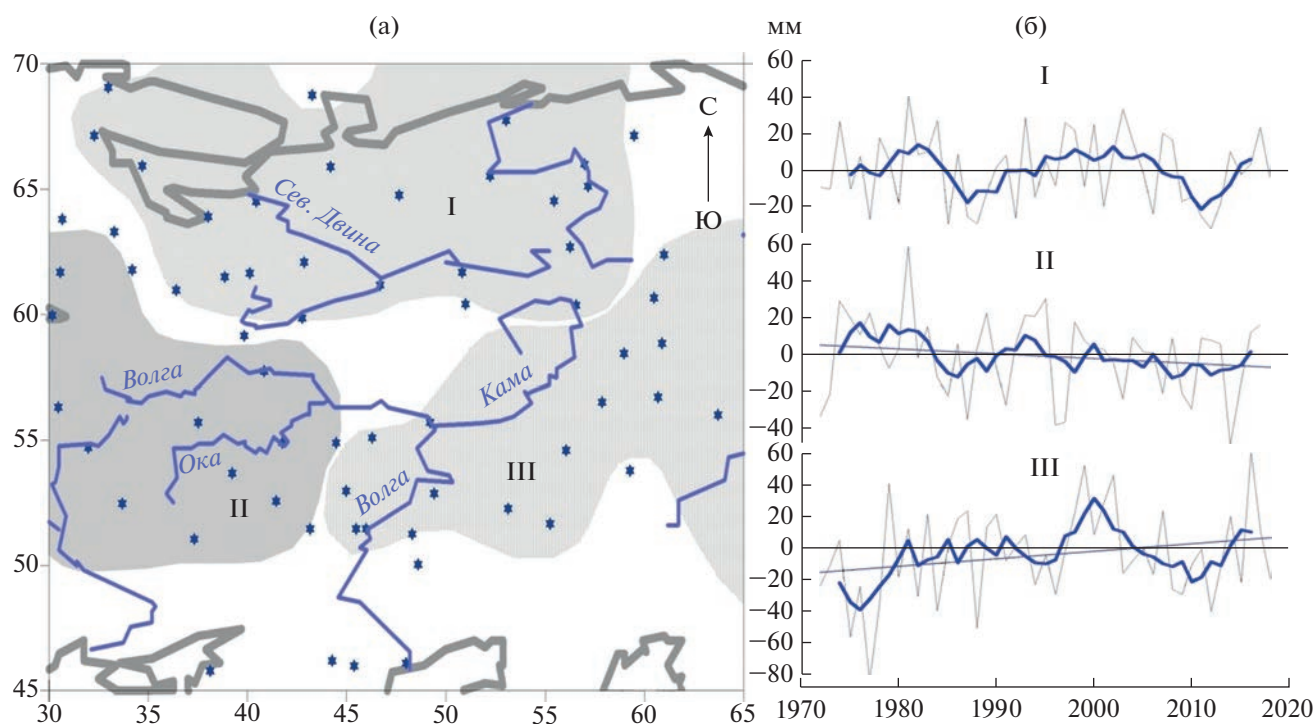


Рис. 1. Районы, однородные по характеру колебаний годовых сумм твердых осадков (заливка, I, II, III — номера районов, звездочками обозначено расположение сети метеостанций) (а) и их многолетний ход (б) в среднем по районам за 1980–2018 гг.

Примечание: показаны годовые и 5-летние скользящие средние значения, прямыми линиями обозначены линейные тренды.

Согласно ранее разработанной методики (Попова, 2009), основные критерии для выделения таких районов состоят в следующем: количество районов определяется числом эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) и соответствующих главных компонент (ГК), которые должны описывать не менее 50% общей изменчивости исследуемых временных рядов (1); пространственная локализация района определяется положением очага ЭОФ, в пределах которого корреляция между соответствующей ГК и временными рядами в каждой ячейке регулярной сетки не менее 0.5 (2); корреляция между временными рядами внутри каждого из районов должна быть выше, чем за его пределами (2). Полученные районы в указанных на рис. 1–4 границах, соответствуют перечисленным требованиям (в отличие от узких зон между выделенными районами, которые являются переходными). Далее, путем осреднения по площади выделенных районов были получены многолетние, 1972–2018 гг., ряды сезонных и годовых сумм осадков, отражающие основные тенденции и частотно-временные особенности их изменений на европейской части России.

Для сопоставления аномалий осадков и сезонных аномалий речного стока проводился анализ гидрографов для речных бассейнов: Северная

Двина (Усть-Пинега) и Мезень (Малонисогорская), а также притоки Волги — Ока (в створе Калуга) и Белая (Бирск), не испытывающих существенного антропогенного воздействия в верхнем течении (Георгиади и др., 2013). Осреднение месячных расходов проводилось по десятилетиям за 1971–2019 гг. (1971–1980, 1981–1990, 1991–2000, 2001–2010), а также за 9 лет с начала 2010-х годов (2011–2019). Пропуски в данных, которые присутствовали в рядах наблюдений за расходами Северной Двины в отдельные месяцы в период 2008–2019 г., восстанавливались с использованием данных в створе Абрамково (АИС ГМВО, 2022, <https://gmvo.skniivh.ru/>). Данные средних годовых расходов Северной Двины за 2002–2012 гг., которые использовались для анализа связи с изменениями атмосферной циркуляцией, получены из опубликованных источников (Алексеевский и др., 2015).

Для изучения циркуляционных факторов изменчивости осадков использовались данные из архива *Northern Hemisphere Teleconnection Patterns* (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>). Рассматривались циркуляционные моды и их многолетние ряды (индексы), значимые для изучаемой территории с точки зрения расположения их центров действия (ЦДА) и влияния на направление переноса воз-

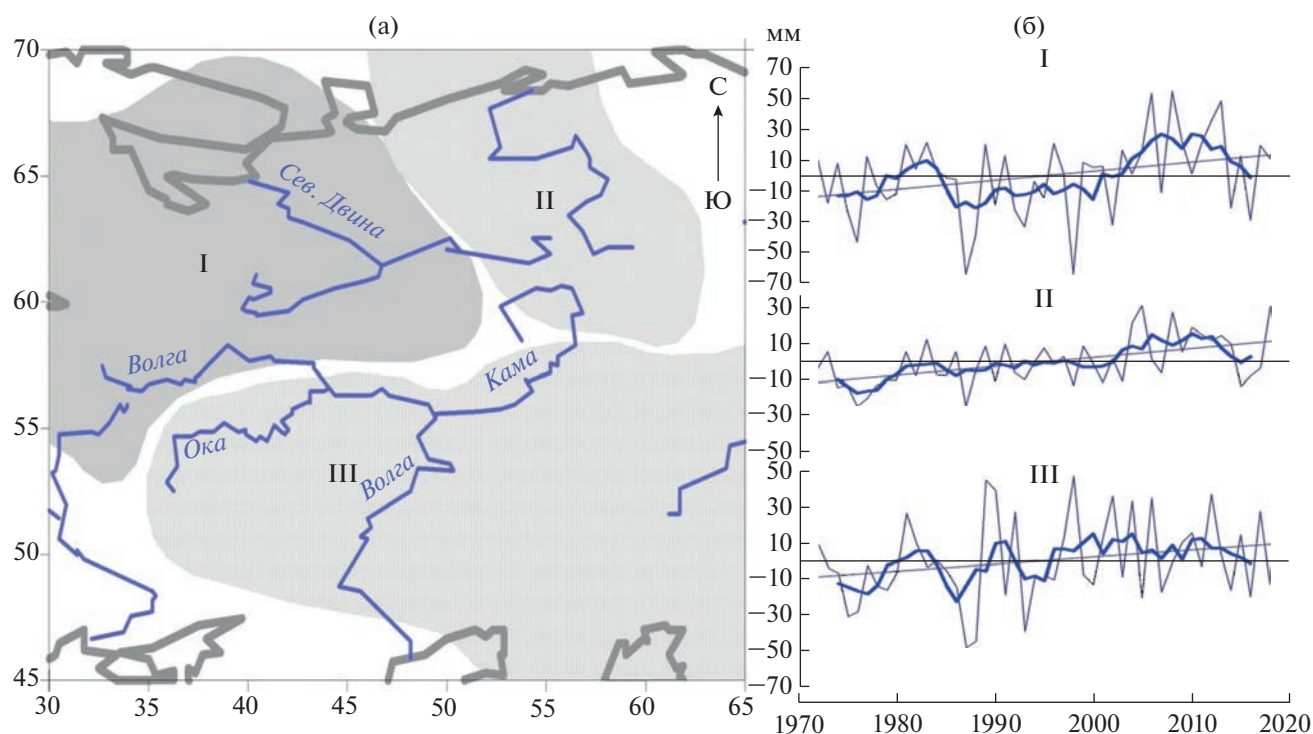


Рис. 2. Районы, однородные по характеру колебаний аномалий сумм жидких осадков за октябрь–декабрь (заливка, I, II, III — номера районов) (а) и их многолетний ход (б) в среднем по районам за 1980–2018 гг.

Примечание: показаны годовые и 5-летние скользящие средние значения, прямыми линиями обозначены линейные тренды.

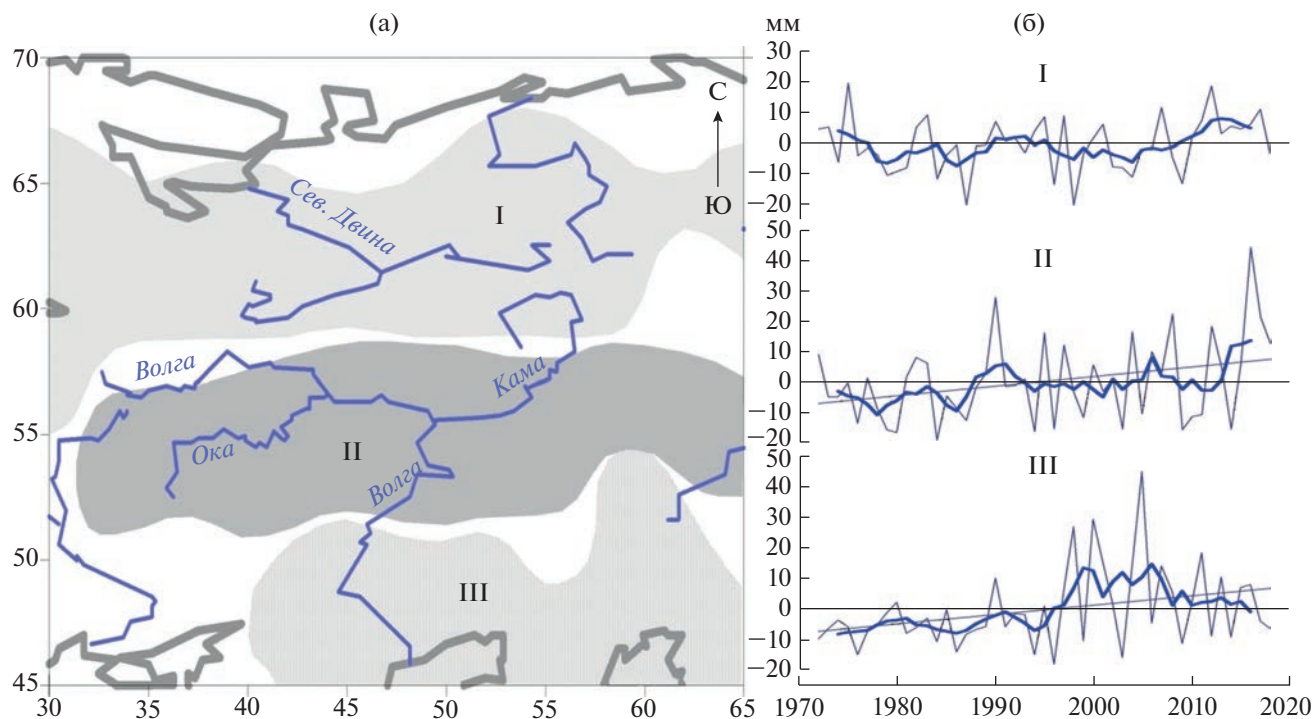


Рис. 3. Районы, однородные по характеру колебаний аномалий сумм жидких осадков за февраль–апрель (заливка, I, II, III — номера районов) (а) и их многолетний ход (б) в среднем по районам за 1980–2018 гг.

Примечание: показаны годовые и 5-летние скользящие средние значения, прямыми линиями обозначены линейные тренды.

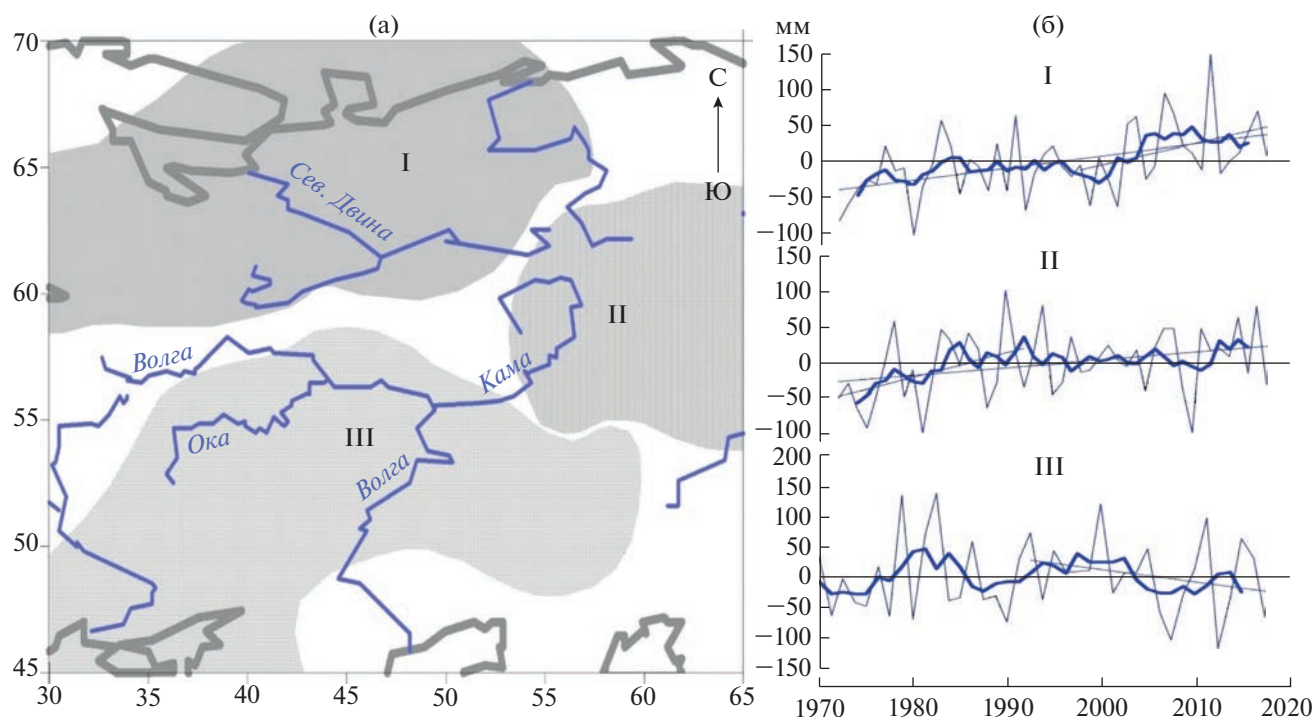


Рис. 4. Районы, однородные по характеру колебаний аномалий сумм жидких осадков за май–сентябрь (заливка, I, II, III – номера районов) (а) и их многолетний ход (б) в среднем по районам за 1980–2018 гг.

Примечание: показаны годовые и 5-летние скользящие средние значения, прямыми линиями обозначены линейные тренды.

душных масс. Анализировалось пространственное распределение корреляции циркуляционных индексов с сезонными осадками, а также регрессионная зависимость годового стока Северной Двины от изменчивости индексов атмосферной циркуляции за 1950–2017 гг. Для получения регрессионной модели стока временные ряды циркуляционных индексов и средних годовых расходов предварительно сглаживались путем 3-летнего скользящего осреднения. Для изучения способности регрессионной модели воспроизводить особенности частотно-временной структуры годового стока Северной Двины проводился анализ спектральных функций (по методу разложения Фурье) наблюдаемого и рассчитанного стока.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Региональные особенности изменений твердых и жидких осадков на севере Европейской России и их проявление в сезонной структуре речного стока. Анализ эмпирических ортогональных функций и проведенное на его основе районирование изменчивости сумм твердых и жидких осадков (рис. 1–6) демонстрируют особенности пространственного распределения тенденций этих климатических характеристик за последние десятилетия (1972–2018 гг.).

В пределах ЕТР выделяется три района, отличающихся по характеру колебаний годовых сумм твердых осадков (см. рис. 1а), которые условно можно обозначить как север (I), запад (II) и восток (III). Каждый из них представляет собой естественный район, в пределах которого связанность колебаний осадков (в данном случае в твердой фазе) выше, чем за его пределами, осреднение их многолетних рядов в пределах района дает характерный для рассматриваемого района многолетний ход (см. рис. 1б).

Территория ЕТР севернее 60-й параллели, от Белого моря до Урала, представляет собой единый район (I), куда входят бассейны северных рек, включая наиболее крупные – Северную Двину и Печору. Анализ многолетнего хода твердых осадков в районе I указывает на отсутствие линейного тренда (см. рис. 1б); основная изменчивость в этом районе связана с высокочастотными, 2–5-летними колебаниями, а также продолжительными аномалиями – положительными в 1973–1984 гг. (10–40 мм) и 1993–2007 гг. (20–30 мм), и отрицательными в 1985–1992 гг. (около 20 мм) и 2009–2013 гг. (20–30 мм). С этими флуктуациями, периодичностью 20–25 лет, очевидно связан основной вклад в изменчивость твердых осадков на севере ЕР.

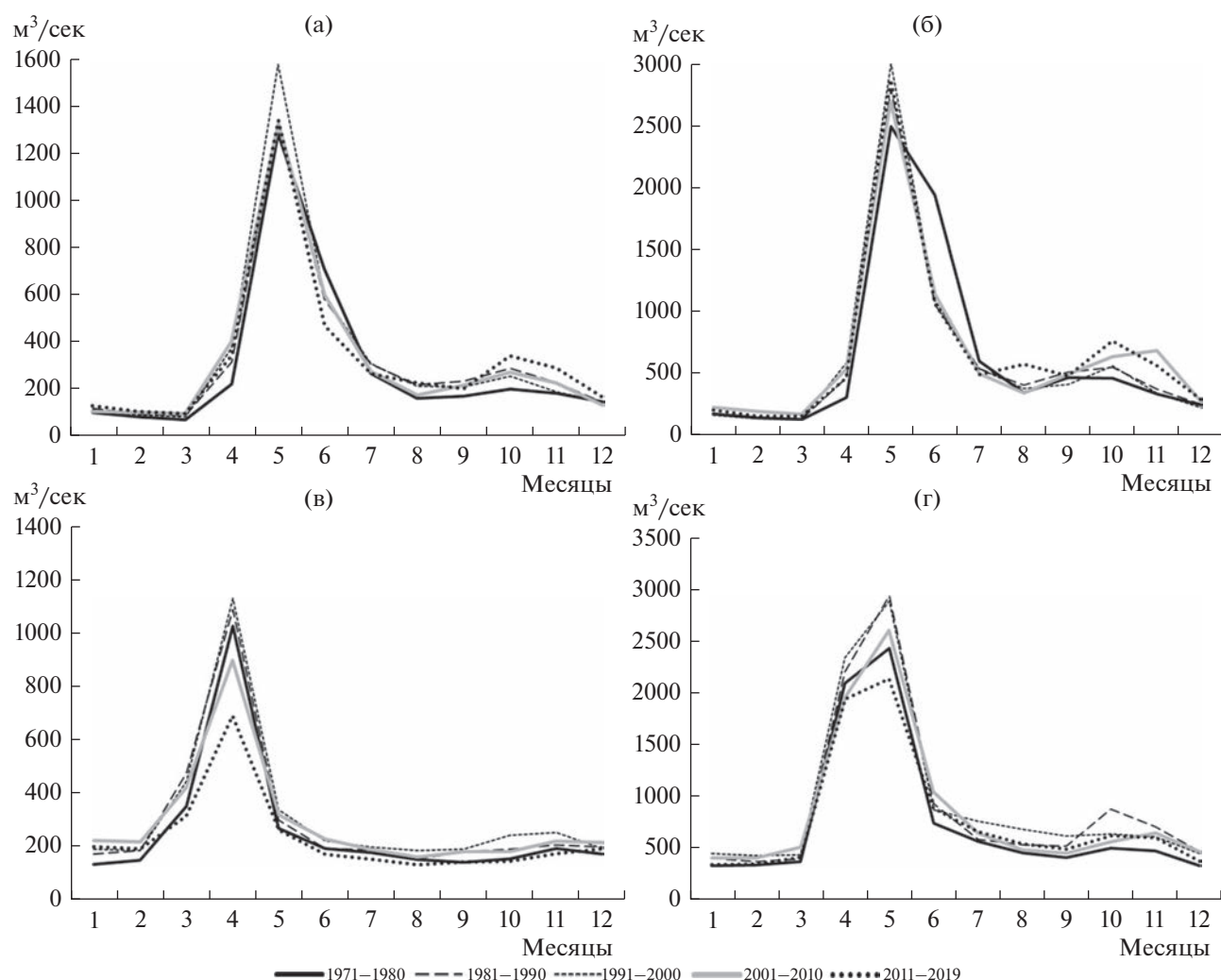


Рис. 5. Годовой ход средних месячных расходов рек, м³/с: (а) Северная Двина (Усть-Пинега)*, (б) Мезень (Малонисогорская)*, (в) Ока (Калуга), (г) Белая (Бирск).

Примечание. Показаны средние расходы за 1971–1980, 1981–1990, 1991–2000 гг., 2001–2010 и 2011–2019 гг. *Пропуски в данных в 2002–2007 гг.

На западе и на востоке средней полосы ЕТР многолетние тренды твердых осадков имеют противоположную направленность. Они не выходят за пределы межгодовой изменчивости (средне-

квадратического отклонения), т.е. статистически не значимы (см. рис. 16, табл. 1), но могут быть чувствительными для природной среды и формирования запасов влаги. В отличие от севера ЕТР

Таблица 1. Стандартное отклонение, σ , и параметры линейного тренда, B и R^2 , атмосферных осадков в твердой, P_{sol} , и жидкой, P_{liq} , фазах в пределах районов* однородных колебаний осадков за 1972–2018 гг.

	P_{sol} , год. сумма			P_{liq} , октябрь–декабрь			P_{liq} , февраль–апрель			P_{liq} , май–сентябрь		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
σ , мм	19	23	29	26	13	23	14	13	10	59	45	49
B , мм/46 лет	—	12	23	20	18	14	—	15	15	39	32	–31
R^2 , %	—	3	5	11	25	5	—	10	11	6	4	3

Примечание. Выделены статистически значимые параметры линейного тренда на уровне $p < 0.05$. *Положение районов для указанных характеристик – P_{sol} , год. сумма; P_{liq} , октябрь–декабрь; P_{liq} , февраль–апрель; P_{liq} , май–сентябрь, указано на рис. 1–4.

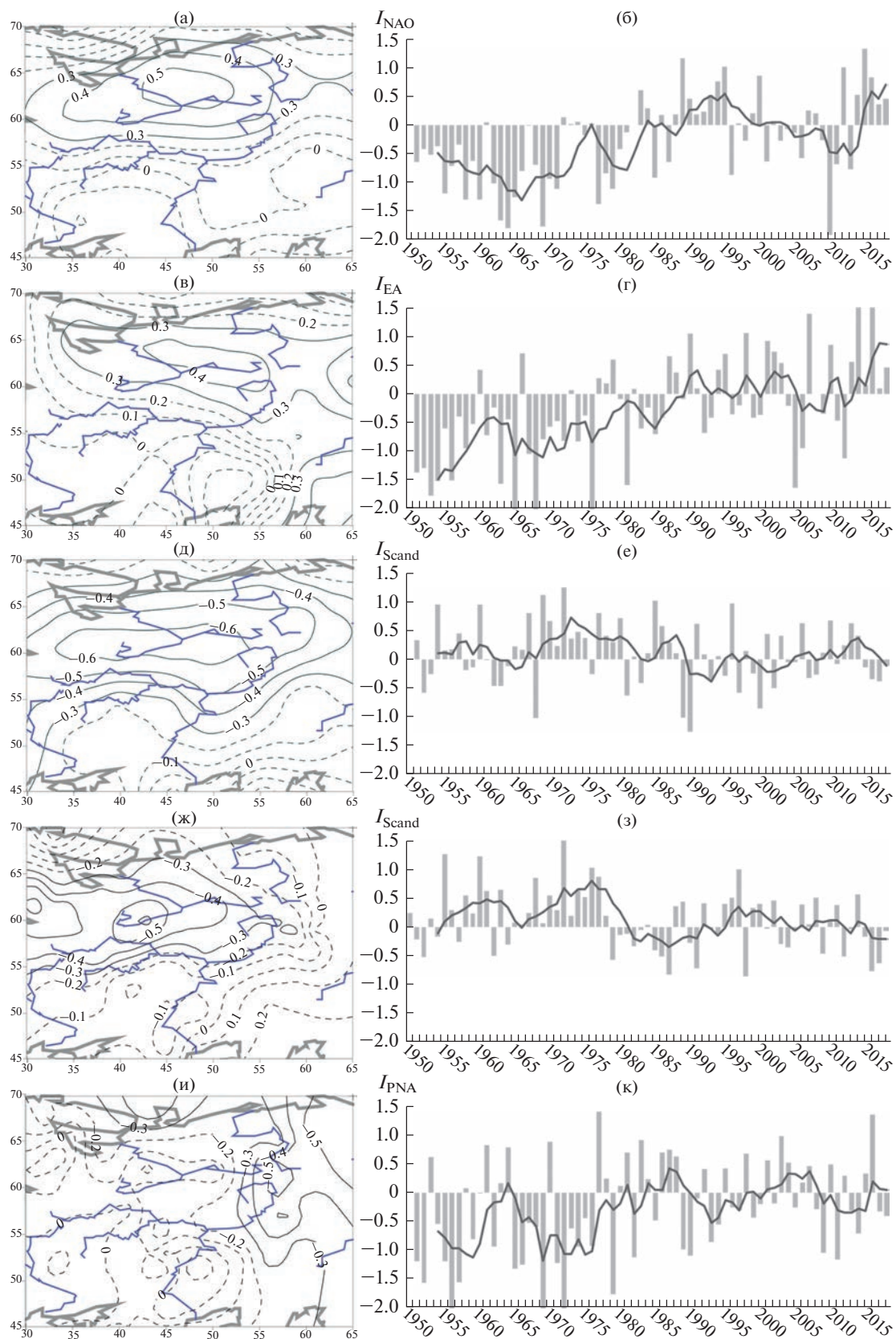


Рис. 6. Коэффициенты корреляции сумм осадков за декабрь—март (а, в, д) и май—октябрь (ж) с циркуляционными индексами NAO (а), EA (в), Scand (д, ж) и многолетние изменения указанных индексов (б, г, е, з). Пунктиром показаны изолинии статистически незначимых коэффициентов корреляции ($p \leq 0.05$).

(район I), в районах II и III основной вклад в изменчивость годовых сумм твердых осадков вносят межгодовые колебания, хотя флуктуации с периодом 20–25 лет достаточно заметны, особенно на востоке, в районе III, с середины 1990-х годов.

На западе, в районе II, который включает бассейны Верхней Волги, наблюдается закономерное в эпоху потепления сокращение осадков в твердой фазе, которое коррелирует с приповерхностной температурой в конце осени и соответствует аномалиям сроков установления снежного покрова (Попова и др., 2018). Рост годовых сумм твердых осадков на востоке ЕТР, около 20 мм за 47 лет, по-видимому, связан с усилением арктических вторжений со стороны Сибири в конце 1990-х — начале 2000-х, т.е. с периодом, так называемого “перерыва в потеплении”. Циркуляционные условия подобных вторжений и их связь с сокращением ледяного покрова Баренцева и Карского морей активно обсуждается в последние годы (Попова, 2020; Семенов, 2016; Mori et al., 2019).

Известно, что на фоне потепления зимнего сезона дефицит твердых осадков может быть обусловлен ростом температуры в переходные сезоны и сокращением периода отрицательных температур, и связан с перераспределением их количества “в пользу” жидких осадков. Анализ тенденций в ходе *жидких осадков в период осенне-зимнего межсезонья, октябрь–декабрь*, иллюстрирует это перераспределение и позволяет оценить его пространственные и временные масштабы (см. рис. 2).

В этом случае, северная половина ЕТР оказывается разделенной на два района, I и II (см. рис. 2а), примерно по 50-му меридиану. На северо-западе, в районе I, куда входят большая часть бассейна Северной Двины, существенный рост жидких осадков в предзимье, около 30 мм с начала 1970-х годов, связан, главным образом, с длительной аномалией с середины 2000-х, с максимумами до 50 мм в 2006, 2008, 2012, 2013 гг. Из-за высокой межгодовой изменчивости доля тренда в общей изменчивости здесь превышает не 10% (см. рис. 2б, табл. 1), в то же время средняя аномалия в 2005–2013 гг. статистически значимо (на уровне $p < 0.05$) отличается от среднего за предшествующие 30 лет. На востоке, в районе II, куда входят бассейн Печоры и верховья Северной Двины и Мезени, в этот период также наблюдается аномалия жидких осадков с максимумом около 30 мм в 2004–2005 гг. Несмотря на то, что в среднем она не превышает 15 мм, на фоне небольшого разброса межгодовых значений тренд (см. табл. 1), 20 мм за 47 лет, вносит существенный вклад, 25%, в общую изменчивость и, в отличие от северо-запада, достигает уровня статистической значимости ($p < 0.05$).

Наличие тесной связи аномалий жидких осадков за октябрь–декабрь с приземной температурой

подтверждает роль потепления осенне-зимнего межсезонья в росте аномалий жидких осадков и сокращении количества осадков, выпадающих в виде снега. На западе, в районе I, связь жидких осадков со средней температурой в октябре–ноябре достигает 0.78, при этом основной вклад вносит ноябрь (коэффициент корреляции 0.68). В районе II, с ростом континентальности на восток, большее влияние на рост жидких осадков оказывают температурные аномалии октября (коэффициент корреляции 0.57), связь жидких осадков со средней температурой за октябрь–ноябрь выше, но незначительно (0.63).

На юге ЕТР, в районе III, который охватывает бассейны Оки, Белой, а также Средней Волги и Дона, существенный рост жидких осадков в период межсезонья наблюдался в первые десятилетия современного потепления. В 1972–2000 гг. он составлял 25 мм, а за 1972–2018 гг. — только 14 мм. Отсутствие тренда жидких осадков на юге ЕТР с начала 2000-х годов, по-видимому, означает переход к режиму выпадения преимущественно жидких осадков (см. рис. 2б).

В период снеготаяния (февраль–апрель), на территории ЕТР выделяются три района, различающихся по типу многолетнего хода и тенденций жидких осадков, которые располагаются почти зонально (см. рис. 3а, б) и показывают, где проявляется влияние весеннего потепления на сокращение осадков в твердой фазе. В первую очередь, это Верхняя Волга и ее среднее течение (район II). Здесь несмотря на высокую межгодовую изменчивость и долю тренда, не превышающую 10%, линейный рост жидких осадков в этот сезон достигает 40% от многолетней нормы. Кроме того, их корреляция с приповерхностной температурой, прослеживается уже с февраля ($r = 0.53$), а в среднем за февраль–март коэффициент корреляции r достигает 0.68. На юге ЕТР, в районе III, распространяющемся на бассейн Дона и нижнее течение Волги, выявляется такой же рост жидких осадков; связь с температурой при этом отсутствует, что объясняется устойчивым преобладанием положительных температур на протяжении всего рассматриваемого периода. На севере (район I), напротив, в период снеготаяния отмечается достаточно тесная связь жидких осадков с приповерхностной температурой в апреле, коэффициент корреляции $r = 0.76$, но линейного роста жидких осадков в течение 1972–2018 гг. здесь не выявлено, продолжительная аномалия, свидетельствующая об увеличении их доли в весенний период, отмечается только в последнем десятилетии.

В региональных тенденциях *осадков теплого периода (май–сентябрь)* также прослеживаются три различающихся между собой типа многолетнего хода (см. рис. 4а, б). Заметные, но из-за высокой межгодовой изменчивости статистически

Таблица 2. Изменения сезонных сумм атмосферных осадков в 2001–2018 гг. относительно 1971–2000 гг. по районам в зависимости от сезона и фазового состояния

Характеристика, период	Осадки, %		
	Район I	Район II	Район III
P_{liq} , октябрь–декабрь	20	12	11
P_{liq} , февраль–апрель	2	5	6
P_{sol} , год. сумма	–3	–7	7
P_{liq} , май–сентябрь	17	0	–21

Примечание. * Положение районов для указанных характеристик осадков показано на рис. 1–4.

незначимые тенденции противоположного знака выделяются на северо-западе и юго-западе территории ЕТР.

На северо-западе, в районе I, выявляется линейный рост осадков, около 14% от нормы за 1977–2018 гг., который распространяется, на большую часть водосборов Северной Двины и Печоры. С начала 1980-х до конца 1990-х годов, в среднем, осадки близки к норме, затем, после 4-летнего периода дефицита, с середины 2000-х до 2017 г. на фоне возросшей изменчивости наблюдаются несколько максимумов осадков до 30–40% от многолетней нормы (см. рис. 4б). Ближе к Центральному Уралу, в районе II, распространяющемся на верховья Северной Двины, Печоры и Камы, примерно в этот период (2000–2014 гг.) после многолетнего роста с начала 1970-х годов наблюдается дефицит осадков с абсолютным минимумом в 2010 г. (см. рис. 4б). В целом, в структуре многолетних колебаний осадков в этом районе четко выделяется низкочастотная флуктуация с периодом около 40 лет.

Обобщение тенденций осадков демонстрирует оценки изменений их характеристик в 2001–2018 гг. относительно предшествующего тридцатилетия 1971–2000 гг. (табл. 2).

Приведенные на рис. 5 годовые гидрографы и их сравнение с многолетними изменениями осадков в регионе (см. рис. 1–4, табл. 2) позволяют установить связь частотно-временные особенностей сезонных осадков, с учетом твердой или жидкой фазы и структуры речного стока в бассейнах Северной Двины (см. рис. 5а) и Мезени (см.

рис. 5б), а также рр. Ока и Белая Волжского бассейна (см. рис. 5в, г) в период 1971–2019 гг.

Анализ вариаций *сезонного хода речного стока*, осредненного по десятилетиям позволяет судить как о колебаниях (от декады к декаде), так и о тенденциях — продолжающихся аномалиях одного знака (табл. 3). К колебаниям, по-видимому, можно отнести рост пиковых расходов в период весеннего половодья Северной Двины, где рост этой характеристики наблюдался в 1991–2000 гг., а затем вернулся к значениям 1971–1980 гг. (см. рис. 5а). В бассейнах Оки и Белой после роста в течение двух десятилетий, 1981–2000 гг. (см. рис. 5в, г), объемы половодья снизились до значений 1971–1980 гг., а в 2011–2019 гг. опустились еще ниже. Учитывая небольшие изменения количества твердых осадков в 2011–2019, в бассейне Оки они показывают отрицательную тенденцию, а в бассейне Белой — положительную (см. рис. 2а, б), существенное падение объемов половодья (16 и 13% соответственно) может быть связано с ростом повторяемости зимних оттепелей и увеличением зимнего стока (см. табл. 3) а также с существенным, более 20%, дефицитом (по отношению к норме за рассматриваемый период) осадков теплого периода, который оказывает большое влияние на состояние речного бассейна к началу зимнего сезона.

На севере, в бассейне Северной Двины, при отсутствии тренда годовых сумм твердых осадков проявляется существенный вклад флуктуаций с периодом около 20–25 лет (см. рис. 1а, б), в частности продолжительный дефицит осадков, в 2008–2013 гг., хотя в целом за 2001–2018 гг. (см. табл. 2) он составляет только 5%. Отметим, что в 2008–2013 гг. он сопровождался существенной аномалией жидких осадков в конце осени — начале зимы (см. рис. 2а, б, табл. 2), что может свидетельствовать о перераспределении твердых осадков “в пользу” жидких и сокращению расходов и объемов стока в пик половодья.

Бассейн Мезени, для которого, согласно рис. 1, характерен тот же многолетний ход осадков, что и в бассейне Северной Двины, отличается самым высоким значением расходов в пик половодья в 1991–2000 гг. (см. рис. 5б), но из-за существенного сокращения расходов в июне общий объем талого стока в этот период падает, а отмеченный

Таблица 3. Изменения средних месячных расходов в речных бассейнах в 2001–2018 гг. относительно 1971–2000 по сезонам

Месячные расходы, %											
Северная Двина			Мезень			Белая			Ока		
X–XII	II–IV	V–VI	X–XII	II–IV	V–VI	X–XII	II–III	IV–V	X–XII	II–III	IV–V
19	20	1	43	18	–9	–2	7	–13	–5	8	–16

рост в мае следует расценивать как реакцию на увеличение темпов снеготаяния, которому, в свою очередь, может способствовать резкое потепление Арктики и близость бассейна к теплому Баренцеву морю⁷.

Увеличение зимнего стока во всех рассмотренных бассейнах имеет характер продолжающейся с начала 1980-х годов тенденции. Внутри сезона рост стока от десятилетия к десятилетию на севере, в бассейнах Северной Двины и Мезени, сдвигается с октября в 1991–2000 гг. на ноябрь в 2001–2019 гг. (см. рис. 5а, б). Средняя аномалия за 2001–2018 гг., по сравнению с 1971–2000 гг., в этих бассейнах составляет около 20% (см. табл. 3) и статистически значима (на уровне $p \leq 0.05$), что позволяет связывать ее с потеплением в конце осени – начале зимы и продолжительной, в течение 2005–2013 гг., аномалией жидких осадков на фоне снижения осадков в твердой фазе (см. рис. 1, 2, табл. 2). На востоке ЕТР, в бассейне р. Белая, после существенного роста в октябре 1981–1990 гг. величина средних месячных расходов несколько уменьшилась и в течение 1991–2019 гг. сохраняется в ноябре примерно на одном уровне (см. рис. 5г). В бассейне Оки, в условиях коротких и мягких зим, с увеличением количества жидких осадков могут быть связаны возросшие среднемесячные расходы в январе и феврале, которые сохраняются с 1981 г. (см. рис. 5в).

Роль крупномасштабной циркуляции в региональном распределении аномалий осадков и структуре многолетней изменчивости речного стока. Влияние крупномасштабной циркуляции атмосферы определяется направлением влагонесущих потоков и проявляется в пространственном распределении и повторяемости осадков. Зональный перенос атлантической влаги описывается индексом Североатлантического колебания (NAO), вынос теплого и влажного воздуха с южной составляющей связан с Восточно-атлантической циркуляционной модой (EA), условия для вторжения сухого арктического воздуха с севера и северо-востока возникают при усилении скандинавского антициклона и описываются Скандинавской модой (Scand). Влияние Тихого океана на территорию ЕР, несмотря на удаленность, обусловлено распространением антициклонического образования, связанного с основными центрами действия Тихоокеанско-Североамериканской моды (PNA) на Сибирь, и нарушением зонального переноса с усилением восточной составляющей в направлении переноса воздушных масс. Оценки вклада PNA в формирование аномалий зимней аккумуляции снега на территории ЕЧР приведены в (Ророва, 2007).

⁷ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020. М., 2021. 104 с.

На рис. 6 представлены поля коэффициентов корреляции между аномалиями сумм осадков с декабря по март, а также с июня по октябрь, с индексами перечисленных циркуляционных мод.

Для речных бассейнов высоких и умеренных широт аномалии твердых осадков не только определяют объемы половодья, но и вносят основной вклад в изменчивость годового стока. Поэтому, циркуляционные условия холодного периода, и особенно зимних месяцев, ответственные за формирование снеготаяния, как правило, оказывают наибольшее влияние на изменчивость речного стока. Распределение коэффициентов корреляции сумм твердых осадков за декабрь–март с аномалиями циркуляционных мод представлено на рис. 6. Отметим, что с декабря по март накапливается основной запас воды в снежном покрове, причем по режиму циркуляции и температуры в высоких и умеренных широтах март относится к зимним месяцам.

Область статистически значимой корреляции зимних осадков с индексом NAO распространяется на западные и центральные районы севера Европейской России (см. рис. 6а, б), включая водосборы Северной Двины, Мезени, Печоры, а также верхнее течение Камы. Наиболее тесная связь, (с корреляцией более 0.5) выявляется в среднем течении Северной Двины, несколько севернее центра ее водосбора. В многолетнем ходе индекса NAO хорошо выражен тренд, а также низкочастотная составляющая, с периодом около 40 лет. На фоне квазидесятилетних периодичностей четко выделяется рост с конца 1960-х до середины 1990-х годов с продолжительной аномалией с 1988 до 1995 г., сменяющийся обратной тенденцией, за которой после абсолютного минимума в 2010 г. последовал резкий рост, аномалия и рекордное значение индекса 2015 г. (см. рис. 6в).

Влияния центров действия моды EA, в отличие от NAO распространяется дальше на восток и юго-восток, в целом корреляция слабее, корреляция около 0.5 отмечается только в небольшом очаге в верховьях Вычегды и Камы (см. рис. 6в, г). В многолетнем ходе индекса EA, как и в случае NAO, выявляется устойчивый тренд с 1970-х до конца 1990-х годов, вклад квазидесятилетних циклов, а также периодичностей большего масштаба, на фоне высокочастотной изменчивости не проявляется. Положительные аномалии наблюдаются в конце 1980-х и в начале 2000-х годов, а также в последние годы, отмеченные рекордными значениями индекса в 2014 и 2016 гг. (см. рис. 6г).

Влияние циркуляционной моды Scand и его основного центра действия – антициклона над севером Скандинавии, в изменчивости осадков проявляется наиболее явно, об этом свидетельствует существенная корреляция между этими параметрами, выявленная не только для зимних

месяцев (декабрь—март), но и для теплого периода (июнь—октябрь). Отметим, что в теплое время года связь осадков с крупномасштабной циркуляцией нивелируется внутримассовыми конвективными осадками, что, по-видимому, объясняет отсутствие заметной корреляции осадков теплого периода с другими циркуляционными модами.

Обширная зона тесной отрицательной корреляции зимних осадков (более 0.5, по абсолютной величине) с индексом Scand, простирается севернее 55-ой параллели с запада на восток (см. рис. 6д, е). Несмотря на то, что со Скандинавской модой, в ее положительной фазе, связано усиление межширотного обмена и вторжение арктического воздуха на юг, вплоть до субтропиков, на территорию ЕЧР он чаще переносится со значительной восточной составляющей из Сибири. Отсюда, пространственное распределение аномалий осадков, связанных с этой циркуляционной модой, имеет зональный характер, как и в случае аномалий NAO, когда оно связано с усилением западного переноса. Ее сильное влияние отмечается в бассейне Северной Двины, где отмечается отрицательная корреляция, ниже -0.6 , в бассейнах Печоры, Камы и Верхней Волги оно также достаточно заметно.

В многолетнем ходе прослеживаются существенные различия в структуре изменчивости Скандинавской моды. В 1950–2000 гг. основной вклад вносят межгодовые колебания и флуктуации от 7 до 15 лет, с периодом положительных аномалий с середины 1960-х до 1980-х годов, а также в середине 1980-х годов, а с начала 1990-х годов изменчивость существенно снижается, основной вклад вносят межгодовые колебания и небольшой тренд до середины 2010-х годов. Интересно, что в случае теплого периода многолетний ход индекса Scand (см. рис. 6е) также демонстрирует существенные изменения структуры колебаний с переломом около 1990-х годов — период положительной фазы, с максимумами в конце 1950-х — начале 1960-х и в середине 1970-х годов, сменяется на отрицательную в 1980–1990 гг., некоторый подъем к концу 1990-х и нисходящий тренд с минимумом в 2016 г. (см. рис. 6з). Корреляция между аномалиями Scand и суммами осадков в этот сезон (см. рис. 6ж) достаточно четко проявляется в западной части бассейна Северной Двины, а также затрагивает Верхнюю Волгу и истоки Камы.

Область корреляции зимних осадков с модой PNA, в противофазе, выходит со стороны Полярного Урала и ограничена небольшой территорией, но она включает в себя верховья крупнейших рек северной части ЕТР — Северной Двины, Печоры и Камы (см. рис. 6и). Благодаря близости к Уральскому хребту и обилию возвышенностей, эта территория является местом климатического максимума снегозапасов (Шмакин, 2010), что де-

лает ее важнейшей стокообразующей областью. В свою очередь это означает, что аномалии зимних осадков в ее пределах способны вносить значительный вклад в изменчивость стока перечисленных рек. Многолетний ход индекса PNA, как и Scand (см. рис. 6к), демонстрирует неоднородность — до начала 1980-х наблюдается высокая межгодовая изменчивость с флуктуациями (около 10 и более лет) и преобладанием отрицательной фазы (с минимумами в середине 1950-х, в конце 1960-х и начале 1970-х годов). С начала 1980-х годов колебания PNA происходят возле нулевого значения, низкочастотная составляющая (с периодом более 10 лет) сохраняется, но общая изменчивость существенно сокращается.

Тенденции крупномасштабной циркуляции в многолетней изменчивости речного стока. Влияние атмосферной циркуляции, в частности наиболее значимых для рассматриваемой территории циркуляционных механизмов на распределение осадков на территории ЕТР, проиллюстрированное рис. 6, очевидно оказывает на речной сток суммарное влияние. При этом, в аномалиях стока ожидаемо проявляется роль циркуляционной моды, наиболее тесно связанной с аномалиями осадков в пределах того или иного водосбора. Примером является вклад Скандинавской моды в изменчивость осадков на водосборе Северной Двины, проявления которого отчетливо прослеживаются в колебаниях годового стока после фильтрации высокочастотной составляющей путем 3-летнего скользящего осреднения (рис. 7а). Многолетние изменения индекса Scand, осредненного за теплый период (июнь—октябрь) и зимние месяцы (январь—март), которые оказывают влияние на изменения осадков в бассейне Северной Двины (см. рис. 6е, з), но и объясняют тенденции и продолжительные аномалии годового стока, с учетом их корреляции в противофазе (см. рис. 7а).

Регрессионные оценки указывают на статистически значимый вклад индекса Scand, за декабрь—март и июнь—октябрь. Они суммарно объясняют 33% изменчивости стока (табл. 4). Тем не менее, сравнение многолетних изменений стока, полученного из данных наблюдений, и рассчитанного по регрессионной модели с включением индекса Scand за указанные сезоны, показывает, что колебания Скандинавской моды хорошо описывают низкочастотные и квазидесятилетние флуктуации, включая смену тенденций, в 1970-х и 1990-х годах, и маловодье середины 1970-х годов (рис. 7б). Гораздо хуже воспроизводятся пики водности в 1953 и 1954 гг., а также в 1990-х годах, когда они, вероятно, связаны с положительной фазой NAO (см. рис. 6а, б), но согласно регрессионным оценкам, вклад индекса NAO в целом за рассматриваемый период статистически незначим. Многолетние колебания моды PNA, описы-

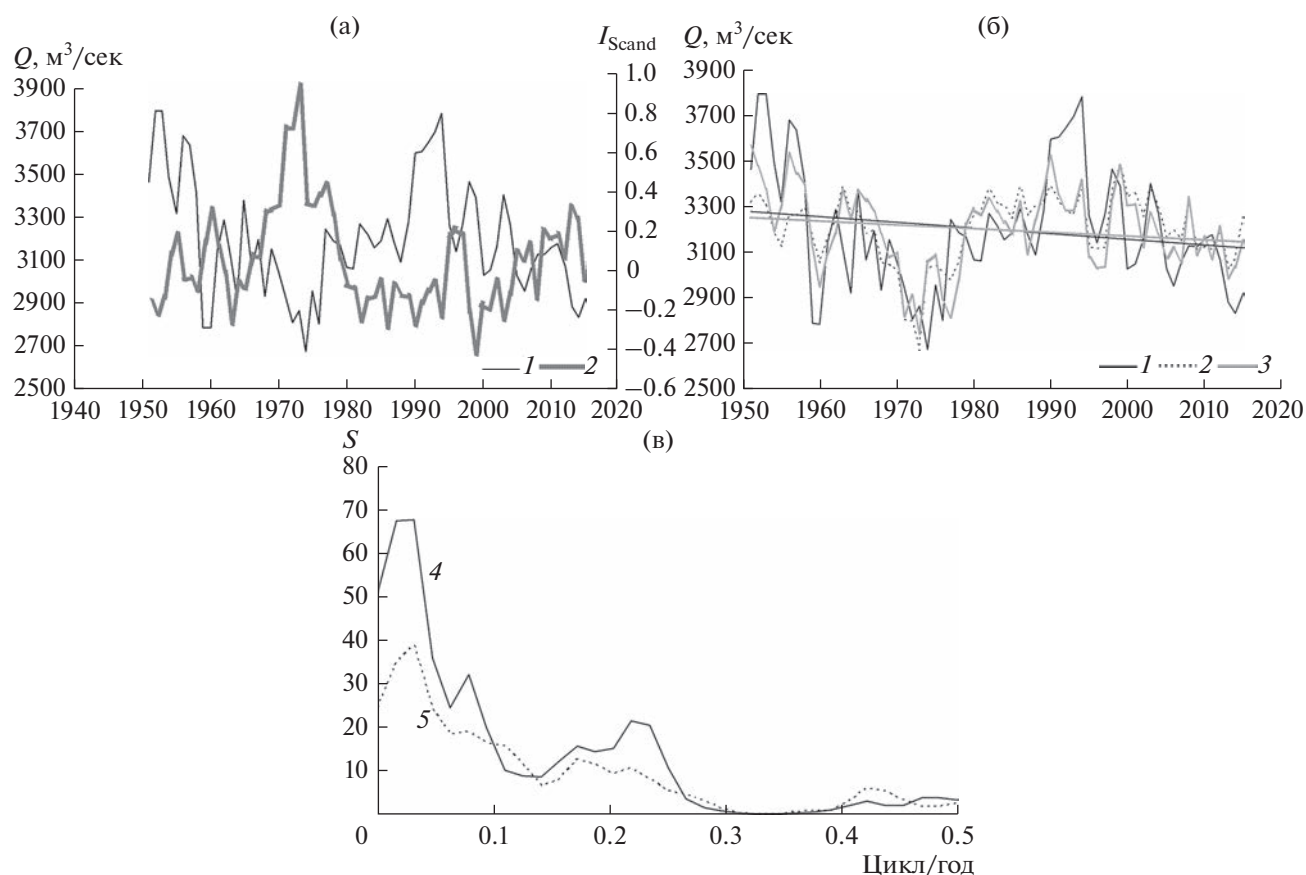


Рис. 7. Вклад крупномасштабной атмосферной циркуляции в изменчивость годового стока Северной Двины. а — Годовой сток Северной Двины по данным наблюдений, 1, и многолетний ход индекса Scand (в среднем за январь—март и июнь—октябрь), 2; б — годовое сток Северной Двины по данным наблюдений, 1, и рассчитанный на основе регрессионной зависимости с учетом индексов Scand (декабрь—март и июнь—октябрь), 2, а также с учетом индекса PNA (декабрь—март), 3; в — функции спектральной плотности годового стока Северной Двины (после 3-летней фильтрации) по данным наблюдений, 4, и рассчитанные на основе регрессионной зависимости с индексами Scand и PNA, 5. Показаны (а, б) 3-летние скользящие средние значения; прямыми линиями (б) показаны линейные тренды.

вающей, подобно Scand, ослабление зонального переноса и проявляющейся в поле зимних осадков (см. рис. би, к), напротив, вносят статистически значимый вклад (около 12%) в низкочастотную и квазидесятилетнюю изменчивость стока (см. табл. 4). Включение индекса PNA увеличивает долю

объясненной изменчивости до 45% и позволяет точнее описать увеличение водности Северной Двины в 1950-х годах и ее падение в 1960 г. (см. рис. 7б), флуктуации с периодом около 30–35 лет, а также нисходящий тренд годового стока за 1951–2015 гг.

Таблица 4. Параметры множественной регрессионной зависимости годового стока Северной Двины от индексов крупномасштабной атмосферной циркуляции за 1950–2015 гг.

Циркуляционный индекс	B	St. Error	R (накопленный)	$R^2\%$ (накопленная и индивидуальная)		t	p
$Scand_{DJFM}$	–310	80	0.47	22	22	–3.87	0.02
$Scand_{JJAS}$	–281	87	0.57	34	12	–3.21	0.03
PNA_{DJFM}	–199	53	0.67	45	11	–3.75	0.03

Примечания. B — коэффициент регрессии; St. Error — стандартная ошибка; R — коэффициент корреляции; R^2 — доля объясненной изменчивости; t — критерий Стьюдента; p — уровень статистической значимости.

Несмотря на относительно небольшую величину объясненной изменчивости, полученная регрессионная модель дает достаточно точное воспроизведение структуры изменчивости наблюдаемого стока. Сравнение спектров (рис. 7в) колебаний годового стока Северной Двины, полученных из наблюдений и рассчитанных по регрессионной модели с включением индексов Scand (за декабрь—март и июнь—октябрь) и PNA (за декабрь—март), в том и другом случае показывает максимум спектральной функции в области периодов около 35–40 лет (или частоты 0.02–0.03 цикл/год), а также локальное ее увеличение в области периодов 5–6 лет (или частоты 0.17–0.22). Это приводит к выводу о том, что вариациями крупномасштабной циркуляции, в частности циркуляционными модами, ответственными за ослабление зональной циркуляции и усиление межширотного обмена, можно объяснить структуру изменчивости стока Северной Двины в 1951–2015 гг. с характерными периодичностями 35–40 и 5–6 лет.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Анализ региональных и частотно-временных особенностей изменчивости атмосферных осадков, проведенный с учетом их сезонных вариаций, фазового режима и связей с крупномасштабной циркуляцией, позволяет диагностировать их проявления в изменениях годовых и средних месячных расходов в речных бассейнах, а также делать выводы о современных тенденциях осадков и крупномасштабной атмосферной циркуляции, значимых для сезонной структуры и многолетних изменений речного стока на ЕТР.

В основу анализа положена регионализация изменчивости годовых и сезонных сумм твердых и жидких осадков, включая жидкие осадки в период установления и разрушения снежного покрова, выполненная с применением разложения по эмпирическим ортогональным функциям, а также полученные для каждого из выделенных районов типы многолетнего хода осадков. Положение выделенных районов, в пределах которых колебания осадков связаны, варьирует от сезона к сезону, но их число для всех рассмотренных случаев остается постоянным и не превышает трех (при условии, что соответствующие им типы многолетнего хода объясняют не менее 50% общей изменчивости осадков в пределах каждого района). Очевидно, это характеризует масштабы пространственной связанности аномалий осадков и отражает их пространственную структуру, обусловленную особенностями атмосферной циркуляции (Попова, 2007, 2021).

Анализ частотно-временной структуры изменчивости осадков показывает, что для всех сезонов, независимо от фазы осадков, преобладаю-

щая доля связана с высокочастотной составляющей, т.е. с межгодовой изменчивостью, на фоне которой многолетние тенденции, т.е. тренды за 1972–2018 гг., как правило, статистически незначимы. Тем не менее на севере ЕТР, в бассейне Северной Двины, Мезени и Печоры, где доля линейного роста жидких осадков в конце осени — начале зимы составляет 10–25%, эти изменения оказываются достаточными для перераспределения фазового состава осадков, и как следствие — для формирования аномалий зимнего и объемов весеннего талого стока. Это подтверждается анализом осредненного по десятилетиям сезонного стока Северной Двины и Мезени, где с 1981 г. аномалии стока в октябре приобретают характер тенденции, причем после 2001 г. наблюдается максимальный с 1971 г. рост стока в октябре и не отмечавшаяся в предшествующие десятилетия (в случае стока Мезени, статистически значимая на уровне $p < 0.05$) аномалия в ноябре. В (Фролова и др., 2015б) этот период отмечается как крайне маловодный (с минимальным, менее 50% от среднего многолетнего, значением объема половодья в 2006 г.) и заметным, около недели, сокращением продолжительности половодья.

Южнее, потепление и рост жидких осадков в конце осени — начале зимы не менее чувствительны для гидрологического режима, но основной рост зимнего стока в бассейнах Оки и Белой происходил в 1981–2000-х годах (по данным Фроловой и др. (2015б) в бассейне Оки он оценивается в 40–60%) и сохранялся в течение зимы. В 2001–2019 гг. тенденция сохраняется, но с незначительным ростом, что указывает на переход к режиму частых оттепелей.

Тесная корреляция аномалий жидких осадков в октябре—декабре с температурой (ее максимум, 0.63–0.78, в зависимости от широты и континентальности наблюдается в ноябре или октябре) указывает на их связь с потеплением осени (Попова и др., 2018) и позволяет расценивать эти аномалии как тенденцию. Добавим, что 2014 г. был отмечен снижением водности⁸ Северной Двины и Волги, которому предшествовала не только малоснежная зима 2014 г., но и 5-летний период дефицита осадков в твердой фазе на фоне роста жидких осадков в конце осени — начале зимы.

Рост жидких осадков в феврале—апреле, который на юге и в средней полосе заметен с конца 1980-х годов, на севере — в последнее десятилетие, и их тесная корреляция с температурой приземного воздуха, свидетельствует о связи с потеплением периода снеготаяния. На севере корреляция достигает максимума в апреле (0.76), а в средней полосе прослеживается уже с конца зи-

⁸ Государственный доклад о состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2014 г. М.: НИИ-Природа, 2015. 270 с.

мы, достигая максимума в феврале—марте (0.68). Рост талого стока в начале сезона снеготаяния, в апреле в бассейнах Северной Двины и Мезени и в марте в бассейне Оки, который наблюдается в течение нескольких последних десятилетий с начала 1980-х годов, также следует расценивать как тенденцию, связанную с потеплением и сокращением сроков разрушения устойчивого снежного покрова (Попова и др., 2018).

Разнонаправленные тенденции годовых сумм твердых осадков — сокращение на западе и рост на востоке бассейна Волги, в весеннем стоке в Оки и Белой (в среднем по десятилетиям) практически не проявляются в многолетнем ходе максимальных расходов весеннего паводка (в среднем по десятилетиям). Рост весеннего стока в том и другом бассейне отмечался в 1981—2000 гг., с начала 2000-х годов он существенно сократился, что может быть связано с ростом повторяемости зимних оттепелей на фоне продолжающегося потепления⁹, а также с существенным, до 20%, дефицитом осадков теплого периода, который оказывает большое влияние на состояние речного бассейна к началу зимнего сезона. Учитывая высокие темпы летнего и осеннего потепления в южной половине ЕТР¹⁰, их влияние на состояние речных бассейнов в предзимний период можно расценивать как тенденцию, но этот вопрос требует дополнительного изучения. На севере, в бассейнах Северной Двины и Мезени, изменение средних месячных расходов воды в пик половодья, носит, скорее, колебательный характер, связанный с 20—25-летними флуктуациями твердых осадков; после существенного роста в 1990-х, в 2001—2019 гг. выраженных тенденций не наблюдается. В бассейне Мезени, расположенном ближе к теплеющему Баренцеву морю, в 1991—2000 гг. этот показатель был выше по сравнению с 1971—1980 гг., но из-за существенного сокращения расходов в июне увеличения талого стока не наблюдалось, а отмеченный рост видимо следует отнести к влиянию потепления Арктики на сокращение сроков снеготаяния. Оценки температурных трендов зимы и весны в этом районе показывают одни из наиболее высоких темпов потепления на территории России¹¹.

Анализ пространственного распределения корреляций зимних сумм атмосферных осадков с индексами атмосферной циркуляции свидетельствует, что их аномалии в бассейнах Северной Двины, Печоры, а также Камы и Средней Волги, тесно связаны с аномалиями давления над севе-

ром Скандинавского полуострова, описываемыми индексом Скандинавской моды и ответственными за ослабление зональной циркуляции и усиление интенсивности арктических вторжений на севере Евразии. Влияние этой моды прослеживается и в теплый период, наиболее четко оно проявляется в бассейне Северной Двины, особенно на водосборах ее левых притоков. Регрессионные оценки вклада Скандинавской моды (за теплый период и зимний сезон) в изменчивость годового стока Северной Двины, наряду с анализом спектральных функций наблюдаемого стока и рассчитанного на основе связи с циркуляционными индексами, показывают, что определяющим фактором формирования его аномалий в области периодичностей 5—6 и 35—40 лет является усиление/ослабление зонального обмена, описываемое этой циркуляционной модой в противофазе. В формировании указанных периодичностей участвуют отмеченные выше колебания твердых осадков с периодом около 20—25 лет, но в результате совокупного вклада осадков, а также испарения и инерционных процессов перераспределения влаги внутри бассейна в колебаниях годового стока они, по-видимому, преобразуются в более длительные флуктуации.

Подводя итог обсуждению полученных результатов, можно прийти к следующим заключениям.

— Изменения количества жидких осадков в периоды установления/разрушения снежного покрова коррелируют с температурой воздуха в указанные сезоны, и несмотря на отсутствие статистической значимости трендов, на всей территории ЕТР, включая северные бассейны Северной Двины и Мезени, оказываются достаточными для перераспределения фазового состава осадков и увеличения зимнего стока и объемов весеннего стока в начале половодья. Рост этих аномалий с начала 2000-х годов и связь с потеплением позволяет расценивать их как тенденцию.

— В росте максимальных расходов и объемов весеннего половодья Северной Двины и Мезени проявляются флуктуации накопленных за зиму твердых осадков с периодичностью около 20—25 лет, которые в основном определяются вариациями крупномасштабной циркуляции. Южнее на западе и на востоке Волжского бассейна, в бассейне Оки и Белой, сокращение объемов весеннего половодья с 2000-х годов связано с рядом факторов, в числе которых переход зим в режим частых оттепелей и рост зимнего стока. Определенный вклад может вносить снижение осадков теплого периода, который оказывает большое влияние на состояние речного бассейна к началу зимнего сезона. Этот вопрос требует дополнительных исследований.

— Полученные регрессионные и спектральные оценки вклада Скандинавской моды в изменчи-

⁹ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020. М., 2021. 104 с.

¹⁰ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020. М., 2021. 104 с.

¹¹ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020. М., 2021. 104 с.

вость годового стока Северной Двины показывают, что определяющим фактором его аномалий с периодичностью 5–6 и 35–40 лет является усиление/ослабление зонального переноса, описываемое этой циркуляционной модой в противофазе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках темы госзадания Института географии РАН АААА-А19-119022190173-2 (FMGE-2019-0009) и при поддержке РФФИ и БРФИ (грант № 20-51-00001).

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает признательность М.В. Сидоровой и А.Г. Георгиади за предоставленные данные.

FUNDING

The research was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences АААА-А19-119022190173-2 (FMGE-2019-0009) and was supported by the RFBR and BRFFI (grant no. 20-51-00001).

ACKNOWLEDGEMENTS

The author expresses gratitude to M.V. Sidorova and A.G. Georgiadi for the hydrological observations data provided.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Антропогенные и естественные изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек Российской Арктики // Водное хозяйство России. 2015. № 1. С. 14–31.
- Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М., Иголина М.И. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // Вода: химия и экология. 2013. № 4. С. 3–12.
- Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волга // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 75–85.
- Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79.
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-1-36-79>
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Зайцева И.С., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А. Климатические и антропогенные факторы в многолетних изменениях стока реки Волги // Водное хозяйство России. 2013. № 4. С. 4–19.
- Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Гидрологический режим и водные ресурсы // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. Гл. 2 / отв. ред. С.М. Семенов. М.: Росгидромет, 2012. С. 53–86.
- Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Джамалов Р.Г. Изменение водного баланса крупных речных бассейнов европейской части России // Водное хозяйство России. 2018. № 4. С. 36–47.
<https://doi.org/10.35567/1999-4508-2018-4-3>
- Попова В.В. Современные изменения температуры приземного воздуха на севере Евразии: региональные тенденции и роль атмосферной циркуляции // Изв. РАН. Сер. геогр. 2009. № 6. С. 59–69.
- Попова В.В. Вклад аномалий ледяного покрова Баренцева и Карского морей в изменение режима циркуляции и температуры Северной Евразии с середины 1990-х годов // Лёд и Снег. 2020. № 60 (3). С. 409–422.
<https://doi.org/10.31857/S2076673420030048>
- Попова В.В. Современные изменения климата в крупных речных бассейнах на западе России: региональная структура и связь с глобальными тенденциями // Климатические изменения и сезонная динамика ландшафтов: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2021. С. 94–103.
<https://doi.org/10.26170/KFG-2021-13>
- Попова В.В., Бабина Е.Д., Георгиади А.Г. Климатические факторы изменчивости стока Волги во второй половине XX–начале XXI вв. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 4. С. 63–72.
<https://doi.org/10.31857/S2587-55662019463-72>
- Попова В.В., Турков Д.В., Насонова О.Н. Оценки современных изменений снегозапасов в бассейне Северной Двины по данным наблюдений и моделирования // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 2. С. 238–253.
<https://doi.org/10.31857/S2076673421020082>
- Попова В.В., Ширяева А.В., Морозова П.А. Изменения характеристик снежного покрова на территории России в 1950–2013 годах: региональные особенности и связь с глобальным потеплением // Криосфера Земли. 2018. № XXII (4). С. 65–75.
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-4\(65-75\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-4(65-75))
- Семенов В.А. Связь аномально холодных зимних режимов на территории России с уменьшением площади морских льдов в Баренцевом море // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 3. С. 257–266.
<https://doi.org/10.7868/S000235151603010X>
- Фролова Н.Л., Гельфан А.Н., Киреева М.Б., Рец Е.П., Телегина Е.А. Анализ экстремальных гидрологических явлений в пределах бассейнов равнинных рек Европейской территории России // Научное обеспечение реализации “Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.”. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015 а. С. 51–57.
- Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Евстигнев В.М., Ефремова Н.А., Повалишников Е.С. Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории России и его изменение // Водное хозяйство России. 2015б. № 4. С. 4–20.
- Шмакин А.Б. Климатические характеристики снежного покрова Северной Евразии и их изменения в последние десятилетия // Лёд и Снег. 2010. Т. 1. № 1. С. 43–57.

- Шмакин А.Б., Турков Д.В., Михайлов А.Ю. Модель снежного покрова с учетом слоистой структуры и ее сезонной эволюции // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 4. С. 69–79.
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Telegina E.A. Winter Runoff Variations in European Russia // Wat. Res. 2015. Vol. 42. № 6. P. 758–765.
- Laine A., Nakamura H., Nishii K., Miyasaka T. A diagnostic study of future evaporation changes projected in CMIP5 climate models // Clim. Dyn. 2014. № 42. P. 2745–2761.
- Mori M., Kosaka Y., Watanabe M., Nakamura H., Kimoto M. A reconciled estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling // Nature Clim. Change. 2019. Vol. 9. № 2. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0379-3>
- Vihma T., Screen J., Tjernström M., Newton B., Zhang X., Popova V., Deser C., Holland M., Prowse T. The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts // J. of Geophys. Res.: Biogeosciences. 2016. Vol. 121. № 3. <https://doi.org/10.1002/2015JG003132>
- Popova V. Winter snow depth variability over northern Eurasia in relation to recent atmospheric circulation changes // Int. J. Climatol. 2007. Vol. 27. P. 1721–1733.

Current Trends of the Regime of Precipitation and Atmospheric Circulation over the River Basins in European Russia

V. V. Popova*, **

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: valeria_popova@mail.ru

**e-mail: popova@igras.ru

The current trends of changes in precipitation and large-scale atmospheric circulation, significant for the seasonal structure and long-term changes in runoff in river basins in the mid and in the north of European Russia, are discussed. Taking into account seasonal variations and the phase regime, the analysis of spatial and frequency-temporal features of precipitation changes is carried out, their connection with large-scale circulation, as well as manifestations in the changes in annual and average monthly discharge in the river basins Severnaya Dvina, Mezen, Oka, and Belaya rivers. Changes in the amount of liquid precipitation during the snow cover onset/offset seasons are correlated with the air temperature in these seasons, and despite the lack of statistical significance of trends, are sufficient for the redistribution of the phase composition of precipitation and, as a consequence, for the formation of anomalies of winter runoff and the growth of spring runoff at the period of the beginning of flood as well. The connection of the liquid precipitation anomalies during the transition seasons the ongoing warming allow as to consider them as a trend, in a contrast to the anomalies of maximum spring discharge and of spring flood volumes in the north of European Russia, which are mainly caused by variations of large-scale circulation and rather to have a fluctuation feature. The obtained regression and spectral estimates of the contribution of the Scandinavian mode to the annual runoff variability in the Severnaya Dvina basin show that the leading factor of its anomalies is the strengthening/weakening of the westerly transport described by this circulation mode in the opposite phase.

Keywords: precipitation, solid and liquid phase, multi-year variability, regional features, river runoff, inter-seasonal anomalies, large-scale atmospheric circulation

REFERENCES

- Alekseevskii N.I., Frolova N.L., Antonova M.M., Igonina M.I. Assessment of the impact of climate change on the water regime and river flow of the Volga basin. *Voda: Khimiya Ekologiya*, 2013, no. 4, pp. 3–12. (In Russ.).
- Alekseevskii N.I., Magritskii D.V., Mikhailov V.N. Anthropogenic and natural changes in hydrological restrictions for nature management in the deltas of the rivers of the Russian Arctic. *Vodn. Khozyaistvo Rossii*, 2015, no. 1, pp. 14–31. (In Russ.).
- Bolgov M.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D., Filimonova M.K., Filippova I.A. Modern changes in the minimum runoff in the rivers of the basin of the Volga river. *Meteorol. Gidrol.*, 2014, no. 3, pp. 75–85. (In Russ.).
- Frolova N.L., Gelfan A.N., Kireeva M.B., Rets E.P., Telegina E.A. Analysis of extreme hydrological phenomena within the basins of lowland rivers of the European territory of Russia. In *Nauchnoe obespechenie realizatsii "Vodnoi strategii Rossiiskoi Federatsii na period do 2020 g."* [Scientific Support for the Implementation of the "Water Strategy of the Russian Federation for the Period up to 2020"]. Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2015, pp. 51–57.
- Frolova N.L., Kireeva M.B., Agafonova S.A., Evstigneev V.M., Efremova N.A., Povalishnikova E.S. Intra-annual distribution of the flow of lowland rivers of the European territory of Russia and its change. *Vodn. Khozyaistvo Rossii*, 2015, no. 4, pp. 4–20. (In Russ.).
- Gelfan A.N., Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigorev V.Yu., Motovilov Yu.G., Gusev E.M. The impact of climate change on the annual and maximum

- flow of Russian rivers: assessment and forecast. *Fundamental'naya i Prikladnaya Klimatologiya*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 36–79. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-1-36-79>
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Zaitseva I.S., Kashutina E.A., Barabanova E.A. Climatic and anthropogenic factors in long-term changes in the flow of the Volga River. *Vodn. Khozyaistvo Rossii*, 2013, no. 4, pp. 4–19. (In Russ.).
- Georgievsky V.Yu., Shalygin A.L. Hydrological regime and water resources. In *Metody otsenki posledstviy izmenenii klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem. Glava 2* [Methods for Assessing the Consequences of Climate Change for Physical and Biological Systems. Chapter 2.]. Semenov S.M., Ed. Moscow: Rosgidromet, 2012, pp. 53–58.
- Grigorev V.Yu., Frolova N.L., Dzhamalov R.G. Changes in the water balance of large river basins of the European part. *Vodn. Khozyaistvo Rossii*, 2018, no. 4, pp. 36–47. (In Russ.).
<https://doi.org/10.35567/1999-4508-2018-4-3>
- Izvestiya*, <https://iz.ru/880522/evgeniia-priemskaya/bez-vody-vinovatyie-s-chem-svazano-vesennnee-obmele-nie-volgi> Internet resources, 2019.
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Telegina E.A. Winter Runoff Variations in European Russia. *Water Res.*, 2015, vol. 42, no. 6, pp. 758–765.
- Laine A., H. Nakamura, K. Nishii, and T. Miyasaka. A diagnostic study of future evaporation changes projected in CMIP5 climate models. *Clim. Dyn.*, 2014, no. 42, pp. 2745–2761.
- Mori M., Kosaka Y., Watanabe M., Nakamura H., Kimoto M. A reconciled estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling. *Nature Climate Change*, 2019, vol. 9, no. 2.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0379-3>
- Morskie vesti Rossii, <http://www.morvesti.ru/news/1679/55690/>
- Popova V.V. Winter snow depth variability over northern Eurasia in relation to recent atmospheric circulation changes. *Int. J. Climatol.*, 2007, vol. 27, pp. 1721–1733.
- Popova V.V. Modern changes in surface air temperature in the North of Eurasia: regional trends and the role of atmospheric circulation. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2009, no. 6, pp. 59–69. (In Russ.).
- Popova V.V., Shiriaeva A.V., Morozova P.A. Changes in the characteristics of snow cover on the territory of Russia in 1950–2013: regional features and connection with global warming. *Kriosfera Zemli*, 2018, no. 22 (4), pp. 65–75. (In Russ.).
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-4\(65-75\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-4(65-75))
- Popova V.V., Babina E.D., Georgiadi A.G. Climatic Factors of the Volga Runoff Variability in the Second Half of 20th – Early 21st Centuries. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2019, no. 4, pp. 63–72. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2587-55662019463-72>
- Popova V.V. Contribution of ice cover anomalies in the Barents and Kara seas to the circulation and temperature regimes of Northern Eurasia since the mid-1990s. *Led i Sneg*, 2020, vol. 60, no. 3, pp. 409–422. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2076673420030048>
- Popova V.V. Modern climate changes in large river basins in Western Russia: regional structure and relation to global trends. In *Klimaticheskie izmeneniya i sezonnaya dinamika landshaftov. Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Climatic Changes and Seasonal Dynamics of Landscapes. Materials of the All-Russia Scientific and Practical Conference]. Yekaterinburg, 2021, pp. 94–103.
<https://doi.org/10.26170/KFG-2021-13>
- Popova V.V., Turkov D.V., Nasonova O.N. Estimates of recent changes in snow storage in the river Northern Dvina basin from observations and modeling. *Led i Sneg*, 2021, vol. 61, no. 2, pp. 206–221. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2076673421020082>
- Semenov V.A. Connection of abnormally cold winter regimes in Russia with a decrease in the area of sea ice in the Barents Sea. *Izv. Akad. Nauk, Fizika Atmosfery i Okeana*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 257–266. (In Russ.).
<https://doi.org/10.7868/S000235151603010X>
- Shmakin A.B. Climatic characteristics of the snow cover of Northern Eurasia and their changes in recent decades. *Led i Sneg*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 43–57. (In Russ.).
- Shmakin A.B., Turkov D.V., Michailov A.Yu. Simulation of snow cover Model of snow cover taking into account the layered structure and its seasonal evolution. *Kriosfera Zemli*, 2009, vol. 13, no. 4, pp. 69–79. (In Russ.).
- Vihma T., Screen J., Tjernström M., Newton B., Zhang X., Popova V., Deser C., Holland M., Prowse T. The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts. *J. Geophys. Res.: Biogeosci.*, 2016, vol. 121, no. 3.
<https://doi.org/10.1002/2015JG003132>

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 911.52

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ В ЛАНДШАФТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

© 2023 г. А. К. Черкашин^а, *, А. А. Фролов^а, **

^аИнститут географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

*e-mail: cherk@mail.icc.ru

**e-mail: f-v1984@mail.ru

Поступила в редакцию 04.10.2022 г.

После доработки 25.10.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

На примере факторально-динамического анализа горно-таежных геосистем (ландшафтов) участка хр. Малый Хамар-Дабан (Западное Забайкалье) реализован метод анализа иерархий (МАИ) – логический и математический инструмент принятия решений в определении приоритетов альтернатив (ландшафтообразующих факторов) достижения цели (зональной нормы), их парном сравнении и выборе лучшей альтернативы с максимальным значением приоритета относительно главной цели. Совмещение алгоритма МАИ с факторально-динамическим анализом иерархии геосистем – геомеров (выделов фаций, групп и классов фаций) – показано на примере оценки эффекта факторного влияния на облик ландшафта по критерию территориального проявления фаций разных факторальных рядов (субгидролитоморфных, сублитоморфных, ксеролитоморфных и субгидроморфных). На основе расчета показателя, учитывающего приоритеты всех сравниваемых частных критериев разных уровней иерархии и критерий серийности геосистем, определена мера отклонения состояния отдельных выделов фаций от зональной нормы и создана карта ландшафтной изменчивости исследуемой территории в обобщенных показателях влияния факторов разного уровня.

Ключевые слова: геосистема, ландшафт, факторально-динамический подход, класс фаций, серийность геосистем, зональная норма, ландшафтная карта, метод анализа иерархий, ландшафтный анализ, хребет Малый Хамар-Дабан, Западное Забайкалье

DOI: 10.31857/S2587556623010053, **EDN:** LEZJXQ

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В результате маршрутных и стационарных исследований формируются базы данных географических характеристик и создаются ландшафтные карты, которые количественно анализируются с целью выявления скрытых закономерностей и решения задач прогнозирования и планирования. При этом используются методы статистической обработки, картометрии и квалиметрии – алгоритмы многомерной статистики (Пузаченко, 2004; Хорошев, 2016; Wheeler et al., 2004), например, при ландшафтном планировании (Хорошев, 2012).

В ландшафтно-экологических исследованиях все большее распространение (Huang et al., 2011; Linkov and Moberg, 2017) получает метод анализа иерархий (МАИ) (Саати, 1993). МАИ применяется для принятия решений по вопросам землепользования, использования лесных ресурсов (Kangas et al., 2015; The Analytic ..., 2001) и ресурсов грунтовых вод (Şener, 2015). Это логический и математический инструмент системного подхода к сложным проблемам принятия решений, хорошо формализуемый и реализуемый в компьютер-

ных программах с получением нетривиальных результатов при выборе наилучшей альтернативы действия (Ishizaka and Nemery, 2013). Вместе с тем в МАИ есть проблемы его теоретического обоснования, для решения которых предлагаются модели и методы многофакторной полезности (Dyer, 1990) и метатеоретического подхода (Черкашин, 2020).

Реализация процедур МАИ по постановке задач близка ландшафтному анализу (ЛА) (Преображенский, 1988). Он часто трактуется в широком смысле как ландшафтное исследование и картографирование территории для решения различных задач. Здесь мы понимаем ЛА по В.С. Преображенскому (1988): процедуры сравнения относительных достоинств различных участков местности по целевым критериям, факторам и условиям для оценочного картографирования территории по показателям ценности. Факторы находятся во взаимосвязи, которая определяет важность каждого фактора по отношению к остальным, что влияет на дифференциацию и возможное направление целевого использования территории. Выделяется доминирующий фактор и варианты его сочетания

с другими. Проводится сравнение достоинств участков по разным факторам и определяется наиболее значимый, приоритетный для конкретного вида землепользования. Итогом ЛА является карта сравнительной ценности местоположений с учетом целевой установки оценивания.

С этих позиций удобным для ЛА является факторально-динамический подход (анализ), развиваемый в рамках учения о геосистемах (Коновалова и др., 2005; Крауклис, 1969, 1979). Геосистемы (геомеры) топологически и типологически дифференцируются по степени разнообразного факторного влияния – видоизменяющего воздействия. Факторальные ряды задаются в координатах факторного пространства, где геосистемы ординируются по величине воздействия (серийности) – отклонения от коренной зональной нормы. Это определяет иерархию ареалов и типов местных геосистем по: 1) переменным состояниям (биогеоценозы, БГЦ); 2) вариантам серийности (фации); 3) серийности (группы фаций); 4) факторальности (факторальные ряды, классы фаций); 5) особенностям построения факторального пространства относительно зональной нормы (геомы). В историческом преобразовании ландшафта (географическом цикле) геосистемы зонального типа, с одной стороны, являются начальными “точками отсчета”, а с другой, – своеобразными “целями” развития с проявлением в ландшафтах зональных качеств при динамическом снятии факторной нагрузки, снижении серийности геосистем. Это положение рассматривается в качестве “постулата” факторально-динамического подхода в учении о геосистемах (Коновалова и др., 2005; Крауклис, 1969, 1979).

Ставится задача совместить процедуры МАИ с факторально-динамическим моделированием иерархии геосистем для развития средств ландшафтного анализа и ландшафтно-типологического картографирования участков территории с позиций их ценности для целевого использования, применяя ландшафтную карту как инвариантную основу территориального оценивания (Черкашин, 2006).

ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе принятия решений процедуры МАИ начинаются с построения иерархической структуры, которая включает цель, критерии, альтернативы и другие факторы, влияющие на выбор (Саати, 1993). Структурная модель (граф) отражает понимание поставленной проблемы. Для решения задачи во внимание принимаются разные количественные параметры и качественные характеристики, объективные данные и субъективные экспертные оценки. С помощью процедуры парных сравнений МАИ определяются приоритеты достижения цели и строится мат-

рица сравнений (суждений). Затем выполняется анализ матрицы и синтез всех приоритетов иерархии, рассчитываются приоритеты альтернатив относительно главной цели, а лучшей считается альтернатива с максимальным значением приоритета.

Проиллюстрируем этот алгоритм на примере эффекта факторного влияния на облик ландшафта по критерию территориального проявления (площади) фаций разных факторальных рядов (классов фаций).

Сравнительная оценка влияния факторов проводится для ландшафтов (геосистем) хр. Малый Хамар-Дабан (Западное Забайкалье) (рис. 1а). Участок исследования расположен на широком выположенном водоразделе и также захватывает части бассейнов р. Темник на северном макросклоне хребта (район оз. Таглей) и р. Торей (приток р. Джиды) на южном макросклоне. Хребет имеет сглаженный рельеф и относится к среднегорью (средняя высота – 1700 м над ур. м.). На водоразделе и в районе оз. Таглей развит выработанный денудационный тип рельефа в виде поверхностей выравнивания с плоскими водоразделами, на южном макросклоне – выработанный денудационно-эрозионный тип рельефа в виде крутых и средней крутизны склонов разных экспозиций. На относительно широких участках долин рр. Зун-Торей и Барун-Торей сформирован аккумулятивный тип рельефа в виде аллювиальных речных равнин (Государственная ..., 2009).

Территория входит в Джидинскую котловину-горную лесорастительную провинцию лиственничных лесов (Краснощевков, 2004). На плоских водоразделах, северных склонах возвышенностей и в верховьях рек представлена таежная елово-кедрово-лиственничная растительность. В пределах южных склонов и в нижних частях долины р. Торей распространены степи и лиственничные лесостепи. В широких заболоченных долинах ручьев в районе оз. Таглей развита лугово-болотная растительность с участками ерниковых зарослей (Фролов, 2020).

По физико-географическому районированию (Ландшафты ..., 1977), территория находится на стыке двух провинций Южно-Сибирской горной области: Хамар-Дабанской горнотаежно-котловинной и Селенгинско-Орхонской котловинно-среднегорной остепненной. Данный факт объясняет разнообразие природных условий и ландшафтов: горно-таежных, лесостепных, степных, а также луговых, лугово-болотных, ерниковых болотных в долинах рек и ручьев (Фролов, 2020).

На основе геоинформационной ландшафтно-типологической карты топологического уровня (БГЦ) (Фролов, 2020) построена серия производных карт изменчивости ландшафтов (см. рис. 1), отражающих разные ступени факторально-дина-

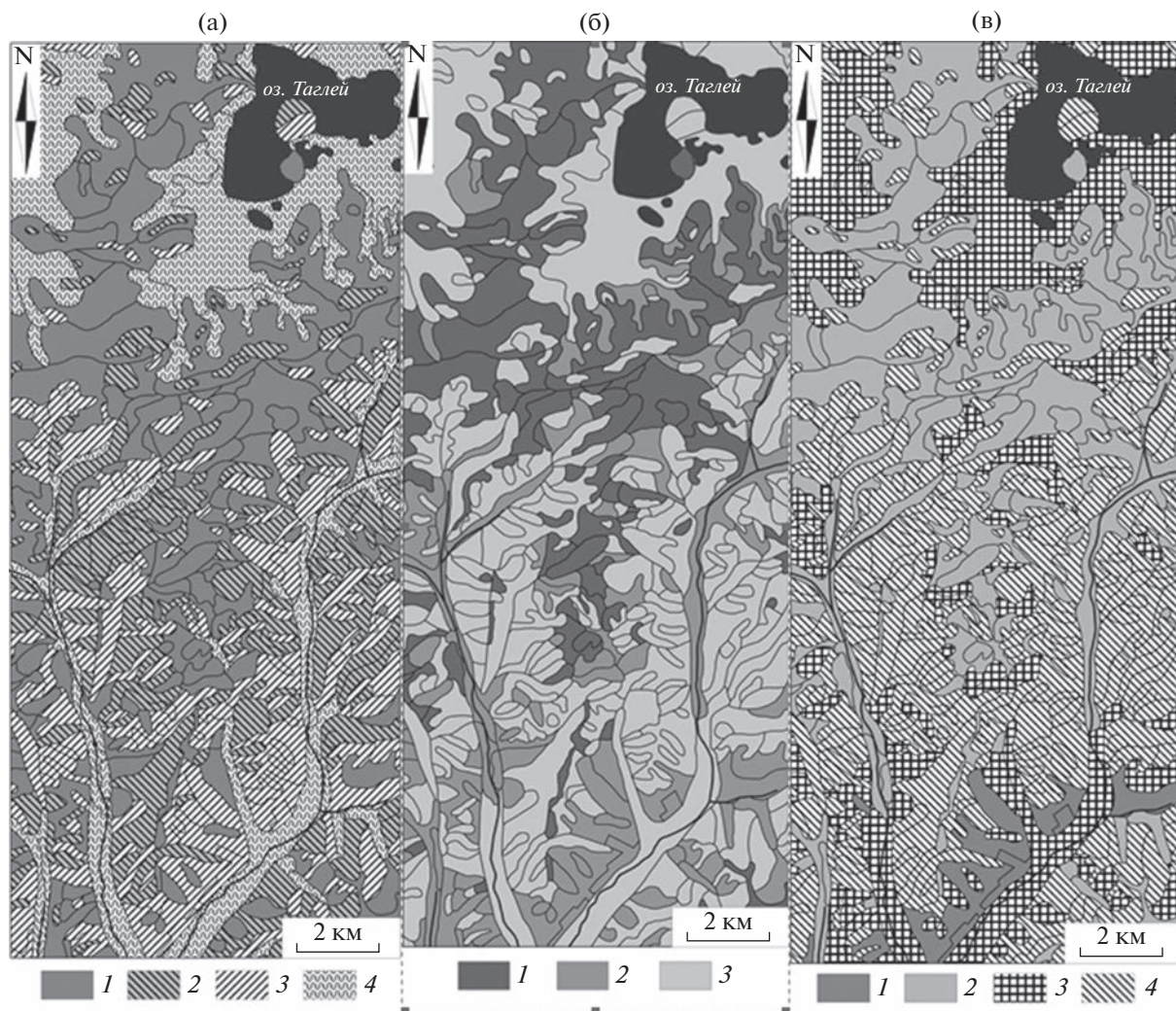


Рис. 1. Серия карт факторальной изменчивости геосистем на разных иерархических уровнях организации ландшафта хр. Малый Хамар-Дабан в окрестностях оз. Таглей: (а) классы (факторальные ряды) фаций: 1 – субгидролитоморфный, 2 – сублитоморфный, 3 – ксеролитоморфный, 4 – субгидроморфный; (б) разновидности группы фаций: 1 – коренные, 2 – мнимокоренные, 3 – серийные; (в) показатель отклонения состояния геосистем от зональной нормы P_{ik} , учитывающий приоритеты всех сравниваемых критериев разных уровней иерархии по грациям: 1 – от 2 до 9 включительно; 2 – от 10 до 17; 3 – от 18 до 38; 4 – от 39 до 54. Показаны границы контуров, соответствующие выделениям фаций.

мической иерархии геосистем: карта факторально-динамических рядов (классов фаций) (см. рис. 1а) и карта серийности (разновидностей групп фаций) (см. рис. 1б).

При анализе ландшафтной структуры территории и составлении карт учитываются ландшафтообразующие факторы – геолого-геоморфологический, гидрологический и термический факторы, а также их сочетания. Под их воздействием формируются географические фации нескольких факторально-динамических рядов (классов фаций) (см. рис. 1а): 1 – субгидролитоморфный (А); 2 – сублитоморфный (В); 3 – ксеролитоморфный (С); 4 – субгидроморфный (D) ряды. На территории исследования субгидролитоморфные

фации находятся на плоских водоразделах и приводораздельных территориях, выровненных возвышенных участках. Сублитоморфные фации формируются на крутых склонах главным образом северных экспозиций с неглубоким залеганием материнских горных пород. Ксеролитоморфные склоновые фации встречаются на крутых сухих склонах преимущественно южных экспозиций на каменистых почвах. Субгидроморфные фации распределены по долинам рек, ручьев, межгорным и водосборным понижениям, на заболоченных участках.

По степени серийности (см. рис. 1б) фации подразделяются на коренные, расположенные на плоских водоразделах и приводораздельных участках,

для парного сравнения следует из свойств первых интегралов уравнения (1) (Камке, 1966):

$$a_{ij} = \frac{dy_j}{dy_i} = \frac{y_j}{y_i}, \quad \frac{dy_i}{y_i} = \frac{dy_j}{y_j} = \alpha dt. \quad (6)$$

Это соотношение предполагает существование временных или пространственных тенденций изменения факторов и оценок вида $y_i = y_{0i} \exp(\alpha t)$, где y_{0i} — начальное значение y_i , α — константа. Если y_i — относительная высота местоположения, то при $\alpha > 0$ во времени идет дифференциация, при $\alpha < 0$ — выполаживание рельефа ландшафта, когда значение факторов влияния $y_i \rightarrow 0$ и $x_i \rightarrow x_0$ — стремится к зональной норме (базису эрозии x_0) в географическом цикле Дэвиса земной поверхности от момента тектонического поднятия ($\alpha > 0$) до ее эрозионного превращения ($\alpha < 0$) в равнинный пенепплен ($\alpha = 0$).

Техническая аналогия парного сравнения $a_{ij} = y_j/y_i$ — планетарный механизм (Планетарные..., 1977) передачи вращения, состоящий из нескольких зубчатых колес. В этом случае a_{ij} означает передаточное отношение числа зубцов y_j ведомой шестерни к числу зубцов y_i ведущей, т.е. на один оборот ведущей ведомая шестеренка отвечает a_{ij} оборотами. Очевидно, $a_{ji} = 1/a_{ij} = y_i/y_j$ — обратное передаточное отношение от j к i . В зависимости от подбора (переключения) размеров зубчатых колес возникают разные технологические эффекты передачи воздействия.

При решении задач синтеза приоритетов $f(\mathbf{y})$ по приоритетам нижележащего уровня $y_i(\mathbf{z})$, зависящих от частных факторов $\mathbf{z} = \|z_k\|$, используется формула суммирования, что следует из уравнения (1):

$$1 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{f(\mathbf{y})} \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_i} y_i = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{f(\mathbf{y})} \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_i} \sum_{k=1}^m \frac{\partial y_i(\mathbf{z})}{\partial z_k} \frac{z_k}{y_i},$$

$$1 = \sum_{i=1}^n \rho_i(\mathbf{y}) y_i \sum_{k=1}^m \rho_{ik}(\mathbf{z}) z_k, \quad (7)$$

$$\rho_i(\mathbf{y}) = \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_i} / f(\mathbf{y}), \quad \rho_{ik} = \frac{\partial y_i(\mathbf{z})}{\partial z_k} / y_i.$$

Например, определяется важность факторов на уровне классов фаций $\rho_i(\mathbf{y})$ и на уровне групп фаций разной степени k серийности $\rho_{ik}(\mathbf{z})$ относительно соответствующих факторальных рядов i .

МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Для исследуемых ландшафтов проведены парные сравнения a_{ij} ландшафтообразующих преимуществ каждого фактора (факторального ряда, классов фаций) по фундаментальной шкале (Саати, 1993) (табл. 1). Элементы a_{ij} матрицы-таблицы $\mathbf{A} = \|a_{ij}\|$ показывает во сколько раз фактор i важнее фактора j в заданном целевом отношении.

Таблица 1. Экспертная матрица $\mathbf{A}$ парного сравнения a_{ij}

a_{ij}	A1	B2	C3	D4
A1	1.0	2.0	2.0	2.0
B2	0.5	1.0	1.0	0.5
C3	0.5	1.0	1.0	1.0
D4	0.5	2.0	1.0	1.0
Сумма s	2.5	6.0	5.0	4.5

Примечание. Факторально-динамические ряды (классы фаций): A1 — субгидролитоморфный, B2 — сублитоморфный, C3 — ксеролитоморфный, D4 — субгидроморфный.

Схема сравнения представлена на рис. 2. Каждый объект-геосистема i характеризуется радиус-вектором $\mathbf{x}_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$) положения в глобальном факторном пространстве с началом координат в точке 0. Вектор $\mathbf{x}_0$ параметризует конкретную зональную среду и рассматривается в качестве начала локальной системы координат $\mathbf{y}_i = \|\mathbf{y}_i\|$ для вектора $\mathbf{y}_i$ каждого объекта. Понятно, что значения $\mathbf{y}_i$ в разных средах $\mathbf{x}_0$ будут отличаться. Разница векторов вида $\mathbf{y}_{32} = \mathbf{y}_3 - \mathbf{y}_2 = \mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_2$ задает отношение сравнения, которое количественно определяется соотношением размеров локальных (относительных) векторов $y_{23} \rightarrow a_{23} = y_3/y_2$, где $y_2 = \|\mathbf{y}_2\|$, $y_3 = \|\mathbf{y}_3\|$ — модули, длины векторов. Подчеркиваем, что в матрице $\mathbf{A} = \|a_{ij}\|$ сравниваются не абсолютные $x_i = \|\mathbf{x}_i\|$, а относительные $y_i = \|\mathbf{y}_i\|$ показатели (меры факторальной серийности). При этом сравнение идет с учетом заданной целевой функции $f(\mathbf{y})$, так что различные цели определяют разные значения элементов матрицы сравнения $\mathbf{A}$.

Элемент матрицы a_{ij} кодируется номерами (i, j) (или символами сравнения (A, C)) (см. рис. 2 и табл. 1). Например, по экспертной оценке, в исследуемом ландшафте территориально доминируют субгидролитоморфные фации A1 над субгидроморфными (A, D) примерно в два раза, т.е. с нормой замещения $a_{14} = 2$; обратная величина $a_{41} = 1/2 = 0.5$. Сравнение типа (A, A) соответствует $a_{11} = 1$.

При дальнейшей обработке по алгоритмам МАИ в матрице $\mathbf{A}$ сначала находятся суммы $\mathbf{s} = \|s_j\|$ элементов по столбцам j (см. табл. 1), и на эти суммы делятся значения элементов соответствующих столбцов $b_{ij} = a_{ij}/s_j$; $\mathbf{B} = \|b_{ij}\|$ — преобразованная матрица (табл. 2). Затем находится ρ_i — среднее значение суммы элементов по строкам новой матрицы. Набор $\mathbf{p} = \|\rho_i\|$ средних по всем категориям A1, B2, C3, D4 примерно соответствует собственному вектору этой матрицы $\mathbf{B}$ (вектору приоритетов). Расчетное собственное значение матрицы $\lambda = \mathbf{s}\mathbf{p}$ — скалярное произведение векторов, и в данном случае $\lambda = 4.06$. Точные значения $\mathbf{p} = \mathbf{p}_m$ и $\lambda = \lambda_m$ находятся как решения уравнения $\mathbf{B}\mathbf{p} = \lambda_m \mathbf{p}$

Таблица 2. Преобразованная матрица **B** парного сравнения b_{ij} и собственный вектор ρ матрицы **B**

b_{ij}	A1	B2	C3	D4	ρ_i
A1	0.40	0.33	0.40	0.44	0.39
B2	0.20	0.17	0.20	0.11	0.17
C3	0.20	0.17	0.20	0.22	0.20
D4	0.20	0.33	0.20	0.22	0.24
Сумма	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Таблица 3. Экспериментальная матрица **A** парного сравнения $a_{ij} = w_i/w_j$

a_{ij}	A1	B2	C3	D4	w_i
A1	1.00	1.68	1.49	1.45	0.34
B2	0.60	1.00	0.89	0.86	0.20
C3	0.67	1.12	1.00	0.97	0.23
D4	0.69	1.15	1.02	1.00	0.23
Сумма	2.96	4.95	4.41	4.28	1.00

Таблица 4. Преобразованная матрица **B** парного сравнения b_{ij} и вектор приоритетов ρ

b_{ij}	A1	B2	C3	D4	ρ_i
A1	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
B2	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
C3	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
D4	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Сумма	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

на собственное значение $\lambda_m = n$ и собственный вектор-столбец $\rho_m = \|\rho_m\|$, где n – порядок матриц **A** и **B** (число сравниваемых факторных категорий). По степени отклонения ρ от ρ_m и λ от $\lambda_m = n$ судят о точности экспертных оценок сравнения, согласованности (обоснованности) суждений, сохраняющей приоритеты. В данном случае $CI = 0.021$, что соответствует соотношению $CR = 10CI/RI = 0.24 < 1$, где $RI = 0.9$ – стандартное критическое значение CI при $n = 4$. Неравенство $CR < 1$ указывает на приемлемый результат сравнения факторов, что позволяет по максимальной величине ρ_{mi} выбирать из рассматриваемых альтернатив самый лучший i . По результатам расчета доминирование соответствует $\rho_{m1} = 0.39$ (см. табл. 2), т.е. на рассматриваемой территории основным ландшафтообразующим фактором является гидрогеологический, формирующий субгидролитоморфные условия функционирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Приведенные формулы позволяют точнее рассчитывать показатели, реализуемые в МАИ. В качестве весовых коэффициентов w_i имеет смысл рассматривать долю площади территории, относящейся к данному типу геосистем, например, классу фаций (табл. 3). Элементы матрицы **A** парного сравнения тогда рассчитываются по формуле (5). В этом случае приоритеты $\rho_i = w_i$ (табл. 4). Столбцы матрицы сравнения **B** эквивалентны вектору ρ , откуда $\lambda = \lambda_m = n = 4.0$ и $CR = CI = 0$.

В табл. 3 представлены коэффициенты парного сравнения a_{ij} относительно показателя приоритета территориального проявления (площади) w_i действия ландшафтообразующих факторов; a_{ij} – коэффициенты замещения факторов, при которых сохраняется постоянство геосистемной функции $f(y)$ и соответственно – ландшафтной структуры территории. Значения коэффициентов замещения по преобладанию $a_{ij} > 1$ варьируют от 1 до 1.7. В качестве целевой функции $f(y)$ в данном случае можно использовать показатель (3) среднего значения серийности по каждому ведущему фактору y_i в группе фаций в сопоставимых по масштабу и размерности величин, например в центрированных и нормированных переменных $y_i = (x_i - x_{cp})/\sigma_i$ или в соответствующих баллах градаций видоизменяющего факторного влияния.

Для расчета площади разных геосистем векторные карты ГИС (см. рис. 1) переводятся в растровые изображения и определяется соотношение пикселей, относящееся к геосистемам данного типа согласно легенде. По растровым картам создается матрица попиксельных переходов (пространственного соседства) $N = \|n_{ij}\|$ из одного геосистемного контура в другой (табл. 5). Такой переход имеет смысл пространственного замещения факторного влияния i на j , при котором не меняется общая площадь территории. В n_{ij} случаях перехода пиксели остаются в пределах одного контура типа i , не выходят за его пределы, а в n_{ji} случаях выходят за границу данного контура в направлении j -го контура с частотой $p_{ij} = n_{ij}/n_i$ (см. табл. 5), где n_i – сумма n_{ij} по строкам. Сравнение частоты прямого p_{ij} и обратного p_{ji} перехода дает коэффициент замещения $a_{ij} = p_{ji}/p_{ij} = (n_{ji}/n_j)/(n_{ij}/n_i) = (n_{ji}/n_{ij})(n_i/n_j)$. При равенстве числа случаев взаимного замещения n_{ji}/n_{ij} коэффициент парного сравнения будет равен $a_{ij} = n_i/n_j$ – соотношению площадей разных классов фаций, как в рассмотренном случае (см. табл. 3 и 4). Примерно так получается для матрицы переходов (соседства), что приводит к сравнимым оценкам приоритетов ρ_i (см. табл. 4) ($R = 0.90$).

В МАИ смысл иерархического анализа состоит в том, что элементы вышележащего уровня

рассматриваются в качестве основания для сравнения преимуществ нижележащих элементов (Сати, 1993). В нашем случае предполагается, что главной целью географического развития (территориальной самоорганизации) является максимальное проявление в ландшафтах зональных качеств, близость геосистем к зональной норме (рис. 3). Факторные критерии, соответствующие факторальные ряды и классы фаций сопоставляются относительно данной цели, как показано выше, с определением приоритетов пространственного доминирования (встречаемости) с расчетом коэффициентов замещения. На третьем уровне сравниваются серийные ряды фаций по группам фаций (коренные $S1$, мнимокоренные $S2$ и серийные $S3$) относительно особенностей каждого класса фаций ($A1$, $B2$, $C3$ и $D4$) по критерию значимости их отклонения от зональной нормы. На четвертом нижнем уровне сравниваются отдельные участки территории, относящиеся к выделам фаций (БГЦ), по критериям серийности и факторальности — степени и направленности видоизменяющего воздействия факторов. Последнее позволяет создавать тематические оценочные карты (см. рис. 1в) по величине целевой функции, используя возможности ГИС-технологий (Lu Li et al., 2009).

В принятой иерархии (см. рис. 3) для оценки приоритетов на третьем уровне групп фаций необходимо построить 4 матрицы парного сравнения по особенностям каждого класса фаций по показателям замещения меры серийности в геосистемах соответствующего факторального ряда, исходя из понимания их динамических свойств. Примем меру серийности z_k коренных фаций $S1$ за 1, мнимокоренных $S2$ — 2, серийных $S3$ — 3 по степени факторальной изменчивости. Для оценки коэффициентов замещения используются ландшафтные описания критериев и альтернатив. Так, в ареалах субгидролитоморфных фаций $A1$ водоразделов и плоских приводораздельных территорий доминируют коренные геосистемы, поэтому принимается $a_{11} = 1$, $a_{12} = 1$, $a_{13} = 2$, $a_{21} = 1$, $a_{31} = 1/2$. Напротив, ксеролитоморфные фации $C3$ крутых сухих склонов характеризуются высокой факторной изменчивостью и преобладанием серийных фаций: $a_{33} = 1$, $a_{31} = 9$, $a_{32} = 6$, $a_{13} = 1/9$, $a_{23} = 1/6$ (табл. 6).

Обработка 4-х матриц сравнения сначала проводится по общей схеме с вычислением приоритетов ρ_{ik} по каждой группе фаций k относительно конкретного факторального ряда i . Рассчитанные значения имеют достоверный показатель согласованности CR . Затем на основе (7) при $y_i = 1$ и $z_k = 1$ по формуле $\rho_k = \sum_{i=1}^n \rho_{ik}$ проводится распределенный синтез приоритетов (табл. 7). В данном случае приоритет — это доминирование фаций разных групп серийности по встречаемости

Таблица 5. Матрица частоты переходов (соседства) $p_{ij} = n_{ij}/n_i$

a_{ij}	$A1$	$B2$	$C3$	$D4$	Сумма
$A1$	0.959	0.014	0.015	0.011	1.000
$B2$	0.023	0.942	0.025	0.009	1.000
$C3$	0.022	0.022	0.946	0.010	1.000
$D4$	0.017	0.008	0.010	0.965	1.000
Сумма	1.022	0.987	0.996	0.995	4.000

Таблица 6. Матрицы парных сравнений a_{ik} и приоритеты ρ_{ki} серийных рядов

$A1$	$S1$	$S2$	$S3$	ρ_{ki}	$B2$	$S1$	$S2$	$S3$	ρ_{ki}
$S1$	1.0	1.0	2.0	0.41	$S1$	1.0	0.5	0.2	0.12
$S2$	1.0	1.0	1.0	0.33	$S2$	2.0	1.0	0.3	0.23
$S3$	0.5	1.0	2.0	0.26	$S3$	5.0	3.0	1.0	0.65
$C3$	$S1$	$S2$	$S3$	ρ_{ki}	$D4$	$S1$	$S2$	$S3$	ρ_{ki}
$S1$	1.0	0.5	0.1	0.08	$S1$	1.0	1.0	0.3	0.21
$S2$	2.0	1.0	0.2	0.14	$S2$	1.0	1.0	0.5	0.24
$S3$	9.0	6.0	1.0	0.78	$S3$	3.0	2.0	1.0	0.55

на территории. В горно-таежном ландшафте Малого Хамар-Дабана преобладают серийные фации (52%), а коренные фации, близкие к зональной норме, занимают только 23%, что определяет степень местного достижения цели ландшафтного развития в географическом цикле. Сравнения ведутся с учетом величины известной площади проявления групп и классов фаций на территории как меры приоритета и контроля за качеством определения норм замещения факторов a_{ij} с позиции сохранения размера ландшафта. Возможно применение иных целевых функций вида (1)–(3), в которых так или иначе используются

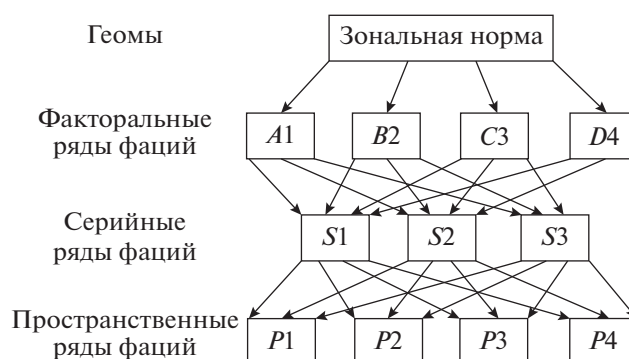


Рис. 3. Схема-граф анализа иерархии геосистем по факторальным характеристикам (пояснения см. в тексте).

Таблица 7. Распределенный синтез ρ_k частных приоритетов ρ_{ki}

	<i>A1</i>	<i>B2</i>	<i>C3</i>	<i>D4</i>	Сумма
ρ_i	0.34	0.20	0.23	0.23	1.00
ρ_{ki}					
<i>S1</i>	0.41	0.12	0.08	0.21	
<i>S2</i>	0.33	0.23	0.14	0.24	
<i>S3</i>	0.26	0.65	0.78	0.55	
$\rho_i \rho_{ki}$					ρ_k
<i>S1</i>	0.14	0.02	0.02	0.05	0.23
<i>S2</i>	0.11	0.05	0.03	0.06	0.25
<i>S3</i>	0.09	0.13	0.18	0.13	0.52
P_{ik}					z_k
<i>S1</i>	14	2	2	5	1
<i>S2</i>	22	9	7	11	2
<i>S3</i>	27	39	54	38	3

данные пространственной структуры ландшафта в качестве весовых значений w_i .

Картографирование отклонения состояния геосистем от зональной нормы проводится по показателю $P_{ik} = 100\rho_i\rho_{ki}z_k$, учитывающему приоритеты всех сравниваемых критериев разных уровней иерархии и критерий серийности z_k (см. табл. 7, рис. 1в) по каждому участку (выделу фаций). Сравнительный ландшафтный анализ участков проводится по соотношению $a_{ij} = P_{ik}/P_{jk} = y_j/y_i$, соответствующему норме замещения факторов y_j и y_i согласно уравнению (6) при постоянных значениях отклонений y_i и y_j и одинаковых z_k .

На основе полученных соотношений можно решать различные задачи прогнозирования и управления, связанные с увеличением важности того или иного критерия факторальной изменчивости, например, определить ландшафтную структуру при увеличении в два раза значимости коренных геосистем в географическом цикле или в результате хозяйственного освоения. По расчетам в ландшафте Малого Хамар-Дабана это приведет к увеличению площади коренных фаций в разных классах на 11%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны новые количественные методы ландшафтного анализа, основанные на математических моделях МАИ сравнения относительных достоинств различных участков местности по разным критериям факторного влияния и целевым функциям оценивания. Взаимосвязи, определяющие важность каждого фактора по отношению к остальным, задаются величиной парного сравнения — нормы замещения одного фактора другим, при

котором сохраняется величина выбранной оценки. На примере горно-таежных ландшафтов Малого Хамар-Дабана в процедурах ландшафтного анализа реализуется факторальный подход с оценкой приоритетов влияния ландшафтообразующего влияния факторов разного уровня иерархии и пространственного проявления соответствующих классов и групп фаций в показателях отклонения состояния геосистем от целевой зональной нормы. Применение ландшафтной карты позволяет выяснить, какие группы фаций имеют наибольшее значение в формировании структуры ландшафта. Здесь важно, что в одном ключе рассматривается методическая (МАИ), топологическая (соседство), типологическая (систематика) и факторальная иерархия.

Исходим из гипотезы, что главной целью географического развития (самоорганизации) является максимальное проявление в ландшафте зональных качеств (зональной нормы). По этой причине в основе ландшафтного анализа лежат относительные показатели состояния геосистем, рассчитанные относительно коренного состояния местной среды $y_i = x_i - x_{0i}$ и относительно друг друга $a_{ij} = y_j/y_i$. В последнем случае — это нормы замещения разноуровневых факторов y_i и y_j , от величины которых зависит величина оценочной функции и сохранение ее постоянного значения $f(y)$ — геосистемного инварианта состояния ландшафта. Сложные, на первый взгляд, процедуры МАИ, свободно реализуются, если действовать по образцу предлагаемого алгоритма, используя и количественный и качественный подходы при оценке, дающие сопоставимые результаты анализа.

С использованием модели МАИ появляется возможность сопоставить временные и пространственные тенденции изменения влияния факторов на целевые функции в процессе реализации географического цикла развития рельефа и хозяйственного освоения территории. Это позволяет решать различные задачи прогнозирования и управления, связанные с увеличением важности критериев факторально-динамической изменчивости и трансформацией облика ландшафта. На основе расчета частных приоритетов определяется мера отклонения состояния отдельных выделов фаций от зональной нормы и создается карта ландшафтной изменчивости исследуемой территории в обобщенных показателях, учитывающих влияние факторов разного иерархического уровня.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ госрегистрации темы АААА-А21-121012190056-4).

FUNDING

The study was carried out within the framework of the state task (state registration number of the task AAAA-A21-121012190056-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Л. М_48 — Улан-Удэ. Объяснительная записка / под ред. Е.А. Зотова. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2009. 272 с. (Уч.-изд. л. 24).
- Камке Э. Справочник по дифференциальным уравнениям в частных производных первого порядка. М.: Наука, 1966. 256 с.
- Коновалова Т.И., Бессолицына Е.П., Владимиров И.Н. и др. Ландшафтно-интерпретационное картографирование / отв. ред. А.К. Черкашин. Новосибирск: Наука, 2005. 424 с.
- Краснощечков Ю.Н. Почвозащитная роль горных лесов бассейна озера Байкал. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 223 с.
- Крауклис А.А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 232 с.
- Крауклис А.А. Структурно-динамический функциональный анализ южно-таежного ландшафта Нижнего Приангарья / Южная тайга Приангарья. Л.: Наука, 1969. С. 32–119.
- Крутько В.Н., Пегов С.А., Хомяков Д.М., Хомяков П.М. Формализация оценки качества компонентов окружающей среды. М.: ВНИИ системных исследований, 1982. 36 с.
- Ландшафты юга Восточной Сибири: Карта м-ба 1 : 1500000 / ред. О.П. Космакова, В.С. Михеев. М.: ГУГК, 1977. 4 л.
- Планетарные передачи. Справочник / ред. В.Н. Кудрявцев, Ю.Н. Кирдяшев. Л.: Машиностроение, 1977. 536 с.
- Преображенский В.С. Основы ландшафтного анализа. М.: Наука, 1988. 191 с.
- Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Асадемия, 2004. 408 с.
- Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
- Сошникова Л.А., Тамашевич В.Н., Уебе Г., Шефе М. Многомерный статистический анализ в экономике. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 1999. 598 с.
- Фролов А.А. Геоинформационно-картографический анализ изменчивости геосистем юго-западного Забайкалья // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 2. С. 7–17.
- Хорошев А.В. Географическая концепция ландшафтного планирования // Изв. РАН. Сер. геогр. 2012. № 4. С. 103–112.
- Хорошев А.В. Полимасштабная организация географического ландшафта. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 416 с.
- Черкашин А.К. Инвариантность пространственной структуры ландшафта // Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика. М.: Геогр. фак-тет МГУ, 2006. С. 60–64.
- Черкашин А.К. Математические аспекты реализации метода анализа иерархий // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 1 (17). С. 5–24.
- Черкашин А.К. Метатеоретическое системное моделирование природных и социальных процессов и явлений в неоднородной среде // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 61–84.
- Chandio I.A., Matori A.N.B., WanYusof K.B., Talpur M.A.H., Balogun A.L., Lawal D.U. GIS-based analytic hierarchy process as a multicriteria decision analysis instrument: a review // Arabian J. Geosci. 2013. № 6. P. 3059–3066.
- Dalgaard P. Introductory Statistics with R. NY, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Publ., 2002. 363 p.
- Dyer J.S. Remarks on the analytic hierarchy process // Management Sci. 1990. Vol. 36. № 3. P. 249–258.
- Huang I.B., Keisler J., Linkov I. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends // Sci. of the Total Environ. 2011. Vol. 409. P. 3578–3594.
- Ishizaka A., Nemery P. Multi-Criteria Decision Analysis. Methods and Software. John Wiley & Sons, Ltd., 2013. 296 p.
- Kangas A., Kurttila M., Hujala T., Eyvindson K., Kangas J. Decision Support for Forest Management. Springer Int. Publ., 2015. 307 p.
- Linkov I., Moberg E. Multi-Criteria Decision Analysis: Environmental Applications and Case Studies. CRC Press, 2017. 112 p.
- Lu Li, Zhi-Hua Shi, Wei Yin, Dun Zhu, Sai Leung Ng, Chong-Fa Cai, A-Lin Lei. A fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to eco-environmental vulnerability assessment for the Danjiangkou reservoir area, China // Ecol. Modelling. 2009. № 220. P. 3439–3447.
- Şener E., Şener S. Evaluation of groundwater vulnerability to pollution using fuzzy analytic hierarchy process method // Environ. Earth Sci. 2015. № 73. P. 8405–8424.
- The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making // Managing Forest Ecosystems. Vol. 3. Schmoldt D., Kangas J., Mendoza G.A., Pesonen M. (Eds.). Springer, 2001. 307 p.
- Wheeler D., Shaw G., Barr S. Statistical techniques in geographical analysis. London: David Fulton, 2004. 342 p.

Methods of Analytic Hierarchy Process in Landscape Research

A. K. Cherkashin^{1, *} and A. A. Frolov^{1, **}

¹*Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia*

**e-mail: cherk@mail.icc.ru*

***e-mail: f-v1984@mail.ru*

Using the case of factorial-dynamic analysis of mountain-taiga geosystems (landscapes) of the Maly Hamar-Daban ridge section (Western Transbaikalia), the Analytic Hierarchy Process (AHP) method is implemented. These logical and mathematical tools of a system-hierarchical approach to complex decision-making problems consist in determining the priorities of alternatives (landscape-forming factors) to achieve the goal (zonal norm), their pairwise comparison and choosing the best alternative with the maximum priority value relatively to the main goal. The combination of the AHP algorithm with factorial-dynamic analysis of the hierarchy of geosystems—geomes (facies, groups, and classes of facies)—is shown on the case of assessing the effect of factor influence on the landscape by the criterion of territorial manifestation of facies of different factor series (subhydrolithomorphic, sublithomorphic, xerolithomorphic, and subhydromorphic). Based on the calculation of an indicator, that considers the priorities of all the compared particular criteria of different levels of hierarchy and the criterion of seriality of geosystems, a measure of deviation of the state of individual facies from the zonal norm was determined and a map of landscape variability of the studied territory was made in generalized indicators showing the influence of factors of different hierarchical levels.

Keywords: geosystem, landscape, factorial-dynamic approach, facies class, seriality of geosystems, zonal norm, landscape map, analytic hierarchy process, landscape analysis, Maly Hamar-Daban ridge, Western Transbaikalia

REFERENCES

- Chandio I.A., Matori A.N.B., WanYusof K.B., Talpur M.A.H., Balogun A.L., Lawal D. U. GIS-based analytic hierarchy process as a multicriteria decision analysis instrument: a review. *Arabian J. Geosciences*, 2013, no. 6, pp. 3059–3066.
- Cherkashin A.K. Invariance of the spatial structure of the landscape. In *Landshaftovedenie: teoriya, metody, regional'nye issledovaniya, praktika* [Landscape Science: Theory, Methods, Regional Studies, Practice]. Moscow: Fac. Geogr. Mos. State Univ., 2006, pp. 60–64. (In Russ.).
- Cherkashin A.K. Metatheoretical system modeling of natural and social processes and phenomena in a heterogeneous environment. In *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and Mathematical Technologies in Science and Management], 2019, no. 1 (13), pp. 61–84. (In Russ.).
- Cherkashin A.K. Mathematical aspects of the implementation of the hierarchy analysis method. In *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and Mathematical Technologies in Science and Management]. 2020, no. 1 (17), pp. 5–24. (In Russ.).
- Dalgaard P. *Introductory Statistics with R*. New York, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Publ., 2002. 363 p.
- Dyer J.S. Remarks on the analytic hierarchy process. *Management Sci.*, 1990, vol. 36, no. 3, pp. 249–258.
- Frolov A.A. GIS mapping analysis changeableness geosystems of the south-western Transbaikalia. *Geodeziya i Kartografiya*, 2020, vol. 81, no. 2, pp. 7–17. (In Russ.).
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. *Masshtab 1 : 1000000 (tret'e pokolenie)*. Ser. *Aldano-Zabaikal'skaya* [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (third generation). Series Aldano-Transbaikal]. List M_48 — Ulan-Ude. *Ob'yasnitel'naya zapiska* [Explanatory Letter], Zotov E.A., Ed. St. Petersburg: Kartograficheskaya Fabrika VSEGEI Publ., 2009. 272 p.
- Horoshev A.V. Geographic landscape planning concept. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2012, no. 4, pp. 103–112. (In Russ.).
- Horoshev A.V. *Polimasshtabnaya organizatsiya geograficheskogo landshafta* [Poly-scale Organization of the Geographic Landscape]. Moscow: KMK Scientific Partnership, 2016. 416 p.
- Huang I.B., Keisler J., Linkov I. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Sci. Total Environ.*, 2011, vol. 409, pp. 3578–3594.
- Ishizaka A., Nemery P. *Multi-Criteria Decision Analysis. Methods and Software*. John Wiley & Sons, Ltd., 2013.
- Kamke E. *Spravochnik po differentsial'nym uravneniyam v chastnykh proizvodnykh pervogo poryadka* [First Order Partial Differential Equations Handbook]. Moscow: Nauka Publ., 1966. 256 p.
- Kangas A., Kurttila M., Hujala T., Eyvindson K., Kangas J. *Decision Support for Forest Management*. Springer International Publ., 2015. 307 p.
- Konovalova T.I., Bessolicyna E.P., Vladimirov I.N. et al. *Landshaftno-interpretatsionnoe kartografirovanie* [Landscape Interpretation Mapping], Cherkashin A.K., Ed. Novosibirsk: Nauka Publ., 2005. 424 p.
- Krasnoshchekov Yu.N. *Pochvozaschitnaya rol' gornyykh lesov basseina ozera Baikal* [Soil-Protective Role of Mountain Forests in the Lake Baikal Basin]. Novosibirsk: SB RAS 2004. 223 p.
- Krauklis A.A. *Problemy eksperimental'nogo landshaftovedeniya* [Experimental Landscape Science Problems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1979. 232 p.

- Krauklis A.A. Structural-dynamic functional analysis of the southern taiga landscape of the Lower Angara region. In *Yuzhnaya taiga Priangar'ya* [Southern Taiga of the Angara Region]. Leningrad: Nauka Publ., 1969, pp. 32–119. (In Russ.).
- Krut'ko V.N., Pegov S.A., Khomyakov D.M., Khomyakov P.M. *Formalizatsiya otsenki kachestva komponentov okruzhayushchei sredy* [Formalization of Environmental Component Quality Assessment]. Moscow: Inst. Syst. Res. Publ., 1982. 36 p.
- Landshafty yuga Vostochnoi Sibiri. Karta masshtaba 1 : 1500000* [Landscapes of the South of Eastern Siberia. 1 : 1500000 scale map], Kosmakova O.P., Mikheev V.S., Eds. Moscow: GUGK Publ., 1977.
- Linkov I., Moberg E. *Multi-Criteria Decision Analysis: Environmental Applications and Case Studies*. CRC Press, 2017. 112 p.
- Lu Li, Zhi-Hua Shi, Wei Yin, Dun Zhu, Sai Leung Ng, Chong-Fa Cai, A-Lin Lei. A fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to eco-environmental vulnerability assessment for the Danjiangkou reservoir area, China. *Ecological Modelling*, 2009, no. 220, pp. 3439–3447.
- Planetarnye peredachi. Spravochnik* [Planetary Gears. Directory], Kudrjavcev V.N., Kirdjashev Yu.N., Eds. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1977. 536 p.
- Preobrazhenskij V.S. *Osnovy landshaftnogo analiza* [Basics of Landscape Analysis]. Moscow: Nauka Publ., 1988. 191 p.
- Puzachenko Ju.G. *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh* [Mathematical Methods in Environmental and Geographic Research]. Moscow: Academia Publ., 2004. 408 p.
- Saati T. *Prinyatie reshenii. Metod analiza ierarkhii* [Making Decisions. Hierarchy Analysis Method]. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 1993. 278 p.
- Şener E., Şener S. Evaluation of groundwater vulnerability to pollution using fuzzy analytic hierarchy process method. *Environ. Earth Sci*, 2015, no. 73, pp. 8405–8424.
- Soshnikova L.A., Tamashevich V.N., Uebe G., Shefe M. *Mnogomernyi statisticheskii analiz v ekonomike* [Multi-dimensional Statistical Analysis in Economics]. Moscow: YuNITI-DANA Publ., 1999. 598 p.
- The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making. Managing Forest Ecosystems. Vol. 3. Schmoldt D., Kangas J., Mendoza G.A., Pesonen M., Eds. Springer, 2001. 307 p.
- Wheeler D., Shaw G., Barr S. *Statistical techniques in geographical analysis*. London: David Fulton, 2004. 342 p.

УДК 551.79

ХРОНОЛОГИЯ КАРАНГАТСКОЙ ТРАНСГРЕССИИ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ДАТИРОВАНИЯ

© 2023 г. Д. В. Семиколенных^{a, b, *}, Р. Н. Курбанов^{a, b}, Т. А. Янина^{a, b}

^aИнститут географии РАН, Москва, Россия

^bМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: aristova@igras.ru

Поступила в редакцию 18.10.2021 г.

После доработки 06.07.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

В начале позднего плейстоцена в пределах современного Азово-Черноморского бассейна синхронно с межледниковой трансгрессией мирового океана развивалась карангатская трансгрессия. На основе анализа фаунистических комплексов бассейн был охарактеризован как самый теплый и полноводный бассейн позднего плейстоцена, с соленостью воды, значительно превышающей соленость современного Черного моря. Наиболее полная последовательность осадков трансгрессии обнаружена в разрезе Эльтиген, расположенном на западном побережье Керченского пролива. Разрез был неоднократно изучен. Большинство палеогеографических заключений о развитии карангатской трансгрессии дано на основе анализа его отложений. Однако ввиду большой протяженности, фациальной изменчивости разреза и недостатка геохронологических данных однозначного мнения о том, как соотносятся отложения в разрезе, какому количеству фаз карангатской трансгрессии они соответствуют, каков их возраст, до сих пор нет. Целью работы является получение хронологии осадконакопления южной (тобечикской) части стратотипического разреза Эльтиген, которая подавляющим большинством исследователей принимается за отложения первой фазы карангатской трансгрессии. Получено 17 люминесцентных датировок по кварцу (ОСЛ) и по полевым шпатам (ИКСЛ, pIRIR₂₉₀): девять из лагунно-морских и прибрежно-морских отложений и восемь из вышележащей лессово-почвенной толщи. Биостратиграфический анализ малакофауны подтвердил принадлежность вскрытых в разрезе морских отложений карангатской трансгрессии Черного моря. Результаты ОСЛ-датирования показали, что в южной части разреза Эльтиген выделяется три цикла лагунно-прибрежно-морского осадконакопления возрастом 135–130 тыс. л. (МИС 6–МИС5е), 130–115 тыс. л. (МИС 5е) и 115–95 тыс. л. (МИС 5d-с). Накопление верхней субаэральная толщи началось не ранее 95 тыс. л. н.

Ключевые слова: Керченский пролив, Эльтиген, оз. Тобечикское, поздний плейстоцен, малакофауна, микулинское межледниковье

DOI: 10.31857/S2587556623010156, **EDN:** LUTYUQ

ВВЕДЕНИЕ

В начале позднего плейстоцена в пределах современного Азово-Черноморского бассейна синхронно с межледниковой трансгрессией мирового океана развивалась карангатская трансгрессия. Первым описал отложения карангатского бассейна Н.И. Андрусов (1905), назвав их тирренскими по аналогии с одновозрастными террасами Средиземного моря. Позднее изучением карангатских отложений занимались П.В. Федоров (1963, 1978), Л.А. Невеская (1965), Н.С. Благоволин (1962), Х.А. Арсланов (Арсланов и др., 1972, 1983), Е.Ф. Шнюков (Геология ..., 1981), В.А. Зубаков (Zubakov, 1988), Г.И. Попов (1983), В.В. Янко (Янко и др., 1990), А.Л. Чепалыга (Динамика ..., 2002), В.Н. Шелкопляс и Т.Ф. Христофорова

(2007), Е.Н. Бадюкова (2009), А.А. Свиточ (2009), Т.А. Янина (2012, 2014), Р.Н. Курбанов (Курбанов и др., 2019, 2020), Д.В. Семиколенных (Семиколенных, Курбанов, 2020) и др. Карангатский бассейн большинством исследователей был охарактеризован как самый теплый и полноводный бассейн позднего плейстоцена с соленостью воды, значительно превышающей соленость современного Черного моря. Развитие карангатской трансгрессии проходило нелинейно, а с трансгрессивно-регрессивными фазами, что отражено в фациальной и фаунистической изменчивости ее осадков.

Отложения карангатской трансгрессии встречаются в естественных береговых обнажениях Болгарии, Восточного Крыма, Тамани, Кавказа,

Турции, скважинами вскрыты на шельфах Черного и Азовского морей, в устьевых областях крупных рек, в акватории Керченского пролива и в западной части Колхидской низменности.

Несмотря на то, что карангатским отложениям было дано название по мысу Карангат, где А.Д. Архангельским и Н.М. Страховым (1938) был выделен стратотип, еще Н.И. Андрусовым (1905) было установлено, что наиболее полная последовательность осадков карангатской трансгрессии, вскрывающихся в береговых обнажениях, представлена в разрезе Эльтиген, расположенном на западном побережье Керченского пролива.

Разрез Эльтиген был неоднократно изучен практически всеми вышеуказанными исследователями, множество палеогеографических заключений о развитии карангатской трансгрессии дано на основе анализа его отложений. Однако ввиду большой протяженности, фациальной изменчивости разреза и недостатка геохронологических данных однозначного мнения о том, как соотносятся отложения в разрезе, какому количеству фаз карангатской трансгрессии они соответствуют, каков их возраст, до сих пор нет. Широко распространено представление (Динамика ..., 2002; Невеская, 1965; Шелкопляс и Христофорова, 2007; Янко и др., 1990; Zubakov, 1988; и др.), что в южной части разреза вскрываются отложения первой тобечикской (лиманной) фазы трансгрессии, представленные пачкой переслаивающихся глин, алевроитов и песков с эвригалинной фауной моллюсков, а отложения фазы максимального развития карангатской трансгрессии, представленные разнообразными песками, гравелитами, ракушечниками с включением стеногалинной фауны моллюсков, вскрываются в центральной и северной частях разреза. При этом П.В. Федоров еще в 1963 г. выступил с критикой выделения лиманных осадков разреза Эльтиген как отложений первой фазы карангатской трансгрессии, т.к., по его мнению, фациальная изменчивость не является для этого достаточным аргументом. Об этом же еще раньше писал и Г.И. Горещкий (1955).

Первая хронология накопления карангатских отложений разреза Эльтиген была получена с использованием уран-ториевого метода (Арсланов и др., 1972), результаты датирования показали возраст отложений в диапазоне 85–87 тыс. л. н. Параллельно морские осадки разреза были датированы радиоуглеродным методом (Геохронология ..., 1974; Семененко, Ковалюх, 1973), возраст отложений составил 27–42 тыс. л. Эти датировки не могут считаться сколько-нибудь достоверными ввиду физических ограничений метода. Позднее отложения вновь были датированы уран-ториевым методом, все датировки оказались в интервале 88–129 тыс. л. н. (Арсланов и др., 1972, 1983; Dodonov et al., 2000), также была предпри-

нята попытка получить возраст тобечикских отложений термолюминесцентным методом, получена датировка 205.0 ± 50.0 тыс. л. н. (Dodonov et al., 2000).

Разрозненные датировки, полученные разными геохронологическими методами, дали основание полагать, что отложения разреза Эльтиген формировались в течение МИС 5. Более точные временные интервалы до сих пор не определены, до сих пор нет понимания, как разнофациальные слои соотносятся между собой в пределах разреза.

В 2018 г. нами был получен ряд ОСЛ датировок (Курбанов и др., 2019), благодаря которым удалось установить возрастной диапазон отложений центральной части разреза Эльтиген и выделить две фазы осадконакопления.

Первый опыт люминесцентного датирования разреза Эльтиген продемонстрировал перспективность применения этого метода для определения возраста карангатских отложений, однако исследованием была охвачена лишь центральная часть обнажения. Целью настоящей работы является определение возраста и условий осадконакопления южной (тобечикской) части разреза, которая в литературе принимается за отложения первой, самой ранней, фазы карангатской трансгрессии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разрез Эльтиген протяженностью около 3.5 км, расположен между с. Героевское и пересыпью, отделяющей Тобечикское озеро от моря (рис. 1). Это абразионный уступ, высота которого достигает 13–15 м, в нем вскрывается толща преимущественно прибрежно-морских отложений карангатской трансгрессии, перекрытых лессом с двумя–тремя слабо развитыми палеопочвами. В тектоническом отношении разрез находится в южном крыле Эльтигенской брахиантиклинальной складки (Благоволин, 1962), которая до сих пор продолжает деформироваться, что выражается в дислокации морских осадков с типичной карангатской фауной (Благоволин, 1962; Федоров, 1963) и в выходе палеогеновых глин в средней части разреза.

Нами изучено обнажение в южной части разреза близ пересыпи Тобечикского оз. Исследования выполнены фациально-литологическим, макрофаунистическим и геохронологическим методами. Анализ фауны моллюсков выполнен в Лаборатории новейших отложений и палеогеографии плейстоцена географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова с целью биостратиграфического обоснования геологического возраста осадков и понимания палеоэкологических условий их накопления.



Рис. 1. Местонахождение разреза Эльтиген.

Абсолютная хронология получена методом оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ). Датирование разновозрастных отложений выполнено в Скандинавской лаборатории люминесцентного датирования Орхусского университета. Отбор образцов проводился в темное время суток в светонепроницаемые пакеты, чтобы исключить воздействие света на образцы; отдельно отобран материал для гамма-спектрометрического анализа (Актуальные проблемы ..., 2020). Предварительная подготовка проб проведена в Лаборатории новейших отложений и палеогеографии плейстоцена географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова по принятому в Орхусском университете протоколу. Подготовка проб выполнялась по стандартной методике (Курбанов и др., 2019). Определение эквивалентной дозы выполнено по протоколу датирования SAR (Murray and Wintle, 2003). Люминесцентное датирование проведено по зернам кварца (18–24 аликвоты) и полевого шпата (6–11 аликвот) размером 180–250 мкм. Измерения выполнены на стандартном ТЛ/ОСЛ-ридере Risø (модель DA-20). Для построения кривой насыщения и определения эквивалентной дозы зерна подверглись воздействию излучения бета-источника — изотопа стронция-90.

Полевой шпат способен накопить больше люминесцентного сигнала, чем кварц, поэтому для тех отложений, где кварц достиг предела возможностей датирования, хронология построена по результатам, полученным по протоколу датирования $pIRIR_{290}$ (Buylaert et al., 2013) по полевым шпатам. Данная методика детально описана в нашей статье, посвященной датированию отложений центральной части разреза Эльтиген (Курбанов и др., 2019).

Определение скорости накопления дозы (активности радионуклидов) в образцах выполнено на высокоточном гамма-спектрометре с полупроводниковым детектором на основе особо чистого германия по методике, описанной А.Ш. Мюрре-ем с соавторами (1987). Вклад космических лучей рассчитан в соответствии с Дж.Р. Прескоттом и Дж.Т. Хаттоном (1994).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В обнажении южной части разреза Эльтиген (N 45°10'53.75 E 36°24'17.45) высотой 5.8 м от уреза сверху вниз вскрываются следующие отложения (рис. 2): (1) палевый суглинок (современная каштановая почва) мощностью 0.45 м с включением корней растений, ходов животных, карбонатных образований и раковин наземных моллюсков, переход к нижележащему слою постепенный; (2) палевый лессовидный суглинок мощностью 0.35 м с включением корней растений, ходов животных, карбонатных образований и редких раковин наземных моллюсков, переход к нижележащему слою постепенный; (3) опесчаненный суглинок мощностью 0.2 м с включением гальки, гравия и переотложенных раковин морских моллюсков, переход к нижележащему слою постепенный; (4) опесчаненный палевый лессовидный суглинок мощностью 1.25 м с включением редких раковин наземных моллюсков, переход к нижележащему слою постепенный; (5) косо- и горизонтально-слоистые ожелезненные палевые смятые в седиментационные складки пески мощностью 0.6 м с включением гальки, гравия и фауны морских моллюсков, граница с нижележащим слоем четкая; (6) сизые опесчаненные глины мощностью 0.45 м с включением редких мелких тонкостворчатых раковин морских моллюсков,

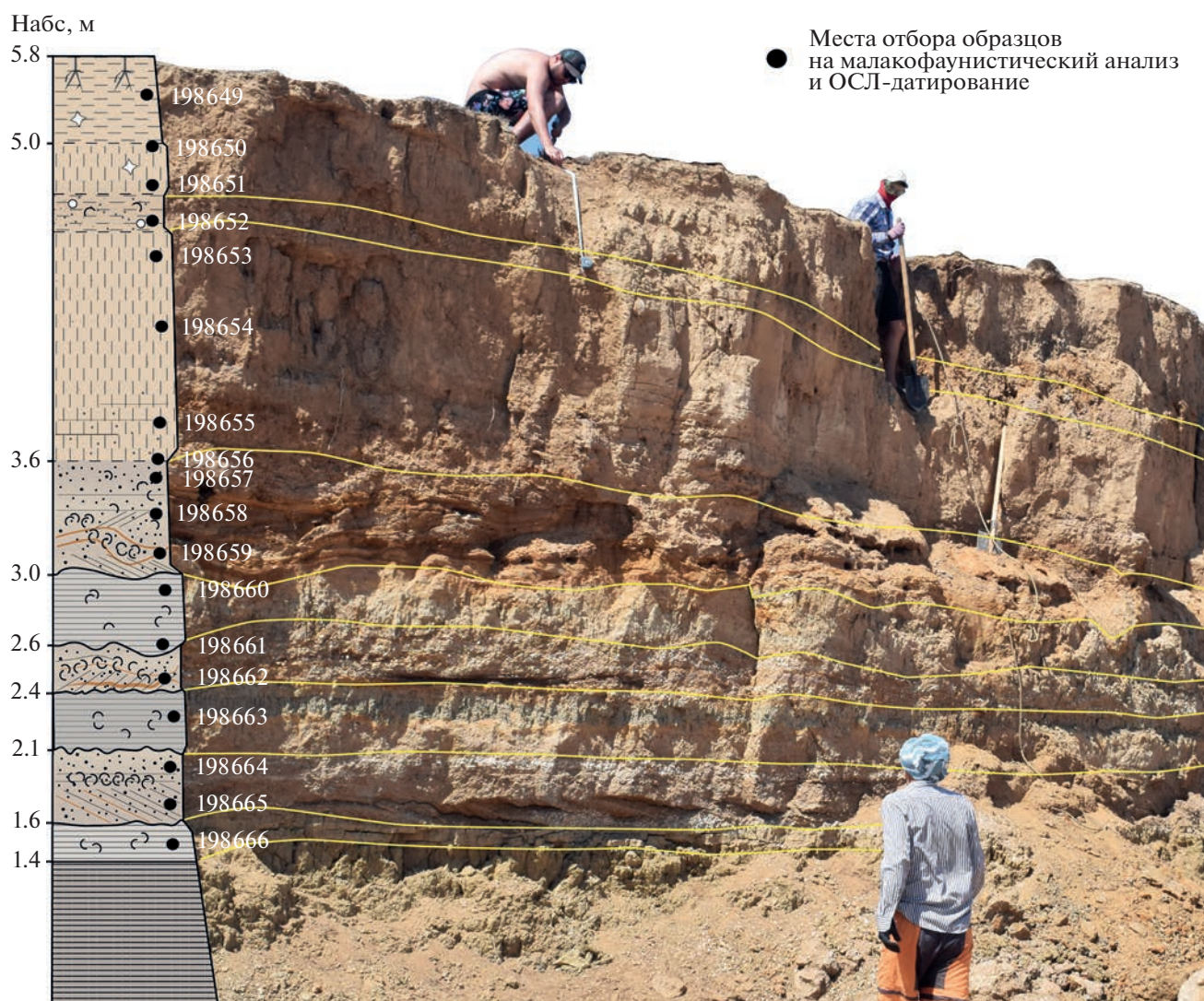


Рис. 2. Обнажение южной части разреза Эльтиген и литологическая колонка с отмеченными местами отбора образцов (см. легенду к рис. 3).

граница с нижележащим слоем четкая; (7) косо- и горизонтально-слоистые ожелезненные палевые пески мощностью 0.25 м с включением гальки, гравия и раковин морских моллюсков, в подошве наблюдается прослой гравия, граница с нижележащим слоем четкая; (8) светло-сизые горизонтально-слоистые опесчаненные глины мощностью 0.35 м с включением мелких тонкостворчатых раковин морских моллюсков, граница с нижележащим слоем четкая; (9) косо- и горизонтально-слоистые ожелезненные палевые детритовые пески мощностью 0.4 м с включением раковин морских моллюсков, в подошве наблюдается прослой гравия, граница с нижележащим слоем четкая; (10) светло-сизые горизонтально-слоистые глины мощностью 0.2 м с включением мелких тонкостворчатых раковин морских моллюсков, граница с нижележащим слоем четкая; (11)

темно-сизые глины со следами ожелезнения, видимая мощность слоя 0.6 м.

В обнажении выделяются десять эпизодов смены режима осадконакопления. В морской толще прослеживается чередование лагунных и прибрежно-морских (три цикла) осадков, что указывает на колебания уровня карангатского моря и на периодический размыв пересыпи оз. Палео-Тобечик, а в континентальной толще между слоями лессовидного суглинка выделяются более темные отложения неясного генезиса, характеризующиеся высокой опесчаненностью и наличием включений мелкой гальки, гравия и переотложенных раковин моллюсков, что может быть связано с повышением влажности в период их накопления и активизации склоновых и русловых процессов на данной территории.

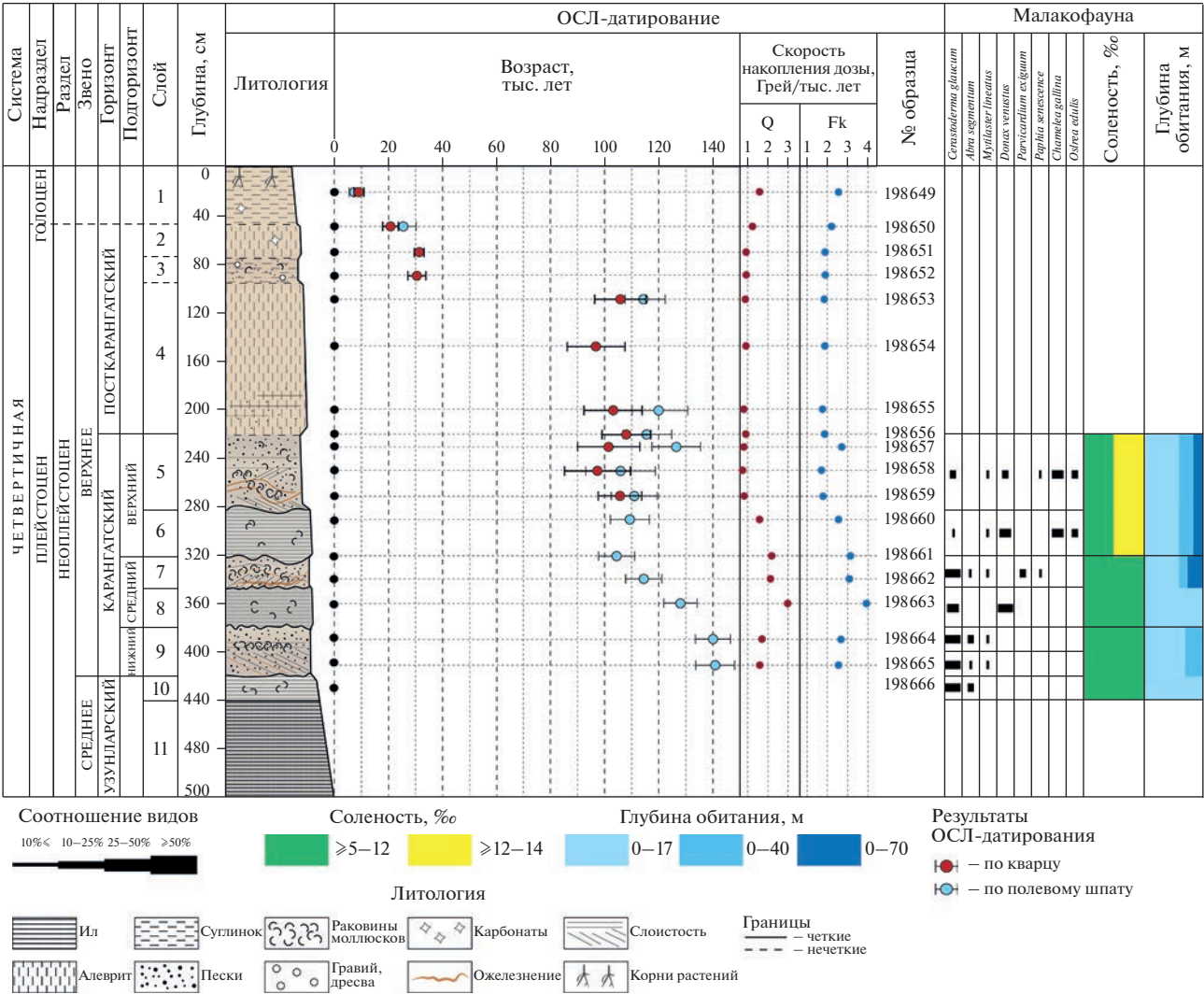


Рис. 3. Схема отложений южной части разреза Эльтиген и результаты малакофаунистического и геохронологического анализов.

Малакофаунистический анализ

Результаты малакофаунистического анализа отложений южной части разреза Эльтиген представлены на рис. 3 и в табл. 1.

В толще илов в интервале 4.4–4.2 м (слой 10) был обнаружен малакофаунистический комплекс, в составе которого присутствуют только два вида эвригалинных моллюсков, но в достаточно большом количестве: *Cerastoderma glaucum* и *Abra segmentum*, с заметным доминированием первого. Выше в песках до 3.8 м (слой 9) в составе комплекса появляется в единичных количествах эвригалинный *Mytilaster lineatus*. На глубине 3.6–3.4 м (слой 8) в прослое илов наблюдается обедненный комплекс, представленный единичными и слабо развитыми *Cerastoderma glaucum* и *Donax venustus*, однако появление последнего указывает на повышение солёности в бассейне до 14‰. В

интервале 3.4–3.2 м (слой 7) в песчаном прослое заметно увеличивается численность раковин и видовое разнообразие: наряду с *Cerastoderma glaucum*, *Abra segmentum* и *Mytilaster lineatus* комплекс представлен *Parvicardium exiguum* и *Paphia senescens*. Выше с 3.0 м (слой 6) в составе отложений наблюдаются умеренно стеногалинные моллюски, типичные для отложений верхней фазы карангатской трансгрессии – *Ostrea edulis* и *Chamelea gallina*, последний преобладает, эвригалинные виды отходят на второй план (рис. 4).

Анализ экологических предпочтений различных видов моллюсков в обнажении показал значительное содержание эвригалинных видов практически во всех морских осадках разреза с доминированием *Cerastoderma glaucum*, за исключением самой верхней пачки прибрежно-морских песков, где увеличивается видовое разнообразие моллюсков.

Таблица 1. Двустворчатые моллюски в обнажении южной части разреза Эльтиген

№	Вид	198666	198665	1986564	198663	198662—61	198660	198659—56
		Количество/средний размер, см						
1	<i>Abra segmentum</i> (Récluz, 1843)	15/1.1	4/0.1	16/1.1	—	7/1.0	—	—
2	<i>Cerastoderma glaucum</i> (Bruguière, 1789)	52/1.8	98/1.9	55/1.5	4/1.0	67/1.4	2/0.8	9/1.9
3	<i>Chamelea gallina</i> (Linnaeus, 1758)	—	—	—	—	—	7/0.9	28/1.5
4	<i>Donax venustus</i> (Poli, 1795)	—	—	—	5/1.1	—	7/0.9	13/1.4
5	<i>Mytilaster lineatus</i> (Gmelin, 1791)	—	4/0.4	1/1.4	—	3/0.6	3/1.0	4/1.4
6	<i>Ostrea edulis</i> (Linnaeus, 1758)	—	—	—	—	—	3/2.0	9/3.0
7	<i>Paphia senescens</i> (Cocconi, 1873)	—	—	—	—	10/3.2	—	1/1.6
8	<i>Parvicardium exiguum</i> (Gmelin, 1791)	—	—	—	—	16/0.9	—	—

ков и встречаются умеренно стеногалинные виды (*Ostrea edulis*, *Chamelea gallina*, *Donax venustus*), характерные для бассейнов с соленостью вод выше 14‰. Такое распределение комплексов моллюсков указывает на то, что среда бассейна изменялась в сторону увеличения солености, а чередование илистых и песчаных отложений свидетельствует об изменении условий осадконакопления — от лагунных условий к прибрежно-морским.

Состав фаунистических комплексов (в частности наличие руководящего вида карангатских отложений — *Paphia senescens*) дает основание отнести установленные циклы осадконакопления к одной трансгрессивной эпохе и определить возраст отложений слоев 5–10 обнажения как карангатский.

Люминесцентное датирование

Для определения абсолютного возраста (табл. 2) отложений южной части разреза Эльтиген комбинацией ОСЛ и ИКСЛ методов было отобрано 18 образцов: десять из лагунных и прибрежно-морских отложений (198657–198666) и восемь из вышележащей лессово-почвенной толщи (198649–198656).

Скорость накопления дозы рассчитана по результатам измерения активности образцов на гамма-спектрометре (табл. 3).

На рис. 5 представлены примеры типичных кривых насыщения и затухания люминесцентного сигнала для образцов кварца (198650) и полевым шпатам (198653). При проверке люминесцентных свойств используемых при датировании минералов было установлено, что в отклике кварца, как и ожидалось, доминирует быстрый компонент (см. рис. 5а, врезка). Это означает, что образцы кварца подходят для датирования, т.к. быстрый компонент наиболее стабилен, быстро удаляется при воздействии солнечного света, но в тоже время менее восприимчив к колебаниям температуры (Wintle and Murray, 2006). ИКСЛ-

сигнал полевых шпатов затухает гораздо медленнее, чем быстрый компонент ОСЛ-сигнала кварца, однако отклик на стимуляцию при температуре 260°C весьма интенсивен и позволяет провести достаточно точные измерения (см. рис. 5б, врезка).

Дополнительно к стандартным тестам (тест чистоты, тест рекуперации и др.) для проверки пригодности протоколов ОСЛ и ИКСЛ-датирования был проведен тест восстановления дозы. Предварительно засвеченным аликвотам образцов 198650 и 198653 (24 часа в симуляторе солнечного света) были заданы дозы до 100 Грей для кварца (см. рис. 5а) и до 225 Грей (см. рис. 5б) для полевых шпатов, после чего проведены измерения согласно протоколу SAR. Результаты измерений показали, что известная лабораторная доза может быть достаточно точно измерена с использованием SAR-протокола, т.к. соотношение заданных и измеренных доз в более 80% измерений не выходят из диапазона 0.9–1.1.

Разрез оказался довольно сложным для ОСЛ-датирования из-за частого чередования слоев песка и илов, так как содержание радиоактивных элементов может значительно варьироваться в зависимости от литологических характеристик отложений. Так, для осадков, содержащих больше глинистых частиц, характерны более высокие значения скорости накопления дозы, в то время как песчаные прослои, в особенности обогащенные карбонатным материалом (раковины моллюсков и оолитовые зерна), зачастую имеют скорость накопления дозы менее 1 Грей/тыс. лет (Курбанов и др., 2021).

Первые два образца (198649, 198650) показывают относительно высокие скорости накопления дозы, что характерно для каштановых почв из-за повышенной концентрации радионуклидов. Ниже, образцы, отобранные из опесчаненного лессовидного суглинка, характеризуются относительно низкими скоростями накопления дозы (ниже 1 Грей/тыс. лет). Распределение эквивалентных доз в образцах из слоев 1–4 можно разделить на

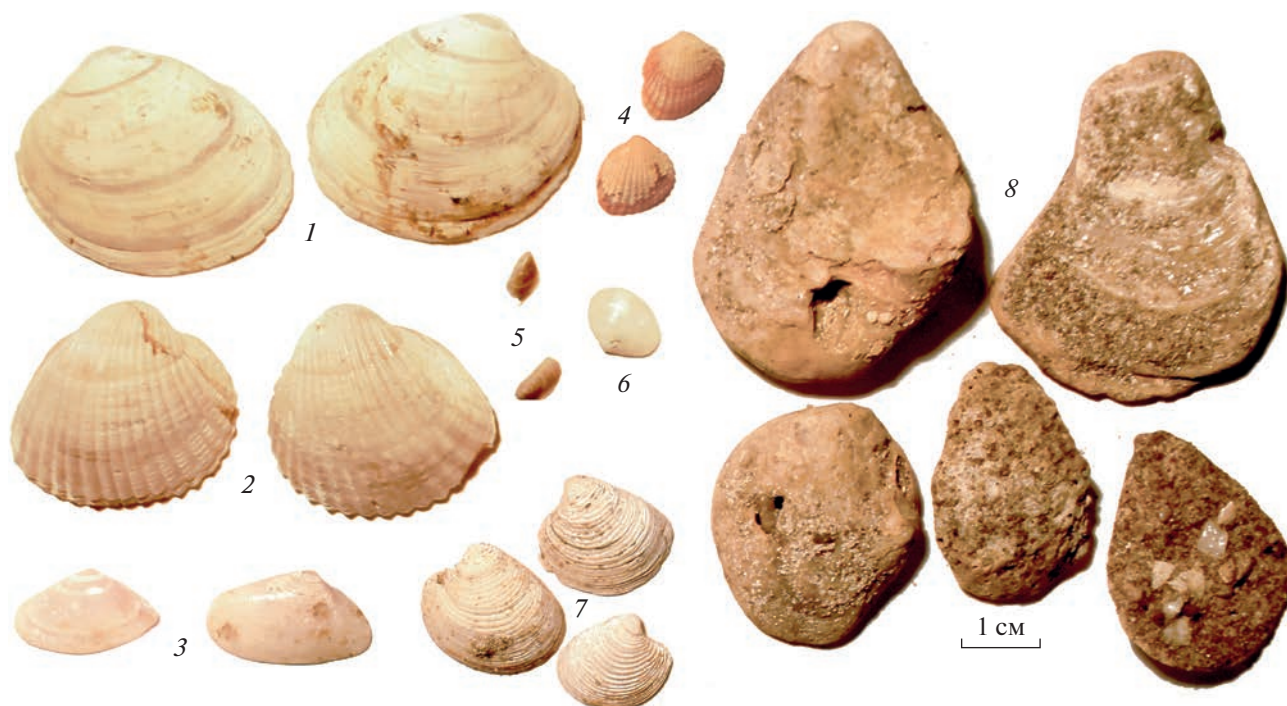


Рис. 4. Раковины моллюсков из отложений южной части разреза Эльтиген: 1 – *Paphia senescens*, 2 – *Cerastoderma glaucum*, 3 – *Donax venustus*; 4 – *Parvicardium exiguum*; 5 – *Mytilaster lineatus*; 6 – *Abra segmentum*; 7 – *Chamelea gallina*; 8 – *Ostrea edulis*.

три группы – 15 Грей (198649), 25–30 Грей (198650–198652) и 83–97 Грей (198653–198655). Возраст слоя 1, соотносимого с современной каштановой почвой, показал, что почвообразование в районе разреза Эльтиген происходило на протяжении большей части голоценового времени. Возраст слоев 2–3 располагается в интервале 20–32 тыс. л. н. Датирование образца 198651 показало инверсию в возрасте, однако датировки, полученные для образцов 198651 и 198652, имеют близкие значения и их доверительные интервалы перекрываются, что указывает на высокие скорости осадконакопления около 30 тыс. л. н. В слое 4 также отмечается наличие инверсий, что аналогично со слоями выше может быть объяснено высокими скоростями осадконакопления, а также очень низким содержанием ^{40}K , вносящим большой вклад в общую скорость накопления дозы. Разницу в столь низких значениях между 30 и 40 Бк/кг сложно определить даже с помощью высокоточной гамма-спектрометрии. Помимо этого, полученные для лессовых образцов эквивалентные дозы имеют высокую дисперсию (рис. 6а), а для нижнего образца (198655) была получена ограниченная навеска зерен кварца, и было измерено лишь 14 аликвот, что также снижает надежность итоговой датировки. Таким образом, возраст лессов слоя 4, мощностью около 1 м, по-видимому, находится в интервале 90–110 тыс. л. н. Однако, несмотря на инверсии и достаточно вы-

сокую дисперсию эквивалентных доз образцов лесса, возраст образцов 198649–198650, 198653, 198655–198659, полученный по кварцу, с учетом доверительных интервалов совпал с возрастом, рассчитанным по полевым шпатам, что указывает на то, что сигнал в кристаллах перед погребением был хорошо обнулен.

Толща морских отложений слоев 5–6 (цикл III) характеризуется постепенным увеличением возраста от ~98 до ~107 тыс. л. н. с несколькими инверсиями. Соотношение pIRIR/Q слоя 5 колеблется в пределах 1.07–1.25 (среднее 1.11), т.е. возраст, полученный по полевым шпатам, на 7–25% древнее возраста, полученного по кварцу, причем, наибольшая разница между датировками наблюдается для верхней части слоя 5. Это явление может объясняться неполной засветкой полевых шпатов в момент формирования переходной от прибрежно-морских к лессовидным отложениям толщи. Дисперсия эквивалентных доз песчаных образцов в сравнении с лессовыми ниже (рис. 6б), что подразумевает более высокую точность итоговой датировки. С глубины 290 см в образцах 198660–198665 люминесцентные ловушки в кристаллах кварца оказались полностью насыщены (достигли уровня сатурации), что, по-видимому, является следствием высокой скорости дозы в мелкодисперсных грунтах (4.0 ± 0.2 Грей/тыс. л.). Для вышеуказанных образцов датирование проведено на основе результатов из-

Таблица 2. Результаты ОСЛ-датирования отложений разреза Эльтиген

№	Лаб. номер	Глубина, см	Слой	Литология	Измерения по кварцу (ОСЛ)			Измерения по полевым шпатам (ИКСЛ, pIRIR ₂₉₀)		
					доза, Грей	возраст, тыс. л.	количество аликвот	доза, Грей	возраст, тыс. л.	количество аликвот
1	198649	20	1	Суглинок	15.2 ± 0.9	9.5 ± 0.8	14	21.6 ± 0.3	8.5 ± 0.4	4
2	198650	50	2	Лессовидный суглинок	25.4 ± 3.3	20.4 ± 2.9	22	52.1 ± 9.8	23.9 ± 4.6	4
3	198651	70			30.5 ± 2.7	32.8 ± 3.5	21	*	*	*
4	198652	90	3	Суглинок	29.0 ± 2.5	31.2 ± 3.2	23	*	*	*
5	198653	110	4	Лессовидный суглинок	93.3 ± 6.8	105.6 ± 9.8	20	208.6 ± 9.3	114.5 ± 7.5	8
6	198654	150			91.0 ± 7.7	98.7 ± 10.1	16	*	*	*
7	198655	200			83.7 ± 7.5	102.8 ± 11.0	13	210.2 ± 14.4	120.0 ± 10.1	7
8	198656	220	5	Супесь	97.2 ± 6.0	107.1 ± 9.3	19	212.0 ± 12.8	114.9 ± 8.9	8
9	198657	230		Песок	80.6 ± 7.9	101.4 ± 11.7	15	218.9 ± 11.0	126.4 ± 8.9	10
10	198658	250			73.7 ± 8.2	98.0 ± 12.5	14	177.7 ± 19.8	105.1 ± 12.9	10
11	198659	270			86.9 ± 4.9	105.2 ± 8.9	13	197.8 ± 28.4	112.2 ± 17.0	4
12	198660	290	6	Ил	**	**	**	276.9 ± 36.6	109.5 ± 15.3	11
13	198661	320			**	**	**	326.3 ± 16.1	104.5 ± 6.9	8
14	198662	340	7	Песок	**	**	**	351.9 ± 15.3	114.8 ± 7.6	7
15	198663	360	8	Ил	**	**	**	502.2 ± 18.0	128.2 ± 7.3	7
16	198664	390	9	Песок	**	**	**	371.6 ± 7.2	140.1 ± 6.9	8
17	198665	410			**	**	**	360.2 ± 8.8	141.7 ± 7.6	8
18	198666	430	10	Ил	**	**	**	>1000	>250	6

Примечание. * – Недостаточная навеска полевых шпатов, необходимых для измерений; ** – образцы кварца в насыщении.

мерения эквивалентной дозы по полевым шпатам (pIRIR₂₉₀).

Для цикла II (слои 7–8) получено две даты, определяющие возраст этапа в 115–128 тыс. л. н. Нижняя часть карангатских отложений (цикл I, слой 9), судя по датировкам, могла сформироваться в интервале около 133–149 тыс. л. н. Однако, учитывая тот факт, что накопление толщи прибрежно-морских осадков с включением морской фауны в районе разреза Эльтиген могло происходить только в результате поступления в Керченский пролив морских вод вследствие межледниковой трансгрессии Мирового океана (Lisiecki and Stern, 2016), мы определяем возраст I фазы карангатской трансгрессии по верхней границе возрастного диапазона – в 133–135 тыс. л. н. Датировка из светло-сизых глин оказалась за пределами даже для полевых шпатов, все аликвоты в полном насыщении, что может указывать на возраст слоя 10 не менее 250 тыс. л.

Таким образом, в основании разреза вскрываются горизонтально-слоистые глины, на которых с размывом залегают лагунно-лиманские отложе-

ния, отвечающие, возможно, узунларской трансгрессии (сигнал кварца и полевого шпата находится в насыщении).

Выше, в толще переслаивающихся лагунных и прибрежно-морских отложений, выделяются три группы датировок, соответствующих трем циклам осадконакопления: 1) в слое 9 (песок) диапазоном 141.7 ± 7.6–140.1 ± 6.9 тыс. л. н.; 2) в слоях 8 (ил) и 7 (песок) диапазоном 128.2 ± 7.3–114.8 ± 7.6 тыс. л. н.; 3) в слоях 6 (ил) и 5 (песок-супесь) диапазоном 109.5 ± 15.3–98.0 ± 12.5 тыс. л. н. Данные циклы связаны с изменением режима осадконакопления в районе оз. Палео-Тобечик, что является следствием осцилляции уровня карангатского бассейна на фоне развивающейся трансгрессии.

Первоначальное проникновение вод карангатской трансгрессии в понижение Тобечикского оз. произошло не позднее 141.7 ± 7.6 тыс. л. н. Возраст самого продолжительного этапа прибрежно-морского осадконакопления по результатам датирования определен в 107–98 тыс. л. н. За это время была образована толща морских

Таблица 3. Результаты гамма-спектрометрического анализа отложений разреза Эльтиген. Содержание радиоактивных элементов в образце и скорость накопления дозы для кварца и полевых шпатов, WC — водонасыщение породы

№	Лаб. номер	Глубина, см	Слой	Литология	WC, %	^{226}Ra , Бк/кг	^{232}Th , Бк/кг	^{40}K , Бк/кг	Скорость накопления дозы	
									кварц, Грей/тыс. л.	полевые шпаты, Грей/тыс. л.
1	198649	20	1	Суглинок	10	32.1 ± 0.6	21.5 ± 0.5	198 ± 8	1.59 ± 0.07	2.52 ± 0.10
2	198650	50	2	Лессовидный суглинок	10	32.0 ± 0.4	15.8 ± 0.3	115 ± 4	1.24 ± 0.06	2.18 ± 0.08
3	198651	70			10	28.7 ± 0.7	10.4 ± 0.5	53 ± 7	0.93 ± 0.05	1.86 ± 0.08
4	198652	90	3	Суглинок	10	25.1 ± 0.5	11.2 ± 0.3	65 ± 4	0.93 ± 0.05	1.87 ± 0.08
5	198653	110	4	Лессовидный суглинок	10	29.8 ± 0.4	11.1 ± 0.2	32 ± 2	0.88 ± 0.05	1.82 ± 0.08
6	198654	150			10	31.5 ± 0.4	10.8 ± 0.4	41 ± 3	0.92 ± 0.05	1.85 ± 0.08
7	198655	200			10	29.0 ± 0.3	9.2 ± 0.2	28 ± 3	0.81 ± 0.04	1.74 ± 0.08
8	198656	220	5	Супесь	10	30.8 ± 0.8	10.5 ± 0.6	47 ± 8	0.91 ± 0.05	1.84 ± 0.08
9	198657	230		Песок	5	30.5 ± 0.5	24.5 ± 0.3	247 ± 5	0.80 ± 0.05	2.69 ± 0.11
10	198658	250			5	25.5 ± 0.6	7.0 ± 0.4	28 ± 6	0.75 ± 0.04	1.68 ± 0.08
11	198659	270			5	27.7 ± 0.5	7.3 ± 0.3	51 ± 4	0.83 ± 0.05	1.76 ± 0.08
12	198660	290	6	Ил	20	35.9 ± 0.7	23.6 ± 0.5	260 ± 8	1.59 ± 0.08	2.53 ± 0.10
13	198661	320			20	38.2 ± 0.8	40.5 ± 0.7	503 ± 14	2.19 ± 0.11	3.12 ± 0.12
14	198662	340	7	Песок	5	49.4 ± 1.2	26.7 ± 0.8	275 ± 14	2.13 ± 0.13	3.07 ± 0.14
15	198663	360	8	Ил	20	28.7 ± 0.6	52.8 ± 0.6	697 ± 10	2.98 ± 0.14	3.92 ± 0.15
16	198664	390	9	Песок	5	48.0 ± 0.5	24.5 ± 0.4	247 ± 7	1.71 ± 0.09	2.65 ± 0.11
17	198665	410			5	30.0 ± 0.7	20.9 ± 0.8	231 ± 9	1.60 ± 0.09	2.54 ± 0.11
18	198666	450	10	Ил	25	33.6 ± 0.4	57.3 ± 0.4	737 ± 8	4.00 ± 0.15	3.06 ± 0.14

осадков мощностью около 60 см. Инверсии возраста и некоторое увеличение соотношения возрастов по кварцу и полевым шпатам, по-видимому, указывают на рост объемов поступающего терригенного материала, образующегося в результате берегового размыва, либо активизации эрозионных процессов в многочисленных ныне сухих долинах, впадающих в оз. Палео-Тобечик.

Накопление верхней субэвальной толщи началось не ранее 98 тыс. л. н. Характер распределения аликвот и наличие инверсий указывает на активное накопление лессов. Материал поступал из местных источников, возможно, с осушавшегося подводного берегового склона.

Маломощный горизонт на глубине 0.75–0.95 м с включением перетолженных раковин морских моллюсков, гальки и гравия имеет возраст 31.2 ± 3.2 тыс. л., что соответствует концу брянского интерстадиала (МИС 3), и, судя по возрасту нижележащих отложений, накапливался он с эрози-

онным размывом. Возможно, в это время произошла активизация притоков оз. Палео-Тобечика.

ВЫВОДЫ

1. Отложения южной части стратотипического разреза карангата Эльтиген изучены малакофаунистическим методом и методом оптически стимулированной люминесценции. Биостратиграфический анализ малакофауны подтвердил принадлежность вскрытых в разрезе морских отложений карангатской трансгрессии Черного моря. Люминесцентное датирование выполнено по протоколам OSL и pIRIR₂₉₀, по итогам которого было получено 17 датировок, характеризующих разные этапы развития территории. При датировании отложений были проведены все необходимые для проверки надежности результатов тесты. Итоговые даты по кварцу и полевым шпатам показали хорошую сходимость в пределах доверительных интервалов, что говорит о высокой надежности полученной хронологии. Результаты OSL-

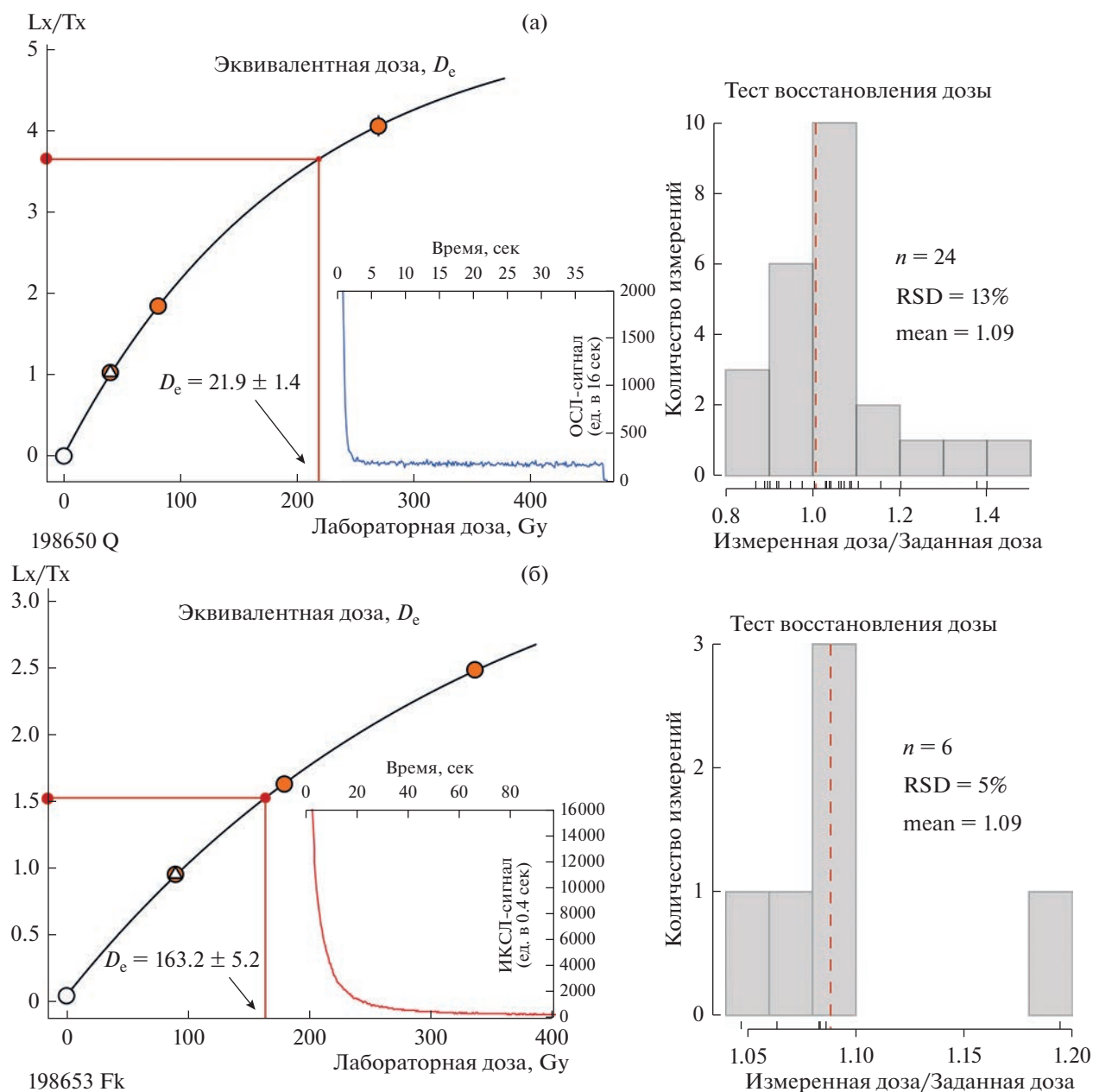


Рис. 5. Кривые насыщения и затухания люминесцентного сигнала (во врезке) с результатами теста восстановления дозы для кварца (а) и полевого шпата (б).

датирования показали, что осадконакопление карангатских отложений в южной части разреза Эльтиген происходило в конце МИС 6 и на протяжении МИС 5е-с.

2. На основе малакофаунистического анализа в толще морских отложений выделяется три цикла осадконакопления, разделенные эрозионными перерывами. Первый характеризуется обедненным комплексом эвригалинных моллюсков, его возраст по нижней границе доверительного интервала составил около 135–130 тыс. л.

(МИС 6–МИС 5е). Второй представлен большим разнообразием эвригалинных видов, в составе которого появляются умеренно стеногалинные виды, его возраст оценен интервалом 130–115 тыс. л. н. (МИС 5е). Третий цикл характеризуется комплексом, где доминируют умеренно стеногалинные виды, его возраст оценен в 115–95 тыс. л. (МИС 5д–с).

3. Анализ экологических предпочтений различных видов моллюсков в обнажении показал, что среда бассейна изменялась в сторону увеличе-

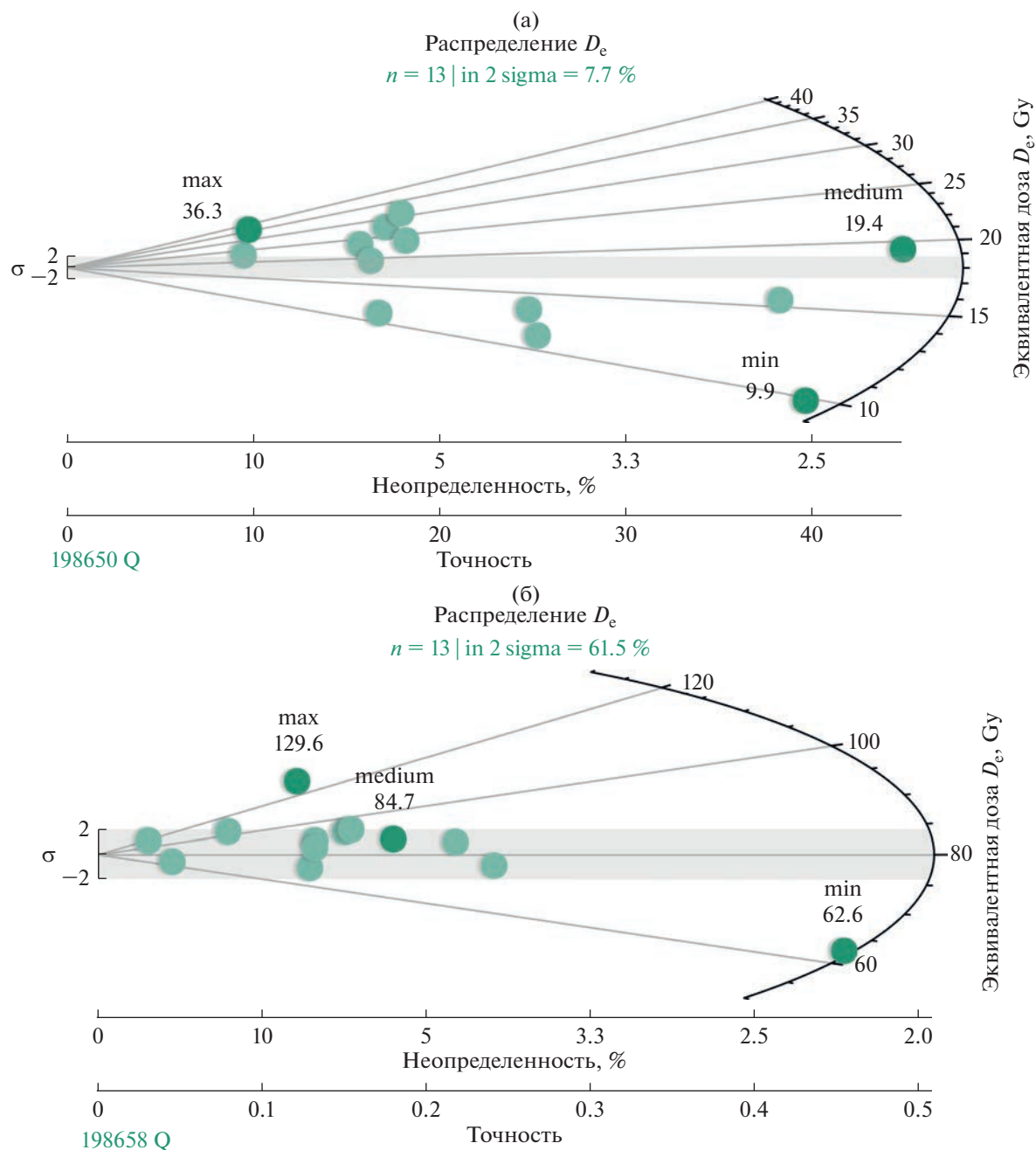


Рис. 6. Дисперсия результатов измерения эквивалентных доз образцов кварца из лессовых отложений (а) и из прибрежно-морских (б).

ния солености. Наибольшее видовое разнообразие с наличием умеренно стеногалинных видов наблюдается в самой верхней пачке смятых в седиментационные складки песчаных отложений возрастом около 110–95 тыс. л.

4. Накопление верхней субэвальной толщи началось не ранее 95 тыс. л. н. В разрезе выделяется наличие значительного перерыва осадконакопления в период между 95 и 35 тыс. л. н. Во время брянского интерстадиала (МИС 3) в прилега-

ющей к разрезу территории в районе 30 тыс. л. н. произошло увеличение водности притоков оз. Палео-Тобечик.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта РФФ № 19-77-10077 (абсолютное датирование), работы Т.А. Яниной (фаунистический анализ) поддержаны проектом РФФ 21-44-04401,

Д.В. Семиколенных (фаунистический анализ и ОСЛ-датирование) — госзаданием ИГ РАН (0148-2019-0005).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность профессору Орхусского университета (Дания) доктору Э.Ш. Мюррею за помощь в интерпретации полученных результатов, главному научному сотруднику лаборатории гидрологии Института географии РАН д.г.н. А.Л. Чепалыге, инженеру-исследователю Лаборатории новейших отложений и палеогеографии плейстоцена Н.А. Таратуниной.

FUNDING

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation project no. 19-77-10077 (absolute dating), the work of T.A. Yanina (faunistic analysis) were supported by the Russian Science Foundation project no. 21-44-04401, D.V. Semikolennykh (faunistic analysis and OSL dating)—the state order of the IG RAS (0148-2019-0005).

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to professor A.S. Murray (Aarhus University) for help with data interpretation, to doctor A.L. Chepalyga (IG RAS) and N.A. Taratunina (Moscow State University) for help in field work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андрусов Н.И. О возрасте морских послетретичных террас Керченского полуострова // Ежегодн. по геологии и минерал. России. 1904—1905. Т. 7. № 6. С. 158—172.
- Арсланов Х.А., Балабанов И.П., Гей Н.А. и др. О возрасте и климатических условиях формирования осадков позднеплейстоценовых морских террас побережья Керченского пролива // Вестн. ЛГУ. 1983. № 12. С. 69—79.
- Арсланов Х.А., Герасимова С.А., Измайлов Я.А., Локшин Н.В., Муратов В.М., Островский А.Б., Тыртычный Н.И., Щеглов А.П. О возрасте голоценовых и верхнеплейстоценовых отложениях черноморского побережья Кавказа и Керченско-Таманского района // Науч. Новости и Заметки. 1972. С. 107—110.
- Архангельский А.Д., Страхов Н.М. Геологическое строение и история развития Черного моря. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1938. 226 с.
- Бадюкова Е.Н. Высокая карангатская лагунно-трансгрессивная терраса Керченского пролива // Геоморфология. 2009. № 3. С. 25—31.
- Благоволлин Н.С. Геоморфология Керченско-Таманской области. АН СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 189 с.
- Геология шельфа Украины. Керченский пролив. Киев: Наукова думка, 1981. 186 с.
- Геохронология СССР. Л.: Недра, 1974. Т. 3. 357 с.
- Горецкий Г.И. О возрастных соотношениях осадков узунларской и карангатской трансгрессий // Бюлл. МОИП. Отд. Геолог. 1955. Т. 30. Вып. 2. С. 13—29.
- Динамика ландшафтных компонентов и внутренних морских бассейнов Северной Евразии за последние 130 000 лет (общая палеогеография). М.: ГЕОС, 2002. 232 с.
- Курбанов Р.Н., Янина Т.А., Мюррей А.С., Семиколенных Д.В., Свистунов М.И., Штыркова Е.И. Возраст Карангатской трансгрессии (поздний плейстоцен) Черного моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2019. № 6. С. 29—39.
- Курбанов Р.Н., Семиколенных Д.В., Янина Т.А., Тюнин Н.А., Мюррей Э.С. Новые данные о возрасте карангатской трансгрессии Черного моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2020. № 6. С. 139—145.
- Курбанов Р.Н., Ульянов В.А., Анойкин А.А., Павленок Г.Д., Семиколенных Д.В., Харевич В.М., Таймагамбетов Ж.К., Мюррей Э.С. Первая люминесцентная хронология начального верхнего палеолита Восточного Казахстана (по материалам стоянки Ушбулак) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2021. № 5. С. 131—148.
- Люминесцентное датирование в палеогеографии. Актуальные проблемы палеогеографии плейстоцена. Научные достижения Школы академика К.К. Маркова / отв. ред. Т.А. Янина. М., 2020. С. 554—613.
- Невесская Л.А. Позднечетвертичные двустворчатые моллюски Черного моря, их систематика и экология. М.: АН СССР, 1965. 392 с.
- Попов Г.И. Плейстоцен Черноморско-Каспийских проливов. М.: Наука, 1983. 214 с.
- Свиточ А.А. Стратотипы карангата Таманского и Керченского полуостровов (сравнительный анализ) // ДАН. 2009. № 424. С. 669—671.
- Семененко В.Н., Ковалюх Н.Н. Абсолютный возраст верхнечетвертичных отложений Азово-Черноморского бассейна по данным радиоуглеродного анализа // Геол. журн. 1973. Т. 33. № 6. С. 91—97.
- Семиколенных Д.В., Курбанов Р.Н. По следам карангатской трансгрессии // Природа. 2020. № 11. С. 27—34.
- Федоров П.В. Стратиграфия четвертичных отложений Крымско-Кавказского побережья и некоторые вопросы геологической истории Черного моря. М.: АН СССР, 1963. 164 с.
- Федоров П.В. Плейстоцен Понто-Каспия. М.: Наука, 1978. 165 с.
- Шелкопляс В.Н., Христофорова Т.Ф. О строение морских четвертичных отложений Керченского региона // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2007. № 2. С. 120—126.
- Чепалыга А.Л. Новая концепция черноморских террас Юго-Восточного Крыма // Бюлл. комиссии по изуч. четвертичного периода. 2015. № 74. С. 90—104.
- Янина Т.А. Неоплейстоцен Понто-Каспия: био-стратиграфия, палеогеография, корреляция. М.: МГУ, 2012. 264 с.
- Янко В.В., Фролов В.Т., Мотненко И.В. Фораминиферы и литология стратотипического разреза карангатского горизонта (антропоген Керченского полуост-

- рова) // Бюлл. МОИП. Отд. Геологии. 1990. № 65. С. 83–97.
- Dodonov A.E., Tchepalyga A.L., Mihailescu C.D., Zhou L.P., Markova A.K., Trubikhin V.M., Simakova A.N., Konikov E.G. Last-interglacial records from central Asia to the northern Black Sea shoreline: Stratigraphy and correlation // *Geol. en Mijnbouw / Netherlands J. Geosci.* 2000. № 79. P. 303–311.
- Buylaert J.P., Murray A.S., Gebhardt A.C., Sohbat R., Ohlendorf C., Thiel C., Wastegard S., Zolitschka B. Luminescence dating of the RASAF0 core 5022-1D from Laguna Potrok Aike (Argentina) using IRSL signals from feldspar // *Quat. Sci. Rev.* 2013. № 7. P. 70–80.
- Lisiecki L.E., Stern J.V. Regional and global benthic $\delta^{18}O$ stacks for the last glacial cycle // *Paleoceanography*. 2016. № 31. P. 1–27.
- Murray A., Marten R., Johnston A., Martin P. Analysis for naturally occurring radionuclides at environmental concentrations by gamma spectrometry // *J. Radioanalytical and Nuclear Chem.* 1987. Vol. 150. № 2. P. 263–288.
- Murray A.S., Wintle A.G. The single aliquot regenerative dose protocol: Potential for improvements in reliability // *Radiation Measurements*. 2003. № 37. P. 377–381.
- Prescott J.R., Hutton J.T. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: Large depths and long-term time variations // *Radiation Measurements*. 1994. Vol. 23. № 2–3. P. 497–500.
- Yanina T.A. The Ponto-Caspian region: Environmental consequences of climate change during the late Pleistocene // *Quat. Int.* 2014. Vol. 345. P. 88–99.
- Wintle A.G., Murray A.S. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols // *Radiat. Meas.* 2006. № 41. P. 369–391.
- Zubakov V.A. Climatostratigraphic scheme of the Black Sea pleistocene and its correlation with the oxygen-isotope scale and glacial events // *Quat. Res.* 1988. № 29. P. 1–24.

Chronology of the Karangat Transgression of the Black Sea by Luminescence Dating

D. V. Semikolennykh^{1, 2, *}, R. N. Kurbanov², and T. A. Yanina²

¹*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Moscow State University, Moscow, Russia*

*e-mail: aristova@igras.ru

At the beginning of the Late Pleistocene within the modern Azov-Black Sea basin the Karangat transgression developed synchronously with the interglacial transgression of the world ocean. Based on the analysis of faunal complexes, the basin was characterized as the warmest and deepest basin of the Late Pleistocene with water salinity much higher than the salinity of the modern Black Sea. The most complete sequence of transgression sediments was found in the Eltigen section, located on the western coast of the Kerch Strait. The section has been examined several times. However, due to the large extent, facies variability of the section and the lack of geochronological data, there is still no consensus on how the deposits in the section correlate, to what number of phases of the Karangat transgression they correspond to, and what their age is. The aim of this work is to obtain the chronology of sedimentation of the southern (Tobechik) part of the Eltigen stratotype section, which is considered by most researchers to be the deposits of the first phase of the Karangat transgression. Seventeen luminescence dates were obtained for quartz (OSL) and feldspar (pIRIR₂₉₀): nine from lagoon-marine and coastal-marine deposits and eight from the overlying loess-soil layer. Biostratigraphic analysis of the malacofauna confirmed the belonging of the marine deposits of the Karangat transgression of the Black Sea discovered in the section. The results of OSL dating showed that in the southern part of the Eltigen section, three cycles of lagoon-coastal-marine sedimentation are distinguished in the intervals of 135–130 ka years ago (MIS 6–MIS5e), 130–115 ka years ago (MIS 5e) and 115–95 ka years ago (MIS 5d-c). The accumulation of the upper subaerial strata began no earlier than 95 ka years ago.

Keywords: Kerch Strait, Eltigen, Lake Tobechik, Late Pleistocene, Karangatian transgression, OSL dating, malacofauna, Mikulin interglacial

REFERENCES

- Andrusov N.I. On the age of the marine post-Tertiary terraces of the Kerch Peninsula. *Ezhegodnik po Geologii i Mineral. Rossii*, 1904–1905, vol. 7, no. 6, pp. 158–172. (In Russ.).
- Arkhangel'skii A.D., Strakhov N.M. *Geologicheskoe stroenie i istoriya razvitiya Chernogo morya* [Geological Structure and History of Evolution of the Black Sea]. Moscow–Leningrad: Akad. Nauk SSSR Publ., 1938. 226 p.
- Arslanov Kh.A., Gai N.A., Izmailov Ya.A., Lokshin N.V., Gerasimova S.A., Tertychnyi N.I. On the age and climatic conditions of sediments formation on the Late Pleistocene marine terraces of the Kerch Strait coast. *Vestn. LGU*, 1983, no. 12, pp. 69–79. (In Russ.).
- Arslanov Kh.A., Gerasimova S.A., Izmailov Ya.A., Lokshin N.V., Muratov V.M., Ostrovskii A.B., Tertychnyi N.I., Scheglov A.P. On the age of the Holocene and Upper Pleistocene deposits of the Black Sea coast of the Caucasus and the Kerch-Taman region. *Nauchnie Novosti i Zametki*, 1972, pp. 107–110. (In Russ.).

- Badyukova E.N. High karangat lagoon-transgressive terrace of Kerch channel. *Geomorfologiya*, 2009, no. 3, pp. 25–31. (In Russ.).
- Blagovolin N.S. *Geomorfologiya Kerchensko-Tamanskoi oblasti* [Geomorphology of the Kerch-Taman Region]. Moscow: Akad. Nauk SSSR Publ., 1962. 201 p.
- Buylaert J.P., Murray A.S., Gebhardt A.C., Sohbati R., Ohlendorg C., Thiel C., Wastegard S., Zolitschka B. Luminescence dating of the RASAFO core 5022-1D from Laguna Potrok Aike (Argentina) using IRSL signals from feldspar. *Quat. Sci. Rev.*, 2013, no. 7, pp. 70–80.
- Chepalyga A.L. The new concept of the Black Sea terraces of the South-East Crimea. In *Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda* [Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period]. Moscow: GEOS, 2015, no. 74, pp. 90–104.
- Dinamika landshaftnykh komponentov i vnutrennikh morskikh basseinov Severnoi Evrazii za poslednie 130000 let [Dynamics of Landscape Components and Inland Marine Basins of Northern Eurasia over Recent 130000 Years]. Moscow: GEOS, 2002. 232 p.
- Dodonov A.E., Tchepalyga A.L., Mihailescu C.D., Zhou L.P., Markova A.K., Trubikhin V.M., Simakova A.N., Konikov E.G. Last-interglacial records from central Asia to the northern Black Sea shoreline: Stratigraphy and correlation. *Geol. en Mijnbouw/Netherlands J. Geosci.*, 2000, no. 79, pp. 303–311.
- Fedorov P.V. *Stratigrafiya chetvertichnykh otlozhenii Krymsko-Kavkazskogo poberezh'ya i nekotorye voprosy geologicheskoi istorii Chernogo morya* [Stratigraphy of Quaternary deposits of the Crimean-Caucasian Coast and Some Questions of the Geological History of the Black Sea]. Tr. GIN AN SSSR. Moscow: Nauka Publ., 1963. 157 p. Fedorov P.V. Pleistocen Ponto-Kaspiya [The Ponto-Caspian Pleistocene]. Moscow: Nauka Publ., 1978. 165 p.
- Fedorov P.V. *Pleistocen Ponto-Kaspiya* [The Ponto-Caspian Pleistocene]. Moscow: Nauka Publ., 1978. 165 p.
- Geologiya shelfa Ukrainy. Kerchenskii proliv* [Geology of the Ukrainian shelf. The Kerch Strait]. Kiev: Naukova dumka, 1981. 186 p.
- Geokhronologiya SSSR* [Geochronology of the USSR]. Vol. 3. Leningrad: Nedra Publ., 1974. 357 p.
- Goretsky G.I. On the age ratios of precipitation of the Uzunliarian and Karangatian Transgressions. *Bull. MOIP. Otd. Geolog.*, 1995, vol. 30, no. 2, pp. 13–29. (In Russ.). *Dinamika landshaftnykh komponentov i vnutrennikh morskikh basseinov Severnoi Evrazii za poslednie 130 000 let*.
- Kurbanov R.N., Yanina T.A., Murray A.S., Semikolennykh D.V., Svistunov M.I., Shtyrkova E.I. The age of the Karangatian (Late Pleistocene) transgression of the Black Sea. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2019, no. 6, pp. 29–39. (In Russ.).
- Kurbanov R.N., Semikolennykh D.V., Yanina T.A., Tyunin N.A., Murray A.S. New data on the age of the karangatian transgression of the Black Sea. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 6, pp. 139–145. (In Russ.).
- Kurbanov R.N., Ulyanov V.A., Anoykin A.A., Pavlenok G.D., Semikolennykh D.V., Kharevich V.M., Taimagambe-ov Zh.K., Murray A.S. The first luminescent chronology of the initial Upper Paleolithic of East Kazakhstan (based on materials from the Ushbulak site). *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 5, pp. 131–148. (In Russ.).
- Lisiecki L.E., Stern J.V. Regional and global benthic $\delta^{18}O$ stacks for the last glacial cycle. *Paleoceanography*, 2016, no. 31, pp. 1–27.
- Luminescence Dating in Paleogeography. *Actual Problems of the Pleistocene Paleogeography. scientific achievements of the school of academician K.K. Markov*. Yanina T.A., Ed. Moscow, 2020, pp. 554–613. (In Russ.).
- Nevesskaya L.A. *Pozdnechetvertichnye dvustvorchatye mollyuski Chernogo morya, ikh sistematika i ekologiya* [Late Quaternary Bivalves of the Black Sea, Their Systematics and Ecology]. Tr. Paleontol. Inst. Akad. Nauk SSSR. Moscow: Nauka Publ., 1965. 392 p.
- Murray A., Marten R., Johnston A., Martin P. Analysis for naturally occurring radionuclides at environmental concentrations by gamma spectrometry. *J. Radioanal. Nucl. Ch.*, 1987, vol. 150, no. 2, pp. 263–288.
- Murray A.S., Wintle A.G. The single aliquot regenerative dose protocol: Potential for improvements in reliability. *Radiat. Meas.*, 2003, no. 37, pp. 377–381.
- Popov G.I. *Pleistotsen Chernomorsko-Kaspiiskikh proli-ov* [Pleistocene of the Black Sea and Caspian Sea Straits]. Moscow: Nauka Publ., 1983. 216 p.
- Prescott J.R., Hutton J.T. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: Large depths and long-term time variations. *Radiat. Meas.*, 1994, vol. 23, no. 2–3, pp. 497–500.
- Svitoch A.A. Karangatian stratotypes of the Taman and Kerch Peninsulas (comparative analysis). *Dokl. Akad. Nauk*, 2009, no. 424, pp. 669–671. (In Russ.).
- Semenenko V.N., Kovaluykh N.N. Absolute age of the Upper Quaternary deposits of the Azov-Black Sea basin according to the data of radiocarbon analysis. *Geol. Zh.*, 1973, vol. 33, no. 6, pp. 91–97. (In Russ.).
- Semikolennykh D.V., Kurbanov R.N. Tracing the Karangat Sea. *Priroda*. 2020, vol. 11, pp. 27–34. (In Russ.).
- Shelkoplyas V.N., Khristoforova, T.F. On the structure of marine Quaternary deposits of the Kerch region. *Geologiya i Poleznye Iskopaemye Mirovogo Okeana*, 2007, no. 2, pp. 120–126. (In Russ.).
- Wintle A.G., Murray A.S. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Radiat. Meas.*, 2006, no. 41, pp. 369–391.
- Yanina T.A. *Neopleistotsen Ponto-Kaspiya: biostratigrafiya, paleogeografiya, korrelyatsiya* [Neo-Pleistocene of the Ponto-Caspian Region: Biostratigraphy, Paleogeography, Correlation]. Moscow: MGU, 2012. 264 p.
- Yanina T.A. The Ponto-Caspian region: Environmental consequences of climate change during the late Pleistocene. *Quat. Int.*, 2014, vol. 345, pp. 88–99.
- Yanko V.V., Frolov V.T., Motnenko I.V. Foraminifera and lithology of the stratotype section of the Karangatian layer (the Quaternary of the Kerch Peninsula). *Bull. MOIP. Otd. Geologii*, 1990, no. 65, pp. 83–97. (In Russ.).
- Zubakov, V.A. Climatostratigraphic scheme of the Black Sea pleistocene and its correlation with the oxygen-isotope scale and glacial events. *Quat. Res.*, 1988, no. 29, pp. 1–24.

УДК 502/504

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ РЕГИОНАЛЬНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТРУКТУР В РОССИИ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

© 2023 г. Н. Н. Ключев*

Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: klyuev@igras.ru

Поступила в редакцию 24.03.2022 г.

После доработки 06.07.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

С экологических позиций оценены структурные изменения в промышленности российских регионов за 2005–2019 гг. Уменьшение доли добывающей индустрии и доли опасных видов деятельности в обрабатывающей промышленности рассматривалось как экологически прогрессивное изменение региональной промышленной структуры (ее экологизация), а противоположное изменение — как деэкологизация. Абсолютное большинство основных добывающих регионов страны увеличили добычу минеральных ресурсов, при этом в половине из них она возросла более чем в 1.5 раза, а в четверти — более чем вдвое. Четко обозначился северо-восточный вектор развития добывающей промышленности страны, обуславливающий относительное смещение крупномасштабных воздействий на природу в Восточную Сибирь, на Дальний Восток, Европейский Север — на экологически значимые и легко ранимые ландшафты криолитозоны, а также на шельфовые области. Количество регионов, где доля добычи в выпуске промышленной продукции превышает 50%, увеличилось с 9 до 14. В 2/5 российских регионов заметно увеличилась доля экологически опасных отраслей в обрабатывающем секторе промышленности. В регионах, где природоёмкая добыча существенно сокращается (ХМАО, Татарстан), появляются первопередельные отрасли обрабатывающей индустрии, также не отличающиеся экологичностью. Лишь в Белгородской, Калининградской и Мурманской областях экологичнее стали и промышленные структуры в целом, и их обрабатывающие секторы. Усилились межрегиональные различия по уровню экологичности промышленных структур. Трудности методического и информационного характера не позволили установить взаимосвязи между структурными изменениями в промышленности российских регионов и динамикой воздействий на природные компоненты.

Ключевые слова: экологические последствия, промышленность, отраслевая структура, антропогенные воздействия, регионы России, постсоветская динамика

DOI: 10.31857/S2587556623010090, EDN: LGOHTY

ВВЕДЕНИЕ

Экологическая проблематика в настоящее время лидирует в научной литературе, СМИ и даже в мировой политике. В России, унаследовавшей природоёмкую сырьевую экономику, необходимость ее перехода на экологичную траекторию развития, отвечающую вызовам современности, обсуждается все постсоветское время.

Величина и характер негативного антропогенного давления на природу в значительной степени определяются отраслевой структурой хозяйства и прежде всего промышленности. В регионе, специализирующемся на легкой промышленности, величина негативного воздействия на природу будет значительно меньше, чем в угледобывающем регионе (при допущении одинаковой величины выпуска продукции в этих регионах). В этой связи актуально определить, какие изменения произошли в отраслевой структуре промыш-

ленности российских регионов, как изменились соотношения добывающих и обрабатывающих секторов, а также доли экологически относительно нейтральных видов деятельности в составе обрабатывающей индустрии.

Цель исследования — оценить с экологических позиций сдвиги в отраслевой структуре промышленности регионов России, произошедшие в начале XXI в.

ИЗУЧЕННОСТЬ ТЕМЫ

Постсоветская трансформация использования природных ресурсов России и ее регионов рассматривалась многими отечественными, а также зарубежными исследователями (Архипова, Бардаль, 2019; Данилов-Данильян, Ключев, 2020; Литвиненко, 2012; Приваловская, Волкова, 2009; Савельева, 2012; Bradshaw and Connolly, 2016; Doros-

henko et al., 2014; и др.). Солидные обобщающие монографии подготовлены на географическом факультете МГУ (География, общество ..., 2005; Регионы ..., 2014), в Институте географии РАН (Вызовы ..., 2020; Природопользование ..., 2014; Рациональное ..., 2010), географами Сибири (География Сибири ..., 2014) и Дальнего Востока (Гео-системы ..., 2010; Природопользование Дальнего ..., 2005). обстоятельный обзор публикаций в данной исследовательской области представлен в (Гладкевич, Разумовский, 2016). Вместе с тем, на наш взгляд, фронт исследований в сфере географии природопользования узок и не соответствует значимости этой сферы в хозяйстве сырьевой сверхдержавы.

Природно-ресурсная проблематика тесно переплетается с эколого-экономико-географической, в центре внимания которой в последние десятилетия находится экологическая оценка трансформации хозяйства в постсоветской России (Битюкова, 2016, 2022; Ключев, 2000, 2007; Мирзеханова, 2021 и др.). Ближе всего к тематике настоящей статьи — работы В.Р. Битюковой, в которых, в частности, рассчитывался так называемый эффект декаплинга, т.е. рассогласования темпов экономического роста и загрязнения природной среды по регионам страны; установлено, что в периоды кризисов реакция и территориальных, и отраслевых структур на экономический спад значительно выше, чем на стадии экономического роста; показано, что роль технологических факторов постепенно снижалась, а значение структурных сдвигов в промышленности возрастала. В работе (Битюкова, 2014) проанализирована динамика отраслевой структуры промышленности России в целом в сравнении с динамикой воздействий на природу в 2005–2012 гг. Аналогичный анализ российских регионов содержит многостороннюю и детальную оценку антропогенных воздействий, но структурные изменения региональной промышленности рассматриваются при этом преимущественно на качественном уровне.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование базируется на материалах официальной статистики¹. В работе использовались статистические методы: метод группировки, анализ средних величин, динамических рядов и показателей вариации. Средством анализа межрегиональных различий и визуализации его результатов выступало тематическое картографирование структурных и динамических характеристик регионов страны.

Промышленная структура страны, естественно, меняется от года к году, но ее изменчивость невелика. Доля добывающей индустрии в объеме промышленного производства России за 2005–2019 гг. сравнительно устойчива — коэффициент вариации этой доли составляет 5.6%, а доли обрабатывающей промышленности — даже 2.1%. Однако в отдельных регионах промышленные структуры очень изменчивы.

Определенной характеристикой *степени экологичности* региональных промышленных структур может выступать соотношение в них экологически нежелательных и относительно нейтральных отраслей. Ранее были проведены оценки изменений доли “грязных” отраслей (природо-емких, с большим удельным выходом отходов) в промышленности регионов России за 1990–2004 гг. (Природопользование ..., 2014). Было установлено, что эти доли возросли во всех регионах, кроме Самарской и Ленинградской областей.

Продолжить с 2005 г. данный временной ряд нельзя из-за изменения статистической классификации элементов этих структур — перехода с ОКОНХ на ОКВЭД, а затем и ОКВЭД-2. Ниже предпринята попытка оценить сдвиги в промышленности регионов за период существования новых форм статистического учета — с 2005 по 2019 г. Виды деятельности, отнесенные в данной работе к числу экологически опасных, отражены в табл. 1. Все эти виды деятельности относятся к первой категории по “негативному воздействию на окружающую среду”². В перечень входят и те виды деятельности, которые в рамках “нормального функционирования” не отличаются крупными выбросами, сбросами, отходами, но становятся очень опасными в случае нештатных ситуаций (ГЭС, АЭС). Конечно, такая группировка видов деятельности носит весьма схематичный, упрощенный характер и

¹ Регионы России. Социально-экономические показатели. 2002–2020. https://gks.ru/bgd/regl/b20_14p/Main.htm (дата обращения 30.10.2021); Российский статистический ежегодник. М.: Госкомстат России, 1994. 799 с.; Российский стат. ежегодник. 2003–2020. https://gks.ru/bgd/regl/b20_13/Main.htm (дата обращения 30.10.2021); Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году”. М.: Минприроды России. https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2016_/ (дата обращения 30.10.2021); Охрана окружающей среды в России — 2020 г. https://gks.ru/bgd/regl/b20_54/Main.htm (дата обращения 30.10.2021).

² Постановление Правительства Российской Федерации от 31 декабря 2020 г. № 2398 “Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категории”. <https://docs.cntd.ru/document/573292854> (дата обращения 30.10.2021).

Таблица 1. Воздействие на природу экологически опасных видов деятельности, 2016 г., % в промышленности России

Показатель воздействия на природу	Экологически опасные виды деятельности			Всего экологически опасные виды деятельности (гр. 2 + гр. 3 + гр. 4)	Промышленность в целом
	Добыча полезных ископаемых	Обрабатывающие производства: производство кокса и нефтепродуктов; резиновых и пластмассовых изделий; химических веществ и химических продуктов; лекарственных средств и материалов, применяемых в медицинских целях; прочей неметаллической минеральной продукции; металлургическое; готовых металлических изделий (кроме машин и оборудования)	Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха. Водоснабжение; водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений		
1	2	3	4	5	6
Выбросы загрязняющих атмосферу веществ от стационарных источников	34.3	33.5	25.4	93.2	100
Водопотребление	8.5	...	75.4	...	100
Сброс загрязненных сточных вод	6.9	12.3	70.6	89.8	100
Образование отходов производства	89.1	5.0	0.5	94.6	100
Нарушенные земли (2019 г.)	60.0	...	...	...	100

Составлено по: Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году». М.: Минприроды России. https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2016_/ (дата обращения 30.10.2021); Охрана окружающей среды в России – 2020 г. https://gks.ru/bgd/regl/b20_54/Main.htm (дата обращения 30.10.2021).

Примечание. В последующих изданиях докладов показатели в разрезе видов деятельности не публиковались.

лишь в первом приближении характеризует степень экологичности промышленности³. Она не учитывает технологические и природоохранные характеристики видов деятельности, возраст и степень износа основных и природоохранных фондов и т.п.

Были рассчитаны три показателя, в разных аспектах характеризующих степень экологичности структуры региональной индустрии: 1) доля до-

бывающей промышленности в промышленной продукции; 2) доля экологически опасных видов деятельности в продукции обрабатывающей промышленности; 3) доля всех экологически опасных видов деятельности в промышленной продукции. Далее определялись изменения этих показателей за исследуемый период. Снижение доли добычи и доли опасных видов деятельности в обработке рассматривалось как экологически прогрессивное изменение региональной промышленной структуры (ее *экологизация*), а противоположное изменение оценивалось как *деэкологизация*.

Отметим, что анализ структурных сдвигов в промышленности, естественно, проводится в стоимостных показателях, поскольку содержательный анализ промышленных структур в нату-

³ Относительность степени экологичности сфер деятельности видна, например, из следующего примера. Такие бесспорно прогрессивные, постиндустриального плана объекты, как дата-центры, потребляют 3–4% мирового потребления электроэнергии (Коммерсантъ-Информационные технологии. 26 октября 2020 г.) и, следовательно, ответственны за соответствующую долю негативных воздействий на природу, оказываемых электроэнергетикой.

Таблица 2. Изменения доли экологически опасных видов деятельности в промышленности России, Белгородской области и Еврейской АО за 2005–2019 гг., %

Показатель	Год	Россия	Белгородская область	Еврейская АО
Доля добывающей промышленности в промышленной продукции	2005	22.5	25.8	6.5
	2019	25.1	19.0	54.2
Изменение доли		2.7	–6.8	47.6
Доля опасных видов деятельности в продукции обрабатывающей промышленности	2005	52.5	54.7	32.0
	2019	56.7	38.8	51.6
Изменение доли		4.5	–15.9	19.6
Доля всех опасных видов деятельности в промышленной продукции	2005	68.9	70.6	53.0
	2019	71.8	52.9	87.6
Изменение доли		3.0	–17.7	34.6

Составлено по данным Росстата.

ральных показателей невозможен. Между тем цены на продукцию разных отраслей меняются по-разному, что искажает оценки степени экологичности происходящих сдвигов. Поэтому эти оценки лишь в самом общем виде отражают такие сдвиги. Они высвечивают один, но важный аспект экологической трансформации региональной индустрии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экологичность структурных сдвигов в промышленности российских регионов

В табл. 2 приведены примеры двух регионов, различающихся диаметрально противоположными экологическими траекториями. В Еврейской АО сильно выросла доля добычи и доля “грязных отраслей” в обрабатывающей индустрии, в результате – негативный экологический тренд региональной промышленности в целом. В Белгородской области по всем трем параметрам наблюдаются позитивные тенденции.

Еще раз подчеркнем, что здесь речь идет не о величине воздействия региональной промышленности на природу и не об экологичности промышленности региона, а об *изменениях* отраслевой структуры с точки зрения ее экологичности. Белгородская область по величине добычи минерального сырья намного превосходит Еврейскую АО. Можно добавить, что и социальные последствия природоразрушающей добычи в Белгородской области намного существеннее, так как добыча происходит на территории с плодородными почвами и высокой плотностью населения (для которого, напомним, природа и должна “охраняться”). Однако с точки зрения динамики промышленной структуры в Белгородской области налицо экологически позитивные изменения, а в Еврейской АО – негативные.

В структуре российской промышленности в целом обнаруживается экологически нежелательная тенденция.

На рис. 1 отражены 42 региона, поставляющих в совокупности 88% продукции *добывающей промышленности* страны (2019 г.). На графике нет Астраханской области (1.85% российской добычи), “не вписавшейся” в вертикальную ось из-за огромного роста добычи (1925%) за период 2005–2019 гг., ее доля в региональной промышленности возросла с 23.2 до 75.2%. Абсолютное большинство добывающих регионов показали рост добычи, лишь в пяти из них фиксируется ее сокращение, наиболее существенное по объему добычи – в ХМАО. При этом в половине основных добывающих регионов добыча минеральных ресурсов возросла более чем в 1.5 раза, а в четверти – более чем вдвое.

В целом налицо северо-восточный вектор развития добывающей индустрии страны. Следствие такого сдвига – распространение крупномасштабных воздействий на экологически значимые природные компоненты и комплексы Восточной Сибири, Дальнего Востока и Европейского Севера, особо уязвимые к воздействиям из-за широкого распространения многолетнемерзлых пород. По оценкам Минприроды, более 40% оснований зданий и сооружений в российской криолитозоне уже имеют деформации⁴. Добыча в Охотском (Сахалинская область) и Печорском (Ненецкий АО) морях осуществляется в экстремальных природных условиях: низкие температуры, дрейфующие льды, сильные штормы и колебания уровня моря и др. Современные климатические изменения, проявляющиеся и в учащении экстремальных опасных явлений, чреваты авариями с мало предсказуемыми экологическими последствиями. А

⁴ Государственное управление ресурсами. Экология. Коммерсантъ. Приложение № 1. 2 сентября 2021 г.

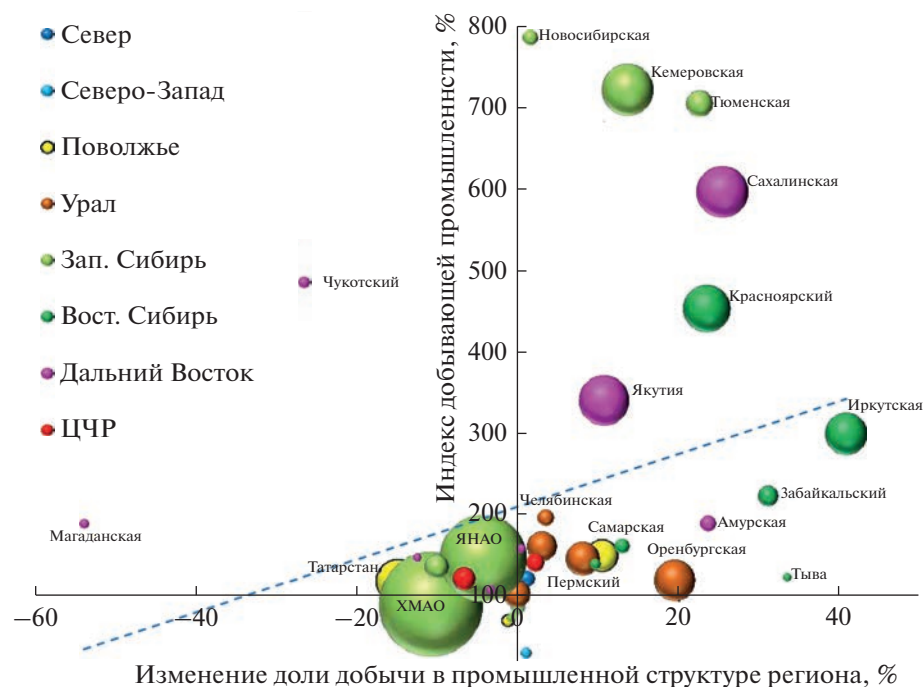


Рис. 1. Динамика добывающей промышленности в российских регионах в 2005–2019 гг. Диаметр шара пропорционален объему выпуска добывающей промышленности региона в 2019 г., руб.

Примечание. На графике не видны значки нескольких регионов с небольшими объемами добычи — они перекрываются шарами регионов, где добыча очень велика.

разработки нефти в замкнутой акватории Каспийского моря-озера, обеспечившие рекордные темпы добычи в Астраханской области, при нештатных ситуациях представляют угрозу главному на Земле стаду осетровых рыб. Для нашей страны самовоспроизводящиеся биологические ресурсы Каспия не менее важны, чем его углеводороды.

Количество регионов, где доля добывающей индустрии в выпуске промышленной продукции превышает 50%, увеличилось с 9 в 2005 г. до 14 в 2019 г.⁵ Более 50% продукции добывающей промышленности страны обеспечивают всего пять регионов: ХМАО, ЯНАО, Кемеровская, Сахалинская области и Якутия. Однако за исследуемый период добыча полезных ископаемых стала более рассредоточенной по территории страны. Если на первые пять регионов в 2005 г. приходилось свыше 2/3 российской добычи (по стоимости произведенной продукции), то в 2019 г. — только половина, а доля первой десятки регионов сократилась с 4/5 до 2/3. Заметим, что рассредоточение

добывающей индустрии страны в стоимостных показателях обеспечивается главным образом нефтяной промышленностью (самой крупной по выручке добывающей отрасли) вследствие сокращения добычи в Западной Сибири и вовлечения в эксплуатацию новых ресурсов Восточной Сибири, Ненецкого АО, шельфа Охотского и Каспийского морей. Хотя в постсоветское время началась разработка многих новых месторождений угля, газа, железных и полиметаллических руд, прежде всего на востоке страны (Данилов-Данильян, Ключев, 2020), роль регионов-лидеров сохраняется, что видно из данных по физическим объемам добычи этих ресурсов (табл. 3).

Наибольшие приросты региональной доли в добывающей промышленности страны показали Сахалинская область (почти 4%), Красноярский край (3.4%), Иркутская (2.8%) и Астраханская (1.5%) области, а наибольшее сокращение этой доли фиксируется в ХМАО (–20.9%).

Сдвиги в региональных промышленных структурах разнонаправлены (рис. 2). В четверти регионов наблюдается существенный рост (более 8%) доли добывающих отраслей в промышленности: в Астраханской области (+52.0), в основном за счет разработки нефтяных месторождений Каспийского шельфа; в Еврейской АО (+47.6% — разработка месторождений железных и марганцевых руд); Иркутской области (+40.8 — вовлечение в

⁵ В результате объединения в 2005–2008 гг. ряда субъектов Федерации их количество сократилось. Но автономии, вошедшие в состав объединенных субъектов, не выделялись сколько-нибудь значимыми — в масштабах страны — объемами добычи. Поэтому укрупнение субъектов Федерации не повлияло на увеличение количества регионов с доминированием добывающей индустрии. То же касается и Крыма, и Севастополя, вошедших в состав России в 2014 г.

Таблица 3. Доля регионов-лидеров в добыче минеральных ресурсов России, в физических объемах, %

Минеральные ресурсы	Регионы, лидирующие по добыче	1990 г.	2005 г.	2019 г.
Нефть	ХМАО	61	57	42
Газ	ЯНАО	85	87	82
Уголь	Кемеровская область	38	55	57
Железная руда	КМА: Белгородская и Курская области	40	54	54

Составлено по данным Росстата.

эксплуатацию нефтегазовых и угольных месторождений); в Тыве и Забайкальском крае (+33.4 и +31.1% соответственно — новые месторождения угля и полиметаллов); Сахалинской области (+25.4% — нефтегазоразработки на Охотском шельфе) и др. В то же время доля добычи сократилась в главных добывающих регионах страны — в ЯНАО (–4.3) и ХМАО (–0.8), а особенно сильно в Татарстане (–15.0%).

Заметное “утяжеление” *обрабатывающей индустрии* произошло в 2/5 регионов (максимально в Чукотском АО, ХМАО и Магаданской области), где природоёмкая добыча сопровождается появлением первопередельных отраслей, также не отличающихся высокой экологичностью. А именно первые этапы переработки природного сырья наиболее энергоёмки — в отличие от тонких переделов последующих ступеней. Так, в XXI в. в России появилось много новых нефтегазохимических предприятий (мощностей) (рис. 3⁶), в то время как в странах ЕС развитие нефтехимии ограничивается именно экологическими требованиями. Новые мощности промышленности основного органического синтеза возникли, строятся и проектируются в регионах добычи сырья (в Татарстане, Башкортостане, ХМАО, ЯНАО), в том числе новых его разработок (в Иркутской области). Это увеличивает удельный вес неэкологичных сфер в промышленности упомянутых регионов, поскольку развитие в стране нефтегазохимии ограничивается пока в основном производством мономеров и полупродуктов. Последующие, более экологичные стадии химии органического синтеза (производства пластмассовых изделий промышленного, строительного, текстильного, медицинского и бытового назначения) остаются пока слабым звеном российской индустрии (Клюев, 2020).

Новые предприятия отрасли появляются или планируются и в приморских регионах — в Ленинградской области, Приморском крае, что связано с их преимущественно экспортной ориента-

цией. В этом проявляется влияние внешнеэкономической конъюнктуры на реструктуризацию промышленности регионов. Такой вектор пространственного тяготения нефтегазохимической промышленности, связанный и со строительством новых экспортных портов и терминалов, ведет к усилению хозяйственных нагрузок на акватории и прибрежные территории. Возрастание экологических угроз особенно актуально для российской Прибалтики в связи с и так высокой хозяйственной нагрузкой (в том числе со стороны сопредельных стран) на акваторию моря, особо уязвимого к антропогенным воздействиям из-за малых глубин и слабого водообмена с Мировым океаном через каскад узких проливов. Заметим, что постсоветский сдвиг к морским побережьям касается всего хозяйственного комплекса страны и ее населения (их “мореориентация” — по А.Г. Дружинину (2020)). Вследствие этого растет общая антропогенная нагрузка в прибрежных регионах — экологически неблагоприятные сдвиги в структуре региональной промышленности видны в Санкт-Петербурге, Ленинградской, Архангельской, Астраханской, Ростовской областях, в Краснодарском крае (см. рис. 3).

Особый интерес представляют регионы, где существенный рост доли добычи сопровождается ростом доли опасных отраслей в обработке. Такие сдвиги наблюдаются в Еврейской АО, Забайкальском крае, Оренбургской области, Якутии. Отдельную группу составляют регионы с противоположными тенденциями. В некоторых из них доля добычи растет при определенной экологизации обрабатывающей промышленности (в Иркутской, Амурской, Сахалинской областях, Бурятии). В других регионах доля добывающей индустрии падает при деэкологизации структуры обрабатывающей промышленности вследствие появления в них горнообогатительных комбинатов и предприятий первого передела (например, в Магаданской области в результате строительства горнообогатительных комбинатов и аффинажных производств).

Антирейтинг по негативной экологической динамике региональных промышленных структур по обобщенному критерию (рост доли добывающей индустрии плюс рост доли неэкологичных отраслей в обработке) возглавляет Еврейская

⁶ На картосхеме отражены и проекты модернизации действующих нефтеперерабатывающих заводов, направленной на увеличение выхода пропилена (Нижний Новгород, Пермь, Омск), а также пока закрытый проект нефтехимического комплекса “Роснефти” вблизи Находки.

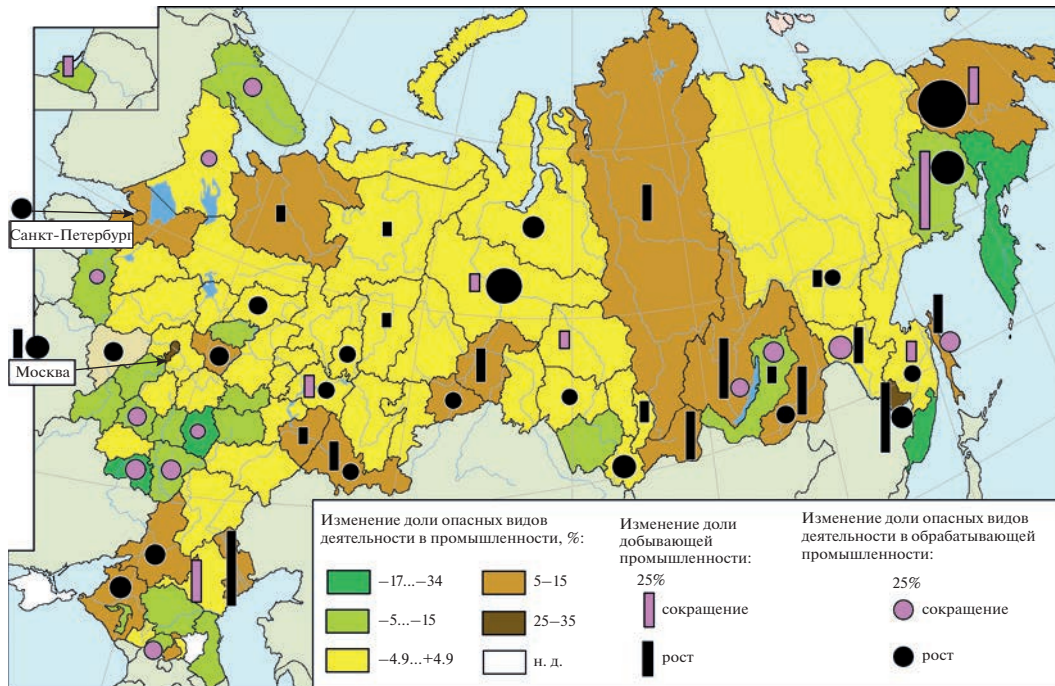


Рис. 2. Изменения региональных промышленных структур за 2005–2019 гг. Значками отражены только наиболее существенные изменения. Размеры значков пропорциональны изменениям соответствующих долей. Высота столбика и диаметр круга, указанные в легенде, соответствуют изменениям долей на 25%.

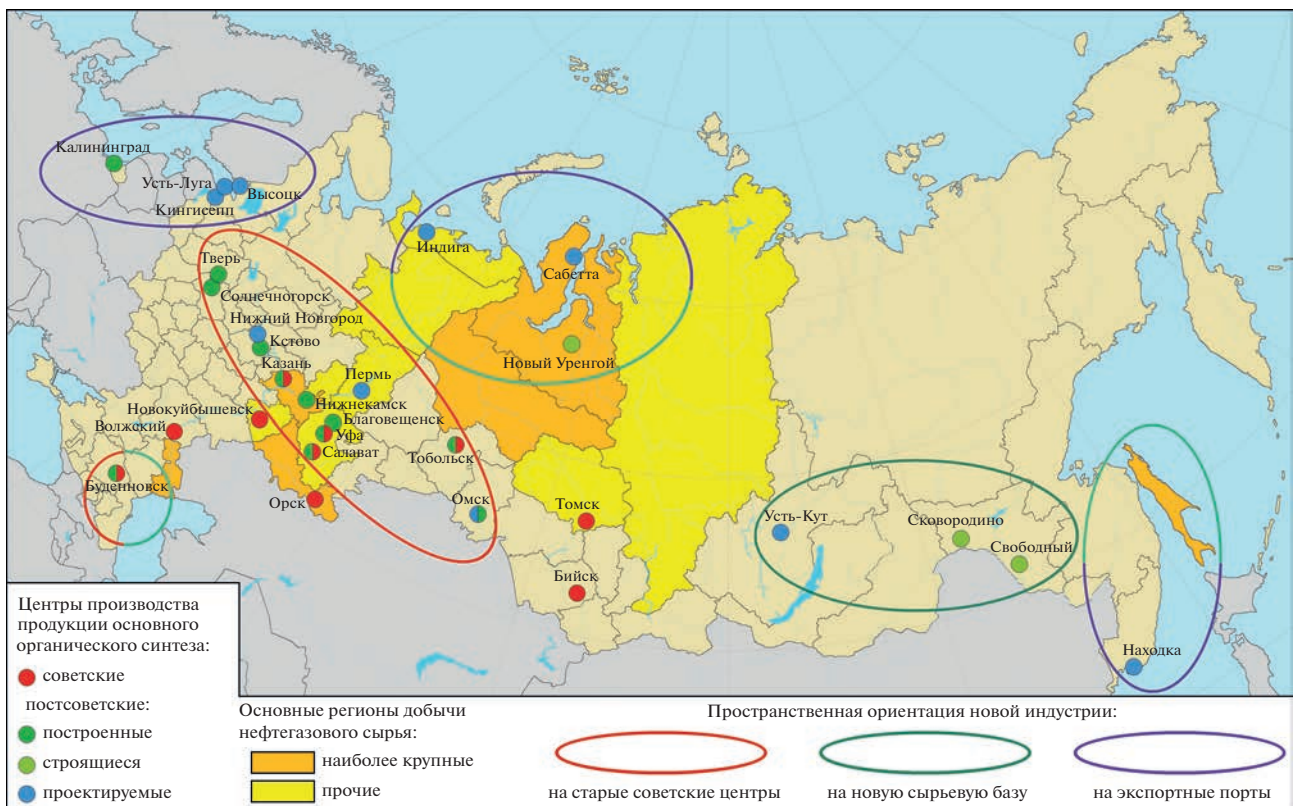


Рис. 3. Советская и постсоветская промышленность основного органического синтеза.

Таблица 4. Вариабельность доли экологически опасных видов деятельности в промышленности регионов в 2005 и 2019 гг.

Показатель	2005 г.	2019 г.
Коэффициент вариации, %	31.3	36.9
Размах вариации	75.6	80.5
Максимум/минимум	4.2	5.2

Составлено по данным Росстата.

АО: в сравнительно небольшой по объему промышленности области (0.034% от РФ, 2019 г.) ее отраслевую структуру существенно трансформировали начало разработки Кимканского и Сутарского железорудных месторождений и ввод в действие в 2017 г. Кимкано-Сутарского ГОКа. Далее в этом рейтинге с большим отрывом следуют Ростовская, Астраханская области и Тыва. Лишь в трех регионах – в Белгородской, Калининградской и Мурманской областях экологичнее стали и промышленные структуры в целом, и их обрабатывающие секторы.

Усилились межрегиональные различия по уровню экологичности промышленных структур (табл. 4), что свидетельствует о тенденции расчленения регионов по экологическим параметрам.

Для периода 1990–2004 гг. наблюдалась определенная корреляционная зависимость: чем выше в регионе доля опасных отраслей, тем значи-

тельнее она увеличилась за постсоветское время (коэффициент парной корреляции составляет 0.59) (Природопользование ..., 2014). Но в период 2005–2019 гг. этого не наблюдается ($R = 0.11$), что во многом объясняется уже достигнутым очень высоким уровнем насыщения такими отраслями в добывающих регионах (Ненецкий АО – 98.4%, Сахалинская область – 91.2%, Якутия – 88.3%).

Изменения экологичности региональных промышленных структур и динамика воздействий на природные компоненты

Интересно сопоставить полученные оценки изменений экологичности региональных промышленных структур (их экологизации/деэкологизации) с динамикой воздействий на природу, из реального многообразия которых рассмотрим такие важные параметры, как выбросы вредных веществ в атмосферу и сброс загрязненных сточных вод (рис. 4–5).

За период 2005–2019 гг. промышленная нагрузка на природу, согласно официальной экологической статистике, в России в целом заметно сократилась: выбросы в атмосферу от стационарных источников – на 15%, сброс загрязненных сточных вод – на 29%. Но при этом выбросы в атмосферу существенно (на 20% и более) увеличились в 27 регионах (максимально – в Краснодарском крае), причем в 11 регионах – более чем в два раза. В то же время сброс загрязненных сточ-

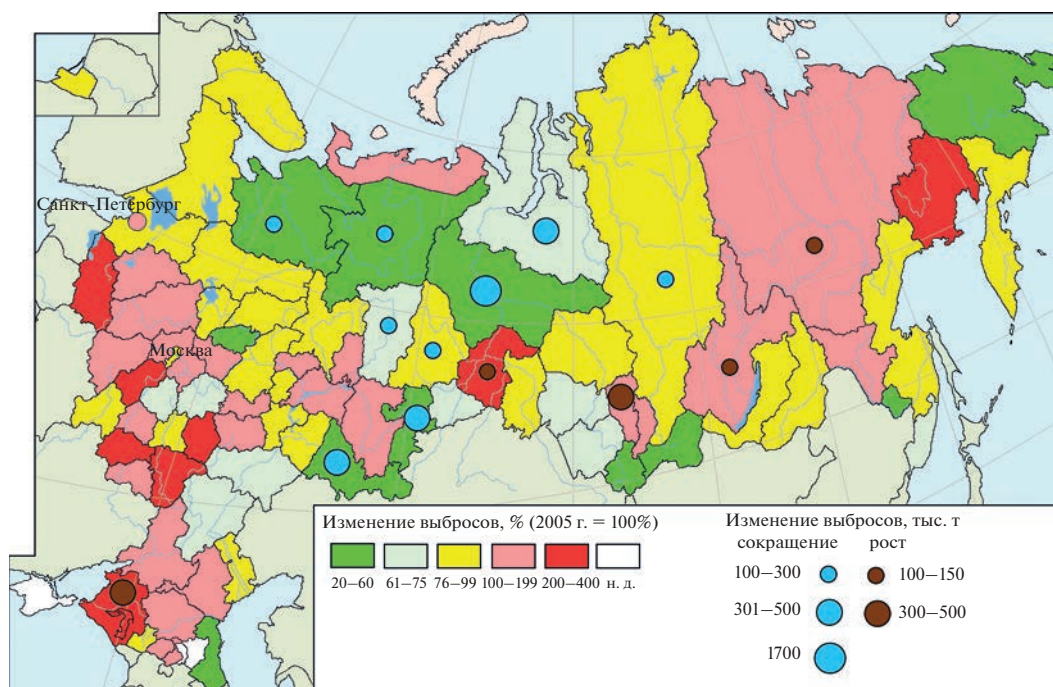


Рис. 4. Динамика выбросов в атмосферу от стационарных источников по российским регионам за 2005–2019 гг. (в абсолютных величинах показаны только наиболее существенные изменения).

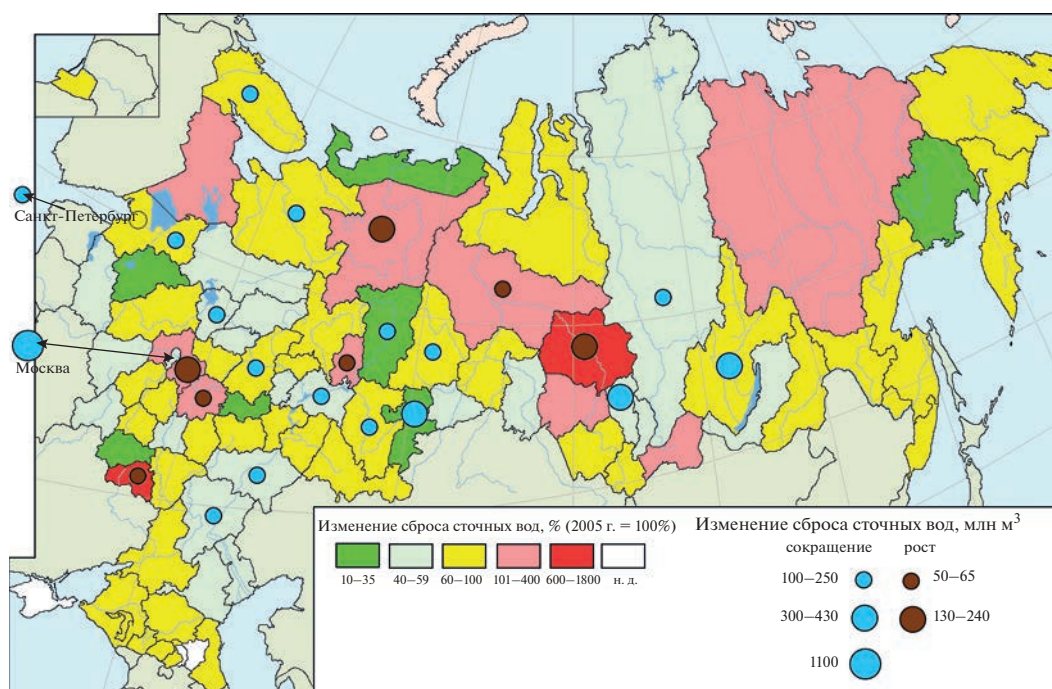


Рис. 5. Динамика сброса загрязненных сточных вод по российским регионам за 2005–2019 гг. (в абсолютных величинах показаны только наиболее существенные изменения).

ных вод значительно (на 20% и более) вырос лишь в 8 регионах (максимально в Томской и Белгородской областях). Сокращение негативного воздействия на атмосферу (более чем на 20%) наблюдалось в 32 регионах, а на водный компонент — в 55. В пестрой картине не удалось обнаружить четких географических закономерностей в динамике загрязнения (очистения) территории [аналогичный анализ за 1990–2003 гг. показал некоторое оздоровление производства в европейской части страны и ухудшение экологических характеристик промышленности в Азиатской России, особенно в нефтегазодобывающих регионах (Клюев, 2007)].

Анализ показал отсутствие сопряженности между изменениями экологичности региональных промышленных структур и динамикой воздействий на природные компоненты: коэффициент корреляции составляет для выбросов в атмосферу -0.09 , для сброса сточных вод -0.07^7 . Так, в Белгородской области, одном из лидеров экологизации структуры промышленности, выбросы увеличились в 1.5 раза, а сброс загрязненных сточных

вод — в 6 раз, в то время как в Еврейской АО (аутсайдере рейтинга) данные показатели сильно уменьшились (табл. 5). Это объясняется, в частности, неравномерной динамикой промышленности по регионам страны: индексы промышленности, отражающие изменения физического объема производимой продукции, за изучаемый период варьируют от 468 (Сахалинская область) до 89% (Калмыкия). Поэтому позитивный эффект роста доли экологически нейтральных видов деятельности в регионе может перекрываться ростом выпуска в нем промышленной продукции. Учесть же промышленные индексы в разрезе “видов деятельности” не позволяет существующая статистическая отчетность.

На отсутствие указанной корреляции влияют и другие особенности статистического учета. Объемы сточных вод часто включают не только промышленные стоки. Некоторые промышленные предприятия, особенно крупные, отчитываются по форме № 2-ТП (водхоз), в том числе, и за коммунальные стоки, поскольку содержат на своем балансе очистные сооружения хозяйственных сточных вод городов и поселков, в которых они расположены. Отсутствие корреляционной связи, на наш взгляд, связано также с невысоким качеством экологической статистики и недостатками мониторинга. Данные по выбросам в атмосферу зачастую формируются не на основе их фиксации датчиками на предприятиях, а рассчитываются по формулам. В.И. Данилов-Данильян

⁷ Возможно, более высокая теснота связи обнаружится при использовании интегральных индексов антропогенного воздействия, включающих широкий спектр воздействий, которые разрабатывает, например, В.Р. Битюкова (2014). Интересно также проанализировать, как изменения экологичности промышленных структур отражаются на состоянии природных компонентов и комплексов (качестве воды, воздуха и т.д.).

Таблица 5. Динамика экологичности региональных промышленных структур и антропогенных воздействий на природу в 2005–2019 гг., % (2005 г. = 100%)

Регион	Изменение:		
	доли экологически опасных видов деятельности в промышленности региона	выбросов в атмосферу от стационарных источников	сброса загрязненных сточных вод в поверхностные водотоки
Еврейская АО	34.6	51.1	89.8
Ростовская область	14.9	108.2	71.6
Астраханская область	13.6	79.4	53.5
Республика Тыва	12.6	20.8	102.1
Краснодарский край	11.5	382.3	92.1
Калининградская область	–14.1	82.1	76.9
Тамбовская область	–17.1	270.4	72.9
Белгородская область	–17.7	153.9	625.8
Приморский край	–23.3	68.5	74.4
Камчатский край	–34.0	92.7	91.2

Составлено по данным Росстата.

Примечание. В таблице показаны некоторые регионы-лидеры (выделены цветом) и аутсайдеры рейтинга, отражающего динамику экологичности региональных промышленных структур.

отмечает, что данные Государственных докладов о состоянии окружающей среды расходятся с реальностью до десяти раз⁸. За 2005–2018 гг. количество водопользователей, предоставляющих статистические отчеты по форме № 2-ТП (водхоз), уменьшилось примерно на 40%⁹. Это не может не отражаться на сопоставимости данных. В районах нефтегазодобычи величина нарушенных земель фиксируется лишь в пределах лицензионных участков, а, например, по данным дистанционного зондирования, на Тазовском полуострове 60% нарушенных земель располагается вне месторождений и официально не учитывается (Корниенко, 2011).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ структурных сдвигов в российской промышленности показал, что за 2005–2019 гг. абсолютное большинство основных добывающих регионов страны увеличили добычу минеральных ресурсов, при этом в половине из них добыча выросла в 1.5 раза и более, а в четверти — более чем вдвое. Это свидетельствует об усилении в их промышленном комплексе позиций природоемких энерго- и материалопроизводящих секторов экономики.

⁸ Регенерация. Коммерсантъ. Приложение № 177. 30 сентября 2021 г.

⁹ Государственный доклад “О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году”. М.: НИА-Природа, 2019. 290 с.

Четко обозначился северо-восточный вектор развития добывающей индустрии страны, и, следовательно, смещение крупномасштабных воздействий на природу в Восточную Сибирь, на Дальний Восток, Европейский Север — на легко ранимые ландшафты криолитозоны, а также на шельфовые области.

Количество регионов, где доля добычи в выпуске промышленной продукции превышает 50%, увеличилось с 9 до 14. Более 50% продукции добывающей индустрии страны обеспечивают всего пять регионов: ХМАО, ЯНАО, Кемеровская, Сахалинская области и Якутия.

В 2/5 российских регионов заметно увеличилась доля экологически опасных отраслей в обрабатывающем секторе промышленности (максимально в Чукотском АО, ХМАО и Магаданской области). В регионах, где природоемкая добыча существенно сокращается (ХМАО, Татарстан), появляются первопередельные отрасли обрабатывающей индустрии, также не отличающиеся экологичностью. Преимущественно экспортная ориентация предприятий по первичной переработке природного сырья обуславливает экологически неблагоприятные сдвиги в промышленности ряда приморских регионов. Лишь в Белгородской, Калининградской и Мурманской областях экологичнее стали и промышленные структуры в целом, и их обрабатывающие секторы. Усились межрегиональные различия по уровню экологичности промышленных структур.

В целом за исследуемый период структурная “утяжеленность” промышленности регионов мало изменилась, в большинстве из них не произо-

шло сколько-нибудь существенной экологизации промышленных структур. Такая траектория развития резко контрастирует с “зеленой” трансформацией в экономике высокоразвитых стран, а также Китая. Но в этих странах экологическая модернизация обеспечена (хотя бы частично) технической базой. России нужна одновременно и промышленная, и экологическая модернизация.

Поскольку российские минеральные ресурсы в основном ориентированы на экспорт, добывающие регионы становятся еще более зависимыми от конъюнктуры мирового рынка. Резко обострившаяся в 2022 г. международная обстановка настоятельно требует развития “верхних этажей” технологических цепочек, более нейтральных по отношению к природе. Учитывая чрезмерную антропогенную нагрузку в пределах главной полосы расселения, в качестве районов размещения новых производственных мощностей по использованию минерального сырья видится зона “ближнего Севера” (Лаженцев, 2015).

Актуальные геополитические вызовы — антироссийские санкции и контрсанкции — создают и стимулы, и барьеры экологической модернизации промышленности. Так, блокирование российского экспорта энергоносителей вынуждает использовать нефтегазовые ресурсы для развития отечественной промышленности органического синтеза высоких переделов, а также частично сократить объемы выпуска продукции природоразрушающей добывающей индустрии. Запрет на российский импорт продукции машиностроения настоятельно требует создания собственных мощностей по выпуску высокотехнологичной продукции, относительно мало травмирующих природные комплексы. В то же время на фоне геополитических потрясений российским компаниям приходится прежде всего думать о выживании, адаптации к новым тотальным ограничениям, а не о “зеленой” трансформации. В кризисных условиях возможны и уже намечены послабления в государственном экологическом регулировании экономической деятельности, смягчение экологических требований, обременяющих бизнес и т.п. Такого рода меры, естественно, препятствуют “озеленению” индустрии.

Установить взаимосвязи между структурными изменениями в региональной промышленности и динамикой воздействий на природные компоненты не удалось, что связано с трудностями методического и информационного характера. Такие взаимосвязи могут быть выявлены только на более низком уровне пространственной иерархии — отдельных предприятий и их локальных сочетаний.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН АААА-А19-119022190170-1 (FMGE-2019-0008).

FUNDING

This research was fulfilled within the framework of the state-ordered research theme of the Institute of Geography RAS АААА-А19-119022190170-1 (FMGE-2019-0008).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Архипова Ю.А., Бардаль А.Б. Минерально-сырьевой потенциал дальневосточных регионов и транспортные ограничения его освоения // География и природные ресурсы. 2020. № 4. С. 170–179. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-4\(170-179\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-4(170-179))
- Битюкова В.Р. Экономико-географическая оценка экологических последствий трансформации отраслевой структуры хозяйства регионов и городов России в 2000–2020 гг. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2022. № 3. С. 416–434.
- Битюкова В.Р. Экологические проблемы в трудах экономико-географов // Социально-экономическая география в России. Владивосток: Дальнаука, 2016. С. 140–144.
- Битюкова В.Р. Эколого-экономическая оценка антропогенного воздействия / Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния. М.: ИП Филимонов М.В., 2014. С. 13–200.
- Вызовы и политика пространственного развития России в XXI веке / ред. В.М. Котляков, А.Н. Швецов, О.Б. Глезер. М.: КМК, 2020. 365 с.
- География, общество, окружающая среда. Т. V: География социально-экономического развития. М.: ИД “Городец”, 2004. 672 с.
- География Сибири в начале XXI века. Т. 4. Природопользование. Новосибирск: Гео, 2014. 355 с.
- Геосистемы Дальнего Востока России на рубеже XX–XXI вв. Т. 2. Природные ресурсы и региональное природопользование. Владивосток: Дальнаука, 2010. 560 с.
- Гладкевич Г.И., Разумовский В.М. Экономико-географические исследования в сфере природопользования и географии природных ресурсов // Социально-экономическая география в России. Владивосток: Дальнаука, 2016. С. 135–139.
- Данилов-Данильян В.И., Ключев Н.Н. Природно-ресурсная сфера России: тенденции развития и желательные стратегии // Вызовы и политика пространственного развития России в XXI в. М.: КМК, 2020. С. 111–147.
- Дружинин А.Г. Евразийские векторы морехозяйственной активности России: общественно-географические проекции // География и природные ресурсы. 2020. № 2. С. 5–14. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-2\(5-14\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-2(5-14))
- Ключев Н.Н. Актуальные изменения на промышленной карте России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. № 5.

- С. 660–673.
<https://doi.org/10.31857/S2587556620050088>
- Клюев Н.Н. Изменения региональных хозяйственных структур в пореформенной России (экологический аспект) // Изв. РАН. Сер. геогр. 2007. № 1. С. 13–23.
- Клюев Н.Н. Эколого-географические последствия реформирования России (1990-е годы) // Изв. РАН. Сер. геогр. 2000. № 4. С. 7–18.
- Корниенко С.Г. Оценка трансформаций природных ландшафтов Тазовского полуострова по данным космической съемки // География и природные ресурсы. 2011. № 1. С. 67–73.
- Лажнецов В.Н. Север России: вопросы пространственного и территориального развития. Сыктывкар: ИСЭиЭПС, 2015. 176 с.
- Литвиненко Т.В. Социально-экологические последствия трансформации использования природных ресурсов в восточной части России в постсоветский период // Изв. РАН. Сер. геогр. 2012. № 3. С. 40–53.
- Мирзеханова З.Г. Экологические аспекты формирования и развития территорий опережающего развития на Дальнем Востоке России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2021. № 2. С. 263–273.
<https://doi.org/10.31857/S2587556621020096>
- Приваловская Г.А., Волкова И.Н. Сочетания природных и социально-экономических ресурсов в развитии регионов России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2009. № 5. С. 7–21.
- Природопользование в территориальном развитии современной России / под ред. И.Н. Волковой и Н.Н. Клюева. М.: Медиа-Пресс, 2014. 360 с.
- Природопользование Дальнего Востока России и Северо-Восточной Азии: потенциал интеграции и устойчивого развития / под ред. А.С. Шейнгауза. Владивосток; Хабаровск: ДВО РАН, 2005. 528 с.
- Рациональное природопользование: международные программы, российский и зарубежный опыт. М.: КМК, 2010. 412 с.
- Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / под ред. Н.С. Касимова. М.: ИП Филимонов М.В., 2014. 560 с.
- Савельева И.Л. Восточная Сибирь – потенциал формирования ТПК полиресурсного природопользования // Россия и ее регионы: интеграционный потенциал, риски, пути перехода к устойчивому развитию. М.: КМК, 2012. С. 380–399.
- Bradshaw M., Connolly R. Russia's Natural Resources in the World Economy: history, review and reassessment // Euras. Geogr. and Economics. 2016. Vol. 57. P. 1–27.
<https://doi.org/10.1080/15387216.2016.1254055>
- Doroshenko S.V., Shelomentsev A.G., Sirotkina N.V., Khushainov B.D. Paradoxes of the “natural resource curse” regional development in the post-Soviet space // Экономика региона. 2014. № 4. P. 81–93.
<https://doi.org/10.17059/2014-4-6>

Ecological Assessment of Changes in Regional Industrial Structures in Russia at the Beginning of the 21st Century

N. N. Klyuev*

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**e-mail: klyuev@igras.ru*

Structural changes in the industry of the Russian regions for 2005–2019 are assessed from an ecological perspective. The decrease in the share of mining and the share of hazardous activities in industry was considered as an ecologically progressive change in the regional industrial structure (its greening), and the opposite change was assessed as de-ecologization. The absolute majority of the main mining regions of the country have increased the extraction of mineral resources, while in half of them it has increased by more than 1.5 times, and in a quarter—more than by half. The north-eastern vector of the development of the country's mining industry has been clearly identified, which determines the relative shift of large-scale impacts on nature to Eastern Siberia, the Far East, the European North—to ecologically significant and easily vulnerable landscapes of the cryolithozone, as well as to shelf areas. The number of regions where the share of the extractive industry in industrial output exceeds 50% has increased from 9 to 14. In 2/5 of Russian regions, the share of environmentally hazardous industries in the manufacturing sector has noticeably increased. In regions where nature-intensive production is significantly reduced (the Khanty-Mansi Autonomous Okrug, Republic of Tatarstan), industries of primary processing of raw materials appear, which are also not environmentally friendly. Only in Belgorod, Kaliningrad, and Murmansk oblasts industrial structures in general and their processing sectors have become more environmentally friendly. Interregional differences in the level of environmental friendliness of industrial structures have intensified. Difficulties of a methodological and informational nature did not make it possible to establish the relationship between structural changes in the regional industry and the dynamics of impacts on natural components.

Keywords: environmental consequences, industry, industry structure, anthropogenic impacts, regions of Russia, post-Soviet dynamics

REFERENCES

- Arkhipova Yu.A., Bardal A.B. The Minerals Potential of Far Eastern Region and Transport Limitations of Their Development. *Geogr. Prirod. Resur.*, 2020, vol. 41, pp. 406–414.
<https://doi.org/10.1134/S1875372841040125>
- Bitukova V.R. Ecological and economic assessment of anthropogenic impact. In *Regiony i goroda Rossii: integral'naya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya* [Regions and Cities of Russia: An Integral Assessment of the Ecological State]. Moscow: IP Filimonov M.V. Publ., 2014, pp. 13–200. (In Russ.).
- Bitukova V.R. Ecological problems in the works of economic geographers. In *Sotsial'no-ekonomicheskaya geografiya v Rossii* [Socioeconomic Geography in Russia]. Vladivostok: Dalnauka Publ., 2016, pp. 140–144. (In Russ.).
- Bitukova V.R. Ecological consequences of the transformation of the sectoral structure of the economy of Russian regions and cities in the post-Soviet period. *Reg. Res. Russ.*, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 96–111.
- Bradshaw M., Connolly R. Russia's Natural Resources in the World Economy: history, review and reassessment. *Eurasian Geogr. Economics*, 2016, vol. 57, pp. 1–27.
<https://doi.org/10.1080/15387216.2016.1254055>
- Danilov-Danilyan V.I., Klyuev N.N. Natural resource sphere of Russia: development trends and desirable strategies. In *Vyzovy i politika prostranstvennogo razvitiya Rossii v XXI veke* [Challenges and Policy of Russia's Spatial Development in the 21st Century]. Moscow: KMK Publ., 2020, pp. 111–147. (In Russ.).
- Doroshenko S.V., Shelomentsev A.G., Sirotkina N.V., and Khusainov B.D. Paradoxes of the “natural resource curse” regional development in the post-Soviet space. *Reg. Economy*, 2014, no. 4, pp. 81–93.
<https://doi.org/10.17059/2014-4-6>
- Druzhinin A.G. Eurasian vectors of maritime economic activity of Russia: socio-geographical projections. *Geogr. Nat. Resour.*, 2020, no. 2, pp. 5–14. (In Russ.).
[https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-2\(5-14\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-2(5-14))
- Geografiya, obshchestvo, okruzhayushchaya sreda. T. 5: Geografiya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya* [Geography, Society, Environment. Volume V: Geography of Socioeconomic Development]. Moscow: Gorodets Publ., 2004. 672 p.
- Geografiya Sibiri v nachale XXI veka. T.4. Prirodopol'zovanie* [Geography of Siberia at the Beginning of the 21 Century. T.4. Nature Management]. Novosibirsk: Geo Publ., 2014. 355 p.
- Geosistemy Dal'nego Vostoka Rossii na rubezhe 20–21 vekov. T. 2. Prirodnye resursy i regional'noe prirodopol'zovanie* [Geosystems of the Russian Far East at the Turn of the 20–21 Centuries. T. 2. Natural Resources and Regional Nature Management]. Vladivostok: Dalnauka Publ., 2010. 560 p.
- Gladkevich G.I., Razumovsky V.M. Economic and geographical research in the field of nature management and geography of natural resources. In *Sotsial'no-ekonomicheskaya geografiya v Rossii* [Socioeconomic Geography in Russia]. Vladivostok: Dalnauka Publ., 2016, pp. 135–139. (In Russ.).
- Klyuev N.N. Ecological and geographical consequences of the reform of Russia (1990s). *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2000, no. 4, pp. 7–18. (In Russ.).
- Klyuev N.N. Changes in regional economic structures in post-reform Russia (ecological aspect). *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2007, no. 1, pp. 13–23. (In Russ.).
- Klyuev N.N. Current changes on the industrial map of Russia. *Reg. Res. Russ.*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 494–505.
<https://doi.org/10.1134/S2079970520040140>
- Kornienko S.G. Assessing the transformations of natural landscapes of the Taz Peninsula using space-borne imagery. *Geogr. Nat. Resour.*, 2011, vol. 32, pp. 48–53.
- Lazhentsev V.N. *Sever Rossii: voprosy prostranstvennogo i territorial'nogo razvitiya* [North of Russia: Issues of Spatial and Territorial Development]. Syktyvkar: ISEiEPS Publ., 2015. 176 p.
- Litvinenko T.V. Socioecological consequences of the transformation of natural resource utilization in Russia's eastern part in the post-Soviet period. *Reg. Res. Russ.*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 273–284.
- Mirzekhanova Z.G. Environmental aspects of the formation and development of priority development areas in the Far East of Russia. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2021, no. 2, pp. 263–273. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2587556621020096>
- Prirodopol'zovanie v territorial'nom razvitii sovremennoi Rossii* [Nature Management in the Territorial Development of Modern Russia]. Volkova I.N., Klyuev N.N., Eds. Moscow: Media Press Publ., 2014. 360 p.
- Prirodopol'zovanie Dal'nego Vostoka Rossii i Severo-Vostochnoi Azii: potentsial integratsii i ustoichivogo razvitiya* [Nature Management of the Far East of Russia and North-east Asia: The Potential for Integration and Sustainable Development]. Sheingauz A.S., Ed. Vladivostok: Khabarovsk: FEB RAS Publ., 2005. 528 p.
- Privalovskaya G.A., Volkova I.N. Combinations of natural and socioeconomic resources in the development of Russian regions. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2009, no. 5, pp. 7–21. (In Russ.).
- Ratsional'noe prirodopol'zovanie: mezhdunarodnye programmy, rossiiskii i zarubezhnyi opyt* [Rational Nature Management: International Programs, Russian and Foreign Experience]. Moscow: KMK Publ., 2010. 412 p.
- Regiony i goroda Rossii: integral'naya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya* [Regions and Cities of Russia: An Integral Assessment of the Ecological State]. Kasimov N.S., Ed. Moscow: IP Filimonov M.V. Publ., 2014. 560 p.
- Savelyeva I.L. Eastern Siberia – the potential for the formation of a multi-resource environmental management system. In *Rossiya i ee regiony: integratsionnyi potentsial, riski, puti perekhoda k ustoichivomu razvitiyu* [Russia and Its Regions: Integration Potential, Risks, Ways of Transition to Sustainable Development]. Moscow: KMK Publ., 2012, pp. 380–399. (In Russ.).
- Vyzovy i politika prostranstvennogo razvitiya Rossii v XXI veke* [Challenges and Policy of Russia's Spatial Development in the 21st Century]. Kotlyakov V.M., Shvetsov A.N., Glezer O.B., Eds. Moscow: KMK Publ., 2020. 365 p.

УДК 551.16:502.51

ДИФфузное ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ РАВНИННЫХ ТЕРРИТОРИЙ: ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ

© 2023 г. С. В. Ясинский^а, *, Е. А. Кашутина^а, **, М. В. Сидорова^а, ***

^аИнститут географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: yasinski@igras.ru

**e-mail: kashutina@igras.ru

***e-mail: sidorova@igras.ru

Поступила в редакцию 16.06.2022 г.

После доработки 29.08.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

Представлен обзор современных представлений о сущности и специфике диффузного (рассеянного) загрязнения водных объектов. Формирование, перемещение и трансформация водных потоков, образующихся на водосборах в периоды снеготаяния и выпадения интенсивных дождевых осадков, насыщенных растворенными и взвешенными веществами, — сложный многомерный процесс, распределенный по территории водосбора. Основными факторами формирования диффузного загрязнения водных объектов является взаимодействие комплекса гидрологических и геохимических процессов, зависящих от климатических особенностей территории и структуры использования земель на водосборах. Развитие химической промышленности и биотехнологий привело к поступлению в природную среду новых, чужеродных для биоты загрязнителей, требующих новых способов контроля и очистки источников диффузного и точечного загрязнения. В городах проблема диффузного загрязнения водных объектов широким спектром загрязняющих веществ стоит наиболее остро. Отмечено, что диффузное загрязнение водных объектов не регистрируется и не регулируется государственными водохозяйственными или природоохранными ведомствами. Это связано с неопределенностью “потребителя” диффузного стока, сложностью его мониторинга, непониманием его ключевой роли в загрязнении водных объектов из-за недостаточной изученности проблемы. Необходимо современная научно обоснованная сеть мониторинга диффузного стока. Выполнен обзор моделей, разработанных как в России, так и за рубежом, используемых для расчета выноса загрязняющих веществ в водные объекты с использованием ГИС-технологий и развитых баз данных. Отмечена несбалансированность степени разработки блоков, описывающих перенос воды, наносов и химических веществ. Приведены примеры работ Института географии РАН по программе “Оздоровление Волги” в области моделирования диффузного загрязнения в бассейне Чебоксарского водохранилища.

Ключевые слова: диффузное загрязнение, малые реки, городская водная среда, моделирование, миграционные формы загрязняющих веществ, перенос загрязнений с микрочастицами, ксенобиотики

DOI: 10.31857/S258755662301017X, **EDN:** LVDCSQ

Одной из наименее изученных проблем в гидрологии, водном хозяйстве и в целом — науках о Земле является описание и формализация процессов формирования диффузного (рассеянного и никем не контролируемого) загрязнения водных объектов (Диффузное ..., 2020; Фашевская и др., 2020б; Ясинский и др., 2019). Именно с ним связывают отсутствие кардинального улучшения состояния водных объектов после значительного сокращения поступления загрязняющих веществ (ЗВ) со сточными водами предприятий (фиксируемое государственной водохозяйственной статистикой так называемое точечное загрязнение) в результате спада промышленного производства в 1990-х годах в России. В мире в зависимости от

степени очистки сбросов от точечных источников, с диффузным загрязнением связано до 60 и более процентов поступления ЗВ в водные объекты (Диффузное ..., 2020). В России первое научное обобщение российских работ по проблемам диффузного загрязнения — выявление его роли, определение источников, разработка концепции по его предотвращению — были выполнены в 2018–2019 гг. в рамках государственной программы “Оздоровление Волги” ведущими научными организациями страны под руководством Института водных проблем РАН (Диффузное ..., 2020).

Что такое диффузное загрязнение и как оно формируется? Круговорот веществ в природе —

неотъемлемый атрибут существования жизни на Земле. Антропогенное воздействие приводит к нарушению процессов переноса вещества на глобальном, региональном или локальном уровнях в зависимости от мощности, типа и времени существования источников загрязнения. Загрязнение может быть не только привнесенным человеком извне (например, внос удобрений на поля, отходы производств, свалки), но и внутренним, связанным с нарушением ранее “законсервированных”, природных источников (например, в процессе добычи полезных ископаемых). Кроме традиционных, характерных для природы загрязнителей (например, биогенов — соединений фосфора, азота, калия) в результате бурного развития химической промышленности и биотехнологий появились загрязняющие вещества, не характерные и чужеродные для природы, не участвующие в естественном биотическом круговороте (ксенобиотики). К ним относятся, пластики и микропластики, большинство лекарств, пестициды, нефтепродукты. Для ряда этих соединений непонятны пути их перемещения и фазы их состояния в водных объектах (в растворенном виде, в частицах или с частицами наносов разной крупности), способность реагировать с другими веществами во внешней среде, их биодоступность. Для многих веществ не разработаны допустимые нормативы присутствия в водных объектах, нет экономически доступных технологий очистки от них питьевой и сточных вод.

На Русской равнине, да и в других регионах России практически не осталось территорий, не преобразованных той или иной хозяйственной деятельностью. А перенос ЗВ от антропогенных источников по воздуху и сухое и влажное (с осадками) их осаждение из атмосферы затрагивает практически всю поверхность Земли. В периоды весеннего снеготаяния и выпадения обильных осадков в теплый период года на водосборах рек, озер, водохранилищ формируются потоки воды, насыщенные растворенными и взвешенными ЗВ, которые через гидрографическую сеть поступают в водные объекты и в значительной степени обуславливают качество воды в них и их экологическое состояние.

Мониторинг диффузного загрязнения. В отличие от водных ресурсов, аккумулированных в водных объектах, потоки воды и других веществ в разных формах, образующиеся на водосборах, не регистрируются и не регулируются ни одним государственным водохозяйственным или природоохранным ведомством. Недостаточное внимание к этому виду водных ресурсов со стороны государственных органов управления обусловлено в первую очередь неопределенностью “потребителя” этих водных ресурсов, их рассредоточенностью и дискретностью в пространстве и во времени, что определяет трудности организации мони-

торинга. Формирование и перемещение водных потоков, образующихся на водосборах в периоды снеготаяния и выпадения интенсивных дождевых осадков, насыщенных растворенными и взвешенными веществами, — процесс, распределенный по территории водосбора. Он охватывает неоднородную по вертикали толщу почвогрунтов (Долгов, Коронкевич, 2010), от поверхности склонов до подземных вод, в зависимости от глубины дренирования водным объектом. Число действующих горизонтов в формировании стока веществ с водосбора определяется геологическим и геоморфологическим строением территории, особенностями ее почвенно-растительного покрова, метеоусловиями сезона, а также антропогенными трансформациями территории, приводящими к изменениям естественных путей стока воды и вещества с водосбора. К последнему фактору относятся: распашка и мелиорация земель, в том числе лесомелиорация; орошение; создание непроницаемых поверхностей: дорог, крыш, промышленных площадок; создание ливневой канализации, ускоряющей сток с водосбора; прокладка туннелей; добыча полезных ископаемых шахтным и карьерным методами и пр. На каждом из уровней процесс формирования стока неоднороден в пространстве и во времени.

Наблюдения за отдельными стадиями процесса формирования и трансформации стока воды и других веществ в различных природных и антропогенных условиях были важной задачей сети воднобалансовых станций и специализированных стационаров, входящих в структуры Гидрометслужбы СССР, министерства мелиорации и водного хозяйства, сельского хозяйства, лесной промышленности, но, к сожалению, разрушенной за последние десятилетия. Многие частные процессы, в основном связанные с переносом воды, были изучены достаточно подробно. Сейчас возникла настоятельная необходимость восстановления сети мониторинга гидролого-геохимических процессов на современном уровне, с использованием в том числе автоматизированного оборудования, способного регистрировать параметры среды с высокой степенью дискретности. В России серьезный опыт подобных комплексных работ был реализован на Дальнем Востоке (Гарцман, Шапов, 2015).

В самых общих чертах **процесс формирования диффузного загрязнения на водосборах** включает в себя следующие этапы: 1. Формирование поверхностного склонового, внутрипочвенного и подземного стока. 2. Эрозия почвы как следствие размыва верхних ее слоев талым и/или дождевым склоновым стоком. 3. Насыщение потоков воды ЗВ, содержащимися в снежном покрове, осадках, растительном покрове, в почве и грунтах, и их адсорбции на частицах смытых наносов. 4. Трансформация потоков веществ водосбором за счет

физических, химических и биологических процессов.

Факторы формирования диффузного загрязнения. Гидролого-геохимические процессы на водосборах зависят от многих факторов. Наиболее важными из них являются метеорологические условия, такие как высота снежного покрова и запасы воды в нем на начало снеготаяния, интенсивность снеготаяния и выпадения жидких осадков. Значения этих параметров не остаются постоянными. В результате глобальных и региональных изменений климата во многих регионах России в последние десятилетия произошли существенные изменения структуры гидрологического цикла водосборов (Джамалов и др., 2015; Фролов, Георгиевский, 2018). В зимний период в результате повышения температуры воздуха в ряде регионов уменьшились величина запасов воды в снеге и глубина промерзания почвы, соответственно увеличилась водопроницаемость мерзлой почвы и объем впитавшейся за период снеготаяния воды. В период весеннего снеготаяния значительно уменьшилась величина поверхностного весеннего склонового стока, а следовательно, выноса ЗВ талым стоком и со смывой почвой, а также весеннего половодья на реках. Вместе с тем резко увеличился подземный сток и вынос с ним растворенных веществ (Долгов и др., 2021). Поэтому не учитывать влияние климатических изменений на формирование гидролого-геохимических процессов на водосборах крупных водных объектов уже нельзя.

Другим, не менее важным фактором, обуславливающим динамику и интенсивность этих процессов, является структура землепользования, сложившаяся на водосборах — площадь и расположение на водосборах угодий с разными видами подстилающей поверхности, являющихся источниками поступления ЗВ из верхних слоев почвы; за счет вноса удобрений, разведения скота, попадания на водосбор отходов человеческой жизнедеятельности, промышленного производства и др. Пространственная ландшафтная структура водосборов, т.е. соотношение разных видов подстилающей поверхности (лесов, полей, застройки, дорог и др.) не остается постоянной во времени. Меняется использование территории. В северных регионах России забрасываются и зарастают лесом населенные пункты и сельскохозяйственные поля. В благоприятных для земледелия регионах, например, в Курской области — противоположный процесс — распаивается все, вплоть до обочин дорог (собственные наблюдения авторов). Модифицируются агротехнологии, меняются виды и сорта выращиваемых культур. Появляются новые населенные пункты, промышленные, сельскохозяйственные, рекреационные и другие объекты. Во многих случаях, особенно в наиболее перспективных для сельского хозяйства районах,

а также в зонах санитарной охраны водных объектов это происходит за счет снижения площади лесов. Практически повсеместно на юге страны отмечена деградация защитных лесополос. Все это снижает степень устойчивости ландшафтов к росту антропогенных нагрузок и может приводить к увеличению объема потоков ЗВ в водные объекты, способствуя ухудшению качества воды в них. Опасность представляют поступление с водосбора соединений азота и фосфора — биогенных элементов (БЭ), в наибольшей степени ответственных за эвтрофирование водных объектов, особенно с замедленным водообменом, таких как водохранилища (Yasinsky et al., 2020). В то же время не весь объем ЗВ, формирующийся на водосборе диффузным путем, достигает русел и замыкающих створов рек поступает в водохранилища (Голосов, 2003; Литвин, 1998; Behrendt and Opiz, 1999). Значительная его часть регулируется и удерживается самим водосбором и различными звеньями гидрографической сети (оврагами, балками, поймами и др.). Однако разработанные методы оценки величины притока ЗВ в водный объект недостаточно учитывают это явление (Кондратьев, Шмакова, 2019). Изменение сложившейся структуры землепользования может привести как к усилению, так и сокращению потоков ЗВ, поступающих с водосбора. Это повлечет за собой изменение качества воды и трансформацию водных масс водоемов-приемников в зависимости от сезонов года и морфометрических характеристик принимающих сток водных объектов. Поэтому важна оценка процессов переноса ЗВ при различных сценариях землепользования. Это позволит выбрать оптимальные варианты социально-экономического развития территорий водосборов с учетом возрастающих требований к состоянию окружающей среды, в том числе и водных ресурсов.

Особенности диффузного загрязнения в городах.

Наиболее остро проблема оценки объема и состава ЗВ при диффузном загрязнении водных объектов стоит для урбанизированных территорий России. Это вызвано отсутствием геоэкологического мониторинга даже в крупных городах страны.

Проблема оценки влияния урбанизированных территорий на гидрологический и гидрохимический режимы водных объектов возникла сначала за рубежом в 1970-е годы, а выполненные к тому времени работы были впервые обобщены в (Куприянов, 1977). Для ряда городов (Москвы, Курска, Твери и других) был выполнен большой объем экспериментальных исследований, посвященных оценкам водного баланса, его структуры и вещественного обмена для различных типов подстилающей поверхности, образующих территорию городов (Гордин, Кирпичникова, 1993; Китаев, 1993, 1995; Коронкевич, Мельник, 2015; Львович, Чернышев, 1983; Черногаева, 1976). За

рубежом исследования в области гидрологии урбанизированных территорий были направлены в целом на разработку математических моделей процессов, формирующихся и протекающих на городских территориях (Михайлов, 2000).

Последствия современной урбанизации оказывают существенное влияние на изменение структуры гидрологического и геохимических циклов водосборов водных объектов. Именно для территорий городов характерен самый значительный антропогенный прессинг на все компоненты окружающей среды, определяющий как степень трансформации их физических свойств, так и объемы и расширенную, по сравнению с неурбанизированными территориями, номенклатуру ЗВ (Дрюпина и др., 2014; Зиновьев и др., 2019; Михайлов, 2000). Рост площади городов и расположенных вокруг них дачных и коттеджных поселков приводит к увеличению площади водонепроницаемых участков (дорог, крыш). Растет доля слабоводопроницаемых участков — например, почвы скверов и городских газонов значительно отличаются по водопроницаемости и уровню загрязнения от неурбанизированных территорий. В целом в городах существенно снижаются инфильтрационные свойства почвы, что, как следствие, приводит к увеличению слоя поверхностного склонового стока и выносу значительного количества различных ЗВ в водные объекты как в период весеннего половодья, так и во время выпадения сильных дождей в теплый период года.

Несмотря на то, что в каждом крупном городе организована ливневая канализация, талые и дождевые воды, сформированные на территории городов, насыщенные взвесью растворенных и взвешенных химических веществ, без очистки поступают в водные объекты. Ситуация осложняется состоянием ливневой канализации. Далеко не всегда городские службы способны на ее прочистку, необходимый ремонт и замену, что приводит к утечкам в подземные воды, подтоплениям и загрязнению ливневого стока. Удачные исключения редки. Например, в Москве убранный снег на пунктах снеготаяния смешивается с теплыми сточными водами ЖКХ и в дальнейшем поступает на городские очистные сооружения. В других крупных городах, расположенных в бассейне Волги, сток из ливневой канализации напрямую, практически без очистки, поступает в малые реки городов и со стоком этих рек в водохранилища Волжско-Камского каскада. Ни объемы этого стока, ни массы выноса ЗВ в разные по водности годы, ни их влияние на качество воды рек и водохранилищ, принимающих сток от городских источников загрязнения — неизвестны в связи с практически полным отсутствием гидрологических постов и данных о показателях химического состава воды городских водных объектов. Неизвестна также *роль* в загрязнении водных объ-

ектов *микрочастиц*, в том числе микропластика, обладающих высокой способностью к адсорбции и *переносу ЗВ* из-за большой удельной площади поверхности.

Между тем проектирование очистных сооружений и планирование водо- и природоохранных мероприятий на территории города напрямую зависит от точных оценок вида и общего объема выноса, в том числе микрочастицами, ЗВ с поверхностным склоновым стоком в периоды оттепелей в зимний период, весеннего снеготаяния и в результате выпадения дождевых осадков в теплый период года (Рекомендации ..., 2014). Кроме того, такая информация необходима для оценки вклада точечных и диффузных источников в формирование качества воды водохранилищ — источников водоснабжения населения и различных отраслей хозяйства. Интересные результаты были получены с участием авторов в 2020–2021 гг. в рамках программы РФФИ “Микромир” на территории Нижнего Новгорода. Впервые для малых рек и подземных вод крупного города получены оценки вклада микрочастиц в перенос веществ с территории города. В период летне-осенней межени 2020 г. не менее половины суммарного переноса приоритетных для Нижнего Новгорода ЗВ (нефтепродуктов, синтетических поверхностно-активных веществ, железа, марганца) осуществляется взвесями. В устьях городских рек примерно четверть интегрального потока связана с переносом микрочастицами размера 0.22–2 мкм (для железа — около трети). Вниз по течению к устьям рек уменьшается доля переноса ЗВ частицами более 2 мкм и увеличивается доля переноса частицами в диапазоне 0.22–2 мкм. Получены *предварительные выводы о значительной загрязненности всех городских водных сред, включая подземные воды, частицами микропластика*. Загрязнение подземных вод авторы связывают с возможными утечками из ливневой канализации и канализации ЖКХ сточных вод от стиральных машин, с автомоек, с дорог (Ясинский и др., 2021).

Отсутствие современного гидролого-геохимического мониторинга в городах не позволяет научно-обоснованно управлять городским хозяйством, в том числе в наиболее сложный зимне-весенний период года, реализовывать природоохранную политику для улучшения качества окружающей среды и жизни населения в городах. Такой мониторинг должен включать контроль метеорологического режима в разных частях крупного города, гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режимов малых рек, озер и других водных объектов в черте города, периодический анализ проб почвы и растительности для определения степени накопления в них вредных веществ, осуществлять постоянные наблюдения за снежным покровом и его химическим составом — как источником пополнения водой и загрязнения вод-

ных объектов городов и водоемов, куда стекают воды, формирующиеся на территории урбанизированных территорий в весенний период. Важным этапом такого мониторинга является организация сбора, хранения, обработки, анализа и обобщения полученных данных, наиболее перспективным методом которого является создание региональных ГИС.

Разработка расчетных методик, моделирование процессов диффузного стока

К настоящему времени разработано большое число динамических и динамико-стохастических моделей, достаточно полно и с высокой точностью описывающих процессы формирования гидрологических процессов, в том числе и различных видов стока на водосборах (Гусев, Насонова, 2010; Кондратьев, Шмакова, 2019; Мотовилов, Гельфан, 2018; Ясинский, Гусев, 2003 и др.). Что касается эрозии почвы, то наиболее известное универсальное уравнение эрозии почвы (USLE) и его модификации применимы только для оценки средней многолетней величины дождевой эрозии (Чалов, 2021). Дождевой склоновый сток в летний период возникает достаточно редко, в основном на площади гидрографической сети, хотя, конечно, при выпадении сильных осадков, склоновая эрозия особенно в южных районах страны, может быть весьма значительной. Современные модели водной эрозии почвы представляют собой дальнейшее развитие гидромеханического подхода к этому процессу. Модель дождевой эрозии и за период снеготаяния описывает эрозию почвы как случайный процесс за многолетний период. Рассчитывается сток воды, отрыв и перенос потоком воды почвенных частиц для однородного склона с произвольным профилем, т.е. с постоянными (одинаковыми) почвенными параметрами вдоль склона, растительным покровом и противоэрозионными приемами (Сухановский, 2009). Однако эти модели, позволяющие оценивать эрозию почвы за многолетний период, достаточно сложные и также требуют наличия специфической информации об объекте исследования. Поэтому вопрос их применимости в задачах оценки эрозии почвы при расчетах характеристик выноса ЗВ с водосбора требует дополнительных специальных исследований и разработки модели этого процесса, адекватно отражающей его сущность. В этой связи в настоящее время предпочтение отдается хорошо известным эмпирическим зависимостям $\Theta = f(Y)$, где Θ — слой смытой почвы (мм); Y — слой стока (мм) (Бобровицкая, 1977; Ясинский и др., 2007).

Что касается оценки концентрации биогенных элементов в склоновом стоке и в смытой водными потоками почве, то одна из первых таких методик их расчета для сельскохозяйственных по-

лей была разработана еще в середине 80-х годов прошлого века в СССР (Чуян и др., 1985). Практическое применение этой методики было сделано при использовании физико-математической модели, позволяющей рассчитывать вынос биогенных элементов (N, P и K, кг) с поверхностным жидким стоком и стоком наносов с водосбора р. Велесы (бассейн Западной Двины) в зависимости от уклона склонов и других геоморфологических характеристик (Назаров, 1993; Назаров, Леонов, 1999).

В последние годы во всем мире выполнено много исследований, посвященных разработке моделей и аппаратных программных систем для расчета выноса ЗВ с водосбора, при решении разнообразных задач, детальные обзоры которых приведены в (Михайлов, 2000; Кондратьев, Шмакова, 2019; Li, 2014). Одной из последних моделей выноса биогенных элементов, разработанных за рубежом, является модель SWAT, предназначенная для Службы сельскохозяйственных исследований США и используемая в 13 европейских странах (Arheimer and Olson, 2003). Это физико-математическая модель с полу-распределенными параметрами, предназначенная для оценки выноса биогенных элементов со всего водосбора. Для расчета стока биогенных элементов в SWAT используются эмпирические зависимости между расходом воды, стоком наносов и концентрациями химических элементов. В наиболее полной динамико-стохастической модели Института озероведения РАН (IL_LM) для оценки значений концентрации биогенных элементов (общего азота и общего фосфора) используются результаты натурных исследований по содержанию растворенных примесей в почвенной воде или первичной ручейковой сети (Кондратьев, Шмакова, 2019). Для оценки выноса биогенных элементов, адсорбированных на частицах смытых наносов, используется изотерма Фрейндлиха и ее модификации (Фашевская и др., 2020a).

Вынос ЗВ с *городской территории* во многом обусловлен процессом их накопления между выпадением стокоформирующих ливневых осадков. Чем больше времени прошло с момента выпадения последних осадков, тем больше пыли, мусора и связанных с ними ЗВ аккумулируется на улицах, тротуарах и крышах домов. Для описания названных процессов предложен *модельный подход*, получивший название *“накопление/смыв”* (*“Build-up/Washoff”*), согласно которому на урбанизированной (селитебной) территории накопление ЗВ происходит пропорционально времени, отделяющему момент расчета от последнего стокового события (Chen and Adams, 2006; Gander, 2007; Shaw et al., 2010; Wang et al., 2011). “Накопление” в моделях такого типа является интегрированной характеристикой и подразумевает все разнообразие процессов, происходящих на территории во

время сухой погоды, включая уборку улиц. Из-за невозможности физического обоснования модели накопления она, как правило, имеет эмпирическую основу. Возможности блока модели “смыв” гораздо шире. Здесь может использоваться практически весь арсенал гидрологических моделей — от эмпирических до физико-математических. Концепция “накопление/смыв” нашла свое воплощение в известной оригинальной версии компьютерной модели SWMM (Gironás et al., 2009; реализация в России — (Болгов и др., 2003, 2020)).

Модели типа “накопление/смыв” стали использоваться при решении задач моделирования качества воды урбанизированных территорий с конца семидесятых годов прошлого века. Со временем акценты развития рассматриваемого научного направления и совершенствования соответствующего математического аппарата сместились в сторону создания масштабных модельных ГИС-ориентированных комплексов для решения инженерных задач водоотведения с городских территории. Крупнейшей европейской разработкой в указанном направлении является модель MIKE URBAN, входящая в семейство моделей MIKE¹. Основное предназначение MIKE URBAN — гидравлический расчет сетей водоснабжения и водоотведения. В США эти функции выполняют модели StormCAD, FlowMaster и HAMMER, входящие в комплекс моделирования и эксплуатации наружных сетей водоснабжения и канализации Bentley Systems². Есть опыт внедрения в отечественную практику перечисленных зарубежных инженерных моделей водоотведения с территории крупных городов (Борисов, 2009). Однако в целом применение математических моделей для этих целей в России ограничено единичными примерами, несмотря на то что моделирование качества воды урбанизированных водосборов развивается уже более 50 лет (American ..., 1969; Avellaneda et al., 2009; Sutherland and McCuen, 1978; Terstriep et al., 1990).

Концептуальные трудности моделирования диффузного загрязнения

К сожалению, в советских и российских исследованиях практически не было комплексных экспериментальных работ, посвященных разным аспектам формирования диффузного загрязнения. Речным и в меньшей степени поверхностным склоновым стоком занимались гидрологи, процессами эрозии — геоморфологи и эрозиоведы, химическим стоком — геохимики разных направ-

лений. Этим объясняется несбалансированность временного и пространственного масштабов, а также степени разработки математического аппарата для описания разных блоков формирования диффузного загрязнения: формирования стока воды, формирования стока наносов и формирования стока химических веществ. Гидродинамические модели стока соседствуют с эмпирическими зависимостями, описывающими процессы эрозии и химического стока. В блоках расчета химического состава жидкого стока и стока наносов в связи со сложностью описания и формализации процессов их формирования используются либо эмпирические зависимости между концентрациями ЗВ, расходом воды и объемами наносов, либо вообще данные натурных измерений, не обладающие универсальным характером. В расчетных гидрохимических методиках далеко не всегда учитываются формы существования вещества в водной среде (вид химического соединения, степень биодоступности загрязняющего вещества и соответственно его токсичности). Очень часто не оцениваются возможности сорбции/десорбции ЗВ, его переходы из донных отложений и взвешенных и донных наносов в растворенные формы и наоборот, трансформация состава ЗВ в результате химических реакций, воздействия биоты и пр. В большинстве моделей вообще не учитывается, что самим водосбором и его гидрографической сетью поглощаются значительные объемы ЗВ.

Сложность процессов формирования и трансформации стока воды и связанных с ним веществ в различных геосистемах (лесах, сельскохозяйственных полях с разным видом подстилающей поверхности, селитебных территориях и др.) и на водосборах и отсутствие мониторинга привели к тому, что до настоящего времени в России нет официально утвержденных методов расчета диффузного стока ЗВ. Именно поэтому для оценки объемов воды и разнообразных ЗВ, поступающих с водосборов в водные объекты, используются расчетные методы, разработанные на основе специально поставленных полевых экспериментов (Кондратьев, 2007; Кондратьев, Шмакова, 2019; Михайлов, 2000; Хрисанов, Осипов, 1993; Ясинский и др., 2020).

В новой версии *полуэмпирической ландшафтно-гидрологической модели Института географии РАН (ЛГМ ИГРАН)* для каждого типа подстилающей поверхности на водосборе, включая овражно-балочную сеть, осуществляется расчет весеннего склонового стока по связям с речным стоком весеннего половодья, подповерхностного стока (“верховодки”), подземного стока, а также расчет эрозии почвы по связям с величиной склонового стока и выноса с этим стоком биогенных элементов — путем задания их концентраций, полученных по экспериментальным и литературным данным (Yasinsky et al., 2020). Концентрация этих

¹ <https://www.mikepoweredbydhi.com/products> (дата обращения 04.03.2022).

² <https://www.bentley.com/ru/solutions/stormwater-modeling-and-analysis> (дата обращения 04.03.2022).

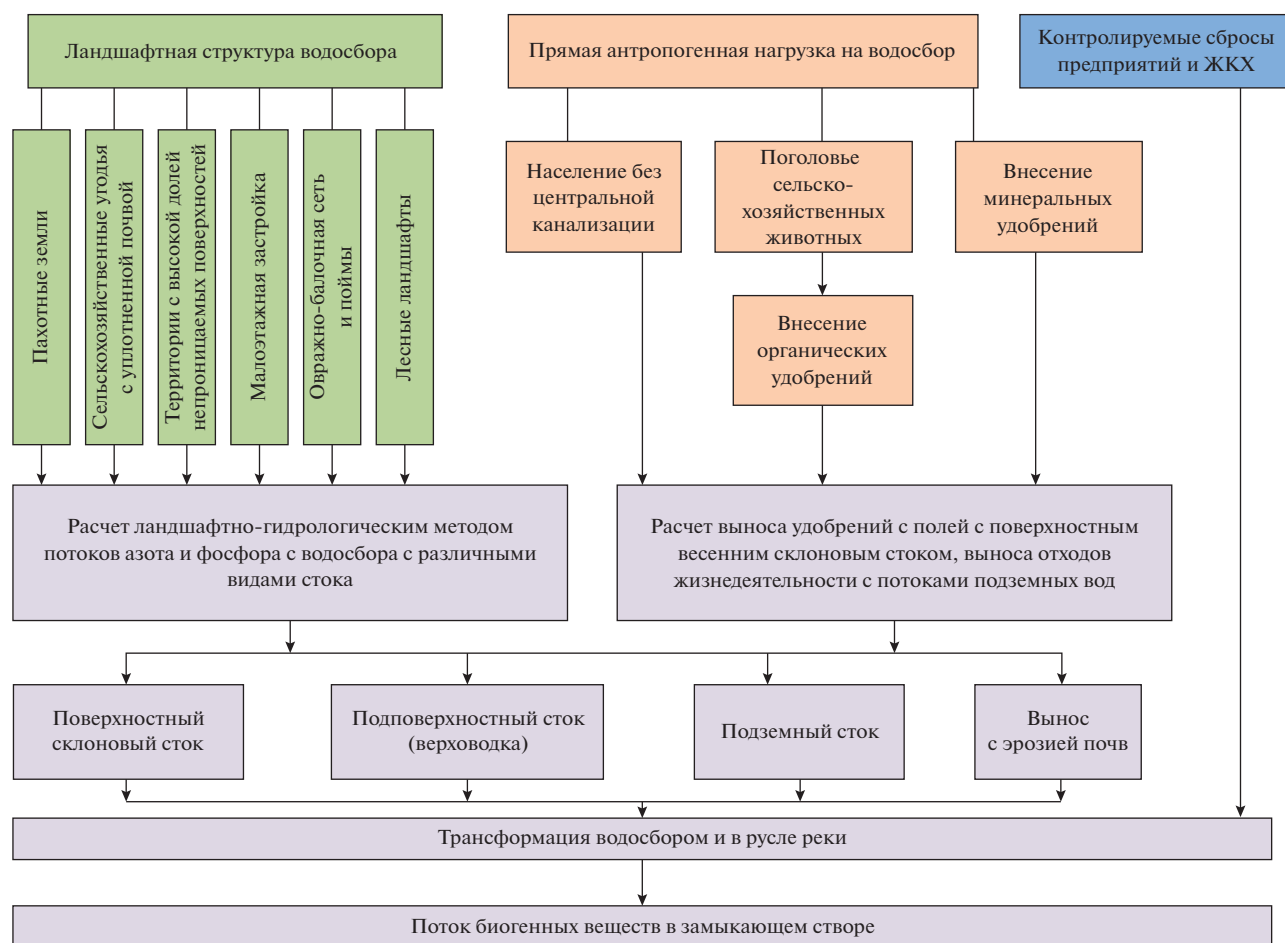


Рис. 1. Блок-схема расчета стока биогенных элементов с водосбора в ландшафтно-гидрологической модели Института географии РАН.

элементов в смытой талыми водами почве задается либо по данным агрохимических анализов верхних слоев почвы, либо по данным Единого Государственного реестра почвенных ресурсов России³. Предполагается, что в остальные периоды годы вынос этих веществ осуществляется только подземным стоком, величина которого рассчитывается путем расчленения гидрографов речного стока, а концентрация этих веществ задается по данным химического анализа проб, отобранных в зимний период, с их корректировкой по литературным источникам. В модели учитываются данные водохозяйственной статистики (форма отчетности 2-ТП (водхоз)) о сбросах сточных вод предприятий. Учитывается прямое антропогенное воздействие на водосбор — поступление биогенных веществ, связанных с деятельностью человека. В текущей версии ЛГМ это внесение на сельскохозяйственные поля минеральных и органических удобрений, а также по-

падение неочищенных отходов жизнедеятельности населения в водную среду (рис. 1).

Новая версия ЛГМ использовалась в работах Института географии РАН по программе “Оздоровление Волги” в том числе для оценки:

- суммарных потоков биогенных элементов, поступающих в Чебоксарское водохранилище, с его местного водосбора (площадь 130000 км²) и с водосборов его притоков разных порядков,
- роли диффузных и точечных контролируемых источников в формировании потоков ЗВ с водосбора Чебоксарского водохранилища,
- вклада природных и антропогенных факторов (ландшафтной структуры и прямого антропогенного воздействия) в формирование потоков ЗВ с водосбора Чебоксарского водохранилища,
- роли поверхностного склонового и подземного стока, эрозии на водосборе и стока наносов в формировании переноса ЗВ с водосбора Чебоксарского водохранилища.

Исходная информация и результаты расчетов на модели легли в основу разработанной регио-

³ <http://egrpr.esoil.ru/> (дата обращения 04.03.2022).

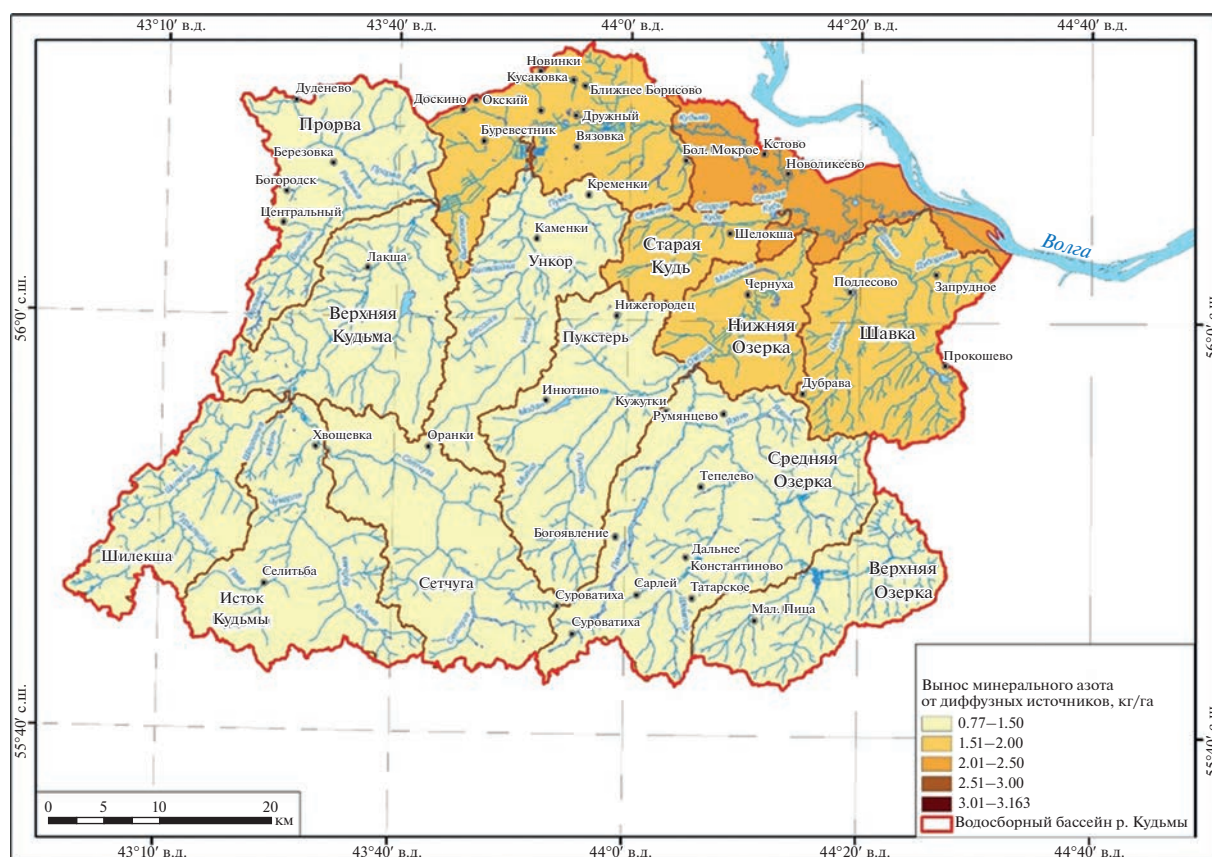


Рис. 2. Интенсивность выноса минерального азота от диффузных источников с подводосборов бассейна р. Кудьмы (площадь водосбора 3220 км²), кг/га в год.

нальной ГИС. Некоторые полученные результаты применения ЛГМ приведены на рис. 2–4.

Сильной стороной ЛГМ является максимальный учет ландшафтной структуры водосборов. К недостаткам следует отнести вынужденное использование ряда эмпирических зависимостей, что может несколько снизить точность расчетов стока ЗВ с водосбора. В этой связи предполагается, что в будущем в отдельные блоки ЛГМ будут включены более строгие физико-математические модели гидролого-геохимических процессов. Это позволит проводить расчеты этих процессов и потоков ЗВ с водосборов с большей точностью, в том числе при задании различных сценариев изменения климата, в соответствии с данными о прогнозируемых разными методами величинах осадков и температуры воздуха и прогнозируемых изменений в системах землепользования.

В целом необходимо отметить, что современный этап развития методов расчетов выноса ЗВ веществ с водосбора в водные объекты основывается на разработке нового поколения моделей гидрологического цикла с использованием ГИС-технологий и развитых баз данных. Эти модели используются для описания процессов цикла,

протекающих в разных временных масштабах и для водосборов разных пространственных размеров. Одновременно с этим осуществляется разработка моделей талой и дождевой водной эрозии почвы. Разработка гидрологических моделей, моделей водной эрозии и выноса химических веществ ведется в настоящее время параллельно, и они не всегда сочетаются друг с другом в решении задач, связанных с оценкой выноса ЗВ. Несомненно, что в ближайшем будущем на основе внедрения современных систем мониторинга произойдет устранение эклектичности подхода к проблеме оценки выноса ЗВ с водосбора путем разработки некоторых обобщенных моделей (комплекса моделей) формирования гидролого-геохимических процессов на водосборах. Они позволят рассчитывать не только их характеристики, но и параметры потоков ЗВ, поступающих с водосбора и обуславливающих качество воды водных объектов.

При разработке этих моделей необходимо решить несколько основных задач, наиболее полно раскрывающих суть процесса диффузного загрязнения водных объектов, в том числе следующие.

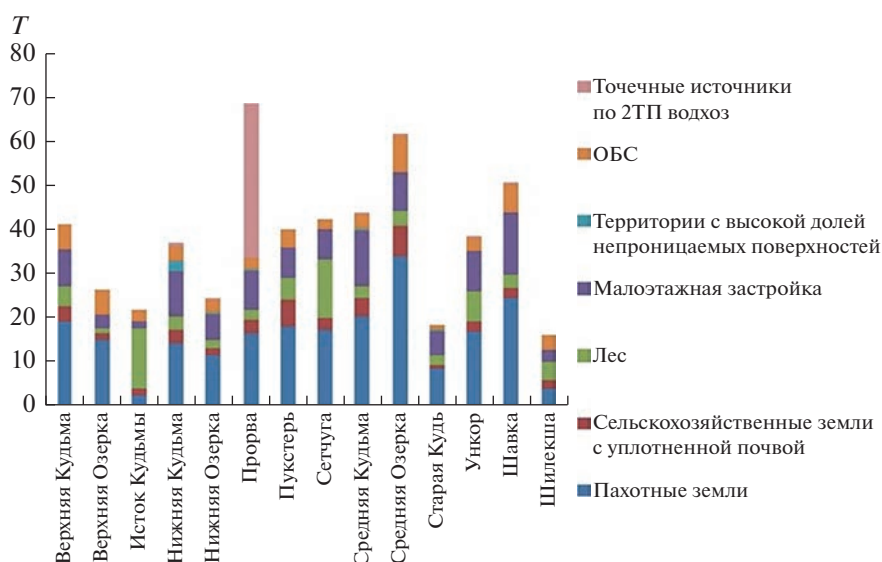


Рис. 3. Вклад диффузных и точечных источников в вынос минерального азота с подвodosборов бассейна р. Кудьмы (площадь водосбора 3220 км²), т/год.

1. Уже упоминавшаяся выше разработка моделей талой и дождевой эрозии почвы. Несмотря на то, что в решении этой проблемы достигнуты существенные результаты, заключающиеся в разработке физически обоснованных моделей ручейковой эрозии, отрыва почвенных частиц и транспортирующей способности потока (Сухановский, 2019; Шмакова, 2021), входящие в них параметры трудно определять на практике. Вероятно, именно поэтому в настоящее время для оценки объемов эрозии почвы и аккумуляции наносов широко используются аэрокосмические снимки, включая снимки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с различным пространственным разрешением и ГИС-технологии (Жидкин и др., 2021; Пространственно-временные ..., 2019). Основная проблема — интеграция уже разработанных моделей эрозии почвы и их модификаций в модели диффузного выноса ЗВ с водосбора в водные объекты, а также разработка специальной гидролого-географической модели эрозии почвы, с одной стороны — физически обоснованной, с другой — с достаточно просто определяемыми параметрами. Наиболее перспективным путем разработки такой модели является проведение комплексных полевых экспериментальных исследований на оборудованных современными приборами водосборах, позволяющими регистрировать быстропротекающие процессы в сочетании с использованием снимков с БПЛА, космических аппаратов и ГИС-технологий. ГИС-системы должны включать базы данных, содержащие весь набор необходимых исходных данных [гидрометеорологических, геохимических, включая мутность потоков на водосборе и в водотоке и необходимых для рас-

чета параметров водосбора, ручейковой сети и др. (Гарцман, Шамов, 2015; Ясинский и др., 2021)]. Методической основой такой модели могут являться физико-статистические зависимости типа $Q = f(V)$, $S = f(Q)$, где Q — расход воды в русле микроручейка; V — ширина микроручейка, потока, S — мутность потока.

2. Важной задачей, тесно связанной с разработкой моделей переноса вещества с потоками воды на водосборе и в русле водотока, является оценка количества и состава ЗВ, адсорбированных на частицах почвы разного гранулометрического размера. При этом перенос загрязнений в водной среде осуществляется как в растворенном, так и в значительной степени в твердой фазе со взвешенными и влекомыми наносами (Касимов и др., 2016). Проблема оценки объема и состава ЗВ при диффузном загрязнении водных объектов важна как для урбанизированных территорий, так для других водосборов. Однако, как уже говорилось, именно для территорий городов характерен самый значительный антропогенный прессинг на все компоненты окружающей среды (воздух, почвогрунты, поверхностные и подземные воды), определяющий как степень трансформации их физических свойств, так и объемы, и расширенный спектр ЗВ. При этом гидроэкологический мониторинг за состоянием водной и окружающей среды в крупных городах России практически отсутствует и его необходимо создавать для научного обоснования мероприятий по управлению городскими территориями.

3. Разработка зависимостей, позволяющих отдельно оценивать редукацию потоков ЗВ с водосбора и в речной сети. В настоящее время ис-

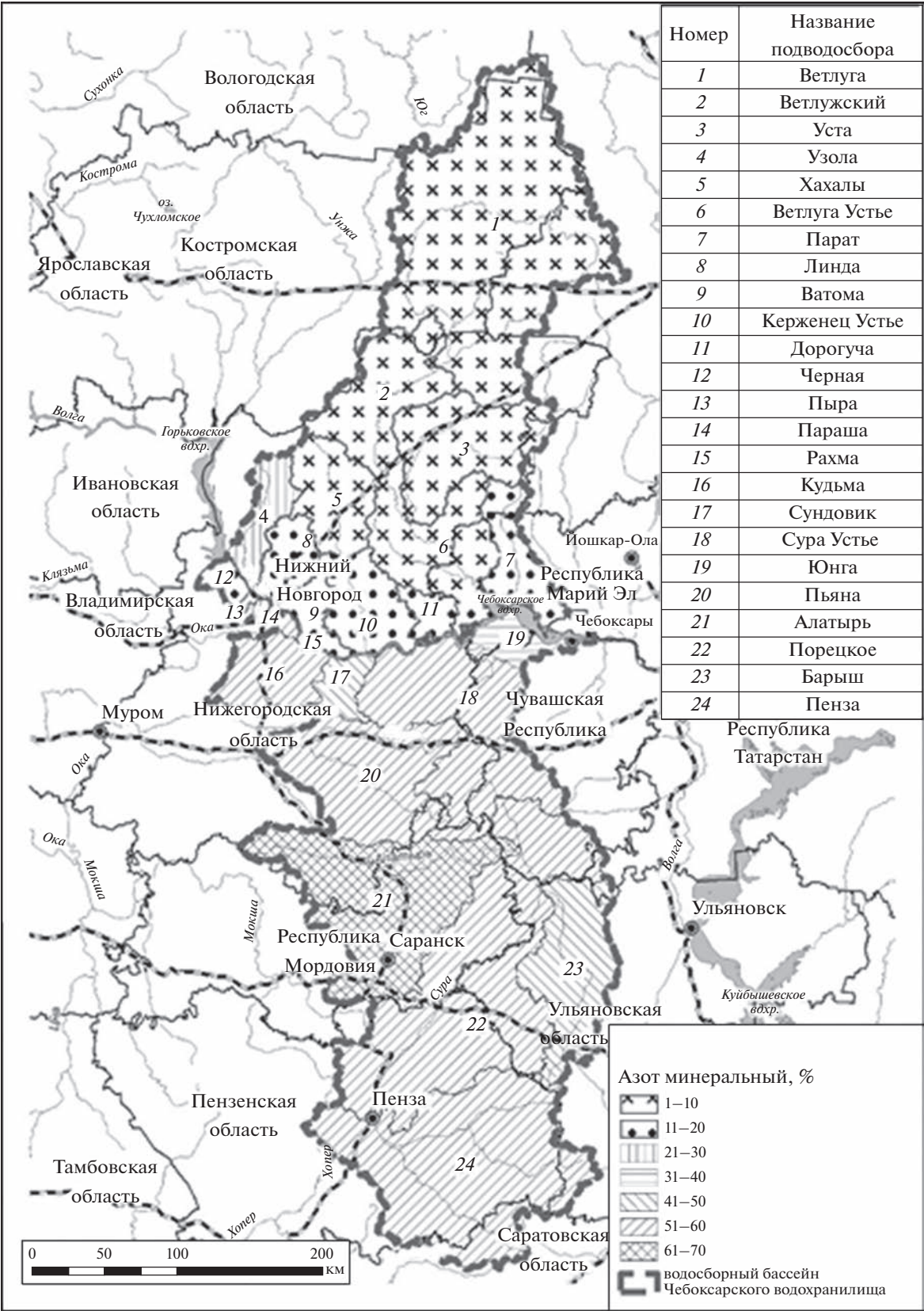


Рис. 4. Доля прямой антропогенной нагрузки (внесения удобрений и поступления отходов жизнедеятельности населения) в сток минерального азота от диффузных источников в Чебоксарское водохранилище, %.

пользуются обобщенная зависимость, интегрально учитывающая снижение объема этих потоков водосбором и руслом самого водотока (Кондрачев, Шмакова, 2019). На пути от границы водосбора до русла доходит не более 20% наносов, смываемых с водосбора в процессе эрозии почвы (Чалов, 2021). Склоновый сток, формирующийся на водосборах в период дождей паводков и при снеготаянии, обуславливающий смыв почвы, снижается в зависимости от их длины. При выпадении дождевых осадков снижение объема склонового стока на склонах значительной длины обусловлено большой вероятностью появления значительного количества участков с высокой инфильтрационной способностью почвы (Гусев, 1982). При снеготаянии снижение объема поверхностного весеннего склонового стока связано с высокой пространственной неоднородностью снежного покрова — верхние участки склона с тонким слоем снега находятся, как правило, в мерзлом состоянии, а нижние его участки, покрытые значительно более мощным слоем снега, — в талом состоянии и способны впитывать значительные объемы снеговой воды (Ясинский, 1994). Снижение потока смывой с водосбора и с абразией берегов почвы и других ЗВ в русле рек обусловлено их депонированием в излучинах, на поймах и других участках, где скорость воды снижается, и образуются застойные зоны, в которых происходит осаждение этого материала. Использование обобщенных зависимостей редукции потоков смывой почвы и ЗВ не позволяет в полной мере раскрыть и в какой-то мере учесть механизмы этого явления, что представляется важным при планировании различных природо- и водоохранных мероприятий на водосборах.

Естественно, перечисленными выше задачами не ограничивается список перспективных направлений комплексных исследований малоизученного процесса диффузного загрязнения водных объектов. Требуется дальнейшего совершенствования схемы расчета водоотдачи и образования стока при дождевых осадках и снеготаянии, при которых начинается образование микроручейковой сети и непосредственно эрозионный смыв, а также впитывания воды, особенно в мерзлую в почву, с учетом образования так называемого “запирающего слоя” (Калужный, Павлова, 1981). Необходим учет агрохимического состояния почвы при оценке переноса ЗВ склоновым стоком и эрозией почв. Важным представляется научное обоснование мероприятий по снижению уровня диффузного загрязнения с водосборов водных объектов. В настоящее время проблема диффузного загрязнения водных объектов находится на начальной стадии своего изучения. Требуется значительные усилия ученых разных специальностей, объединенных единой целью и пониманием ее важно-

сти, чтобы достигнуть значительного прогресса в решении ее основных задач.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках реализации и при поддержке гранта РФ 22-17-00224 “Формирование гидролого-геохимических процессов на водосборах каскадов Верхне-Волжских и Камских водохранилищ при различных сценариях землепользования и изменениях климата на их территориях” (разделы, связанные с формированием диффузного загрязнения, методические подходы), гранта РФФИ № 19-05-50082 Микромир “Диффузный перенос микрочастицами загрязняющих веществ с территории крупного города в водные объекты бассейна Волги (на примере Нижнего Новгорода)” (разделы, связанные с переносом загрязнений в разных фазах в городских условиях), а также в рамках Государственного задания Института географии РАН FMGE-2019-0007 (AAAA-A19-119021990093-8) (состояние вопроса оценки диффузного загрязнения).

FUNDING

The work was carried out within the framework of the implementation and with the support of the RSF grant no. 22-17-00224 “Hydrological and geochemical processes formation in the catchments of the cascade of the Upper Volga and Kama reservoirs under different land use and climate changes scenarios in their territories” (sections related to the formation of diffuse pollution, methodological approaches), the RFBR grant no. 19-05-50082 “Diffuse transfer of pollutants by microparticles from the large city territory of the Volga basin to water bodies (the case of Nizhny Novgorod)” (sections related to the formation of pollution in urban and transfer of pollution in different phases), as well as within the framework of the State assignment of the Institute of geography of the Russian Academy of Sciences FMGE-2019-0007 (AAAA-A19-119021990093-8) (the state of the issue of assessing diffuse pollution, methodological approaches).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бобровицкая Н.Н. Исследование и расчет смыва почвы со склонов // Сб. работ по гидрол. Л.: Гидрометеопиздат, 1977. № 12. С. 93–99.
- Болгов М.В., Голубаш Т.Ю., Лазарева Е.В., Ривар Ж. Моделирование режима поверхностных вод исторической части Ростова Великого // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2003. № 6. С. 508–518.
- Болгов М.В., Завьялова Е.В., Зайцева А.В., Осипова Н.В. Оценка диффузного стока с урбанизированных территорий в бассейне р. Волги (на примере г. Ростова) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 483–492.
- Борисов Д.С. Bentley Systems — моделирование и эксплуатация наружных сетей водоснабжения и канализации // Машиностроение. 2009. № 5. С. 64–68.

- Гарцман Б.И., Шамов В.В. Натурные исследования стокоформирования в дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 6. С. 589–599.
- Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в верхних звеньях флювиальной сети освоенных равнин умеренного пояса: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М.: Изд-во МГУ, 2003. 45 с.
- Гордин И.В., Кирпичникова Н.В. Сравнительная оценка экологической опасности поверхностных стоков с промышленных площадок и городских территорий // Промышленная энергетика. 1993. № 1. С. 32–39.
- Гусев Е.М. Вариант динамико-стохастического моделирования гидрологических процессов // Метеорология и гидрология. 1982. № 8. С. 75–82.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло-и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
- Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Рец Е.П., Сафронова Т.И., Бугров А.А., Телегина А.А., Телегина Е.А. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод европейской части России: формирование, распределение, использование. М.: Геос, 2015. 320 с.
- Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / науч. рук-ль В.И. Данилов-Данильян. М.: РАН, Ин-т водных проблем РАН, 2020. 512 с.
- Долгов С.В., Коронкевич Н.И. Гидрологическая яркость равнинной территории // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 1. С. 7–25.
- Долгов С.В., Швыдкий В.О., Штамм Е.В. Закономерности формирования баланса азота и фосфора на речных водосборах в центральной лесостепи Русской равнины в 1990–2020 гг. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2021. Т. 85. № 3. С. 355–367.
- Дрюпина Е.Ю., Эйрих А.Н., Эйрих С.С., Папина Т.С. Влияние крупных городов на качество речных вод (на примере р. Обь в районе г. Барнаула) // Вода: химия и экология. 2014. № 7. С. 3–9.
- Жидкин А.П., Голосов В.Н., Добрянский А.С. Оценка применимости цифровых моделей рельефа для моделирования эрозии почвы (на примере малого водосбора в Курской обл.) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 133–144.
- Зиновьев А.Т., Папина Т.С., Кудишин А.В., Ловцкая О.В., Дьяченко А.В., Марусин К.В., Носкова Т.В. Экспериментальные исследования и моделирование качества воды для оценки влияния диффузного стока с урбанизированных территорий // Науч. проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. М.: Студия Ф1, 2019. С. 359–365.
- Калужный И.Л., Павлова К.К. Формирование потерь талого стока. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 160 с.
- Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л., Пашкина М.П., Романченко А.О., Промахова Е.В. Бассейновый анализ потоков веществ в системе Селенга–Байкал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 3. С. 67–81.
- Китаев Л.М. Гидроэкологическая оценка урбанизированных территорий // Изв. РАН. Сер. геогр. 1995. № 3. С. 81–89.
- Китаев Л.М. Движение химических соединений в системе “атмосфера–поверхностный сток” в условиях города // Изв. РАН. Сер. геогр. 1993. № 6. С. 111–114.
- Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб., 2007. 255 с.
- Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор–водоток–водоем. СПб.: Нестор – История, 2019. 248 с.
- Коронкевич Н.И., Мельник К.С. Трансформация стока под влиянием ландшафтных изменений в бассейне р. Москвы и на территории города Москвы // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 2. С. 133–143.
- Куприянов В.В. Гидрологические аспекты урбанизации. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 184 с.
- Литвин Л.Ф., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г., Иванова Н.Н., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф. Стационарные исследования эрозии почвы при снеготаянии в Центральном Нечерноземье // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 11 / под ред. Р.С. Чалова. М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 57–76.
- Львович М.И., Чернышев Е.П. Закономерности водного баланса и вещественного обмена в условиях города // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1983. № 3. С. 23–29.
- Михайлов С.А. Диффузное загрязнение водных экосистем. Методы оценки и математические модели. Барнаул: День, 2000. 131 с.
- Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с.
- Назаров Н.А. Оценки эрозионного смыва почв и выноса биогенных элементов с поверхностным стоком талых и дождевых вод в речном бассейне // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 6. С. 645–652.
- Назаров Н.А., Леонов А.В. Моделирование водного и биогеохимического циклов лесного бассейна в течение года // Водные ресурсы. 1999. Т. 26. № 1. С. 53–47.
- Пространственно-временные закономерности развития современных процессов природно-антропогенной эрозии на Русской равнине / под ред. В.Н. Голосова, О.П. Ермолаева. Казань–М., 2019. 371 с.
- Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. М.: НИИ ВОДГЕО, 2014. 88 с.
- Сухановский Ю.П., Прущик А.В. Моделирование водной эрозии почвы // Эрозия Почв / Агенство

- “Apele Moldovei”, Chişinău: S. n., 2019 (Tipogr. “Lexon-Prim”). 200 p.
- Сухановский Ю.П., Пискунов А.Н., Санжарова С.И. Компьютерная модель для расчёта среднесуточных потерь почвы, обусловленных дождевой эрозией и эрозией почв при весеннем снеготаянии. Курск: ВНИИЗиЗПЭ РАСХН, 2009. 50 с.
- Фашевская Т.Б., Мотовилов Ю.Г., Алгушаева А.В. Гидролого-гидрохимические модели формирования диффузного загрязнения // Диффузное загрязнение водных объектов: Проблемы и решения: Кол. монография под рук. В.И. Данилова-Данильяна. М.: ИВП РАН, 2020а. С. 102–125.
- Фашевская Т.Б., Полянин В.О., Кирпичникова Н.В. Диффузное загрязнение водных объектов: источники, мониторинг, водоохранные мероприятия. М., 2020б. 171 с.
- Фролов А.В., Георгиевский В.Ю. Изменения водных ресурсов в условиях потепления климата и их влияние на приток к крупным водохранилищам России // Метеорология и гидрология. 2018. № 6. С. 67–76.
- Хрисанов Н.И., Осипов Г.К. Управление эвтрофированием водоемов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 279 с.
- Чалов Р.С. Речные наносы в эрозионно-русловых системах: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М.: Изд-во МГУ, 2021. 50 с.
- Черногаева Г.М. Гидрологическая роль урбанизации (на примере г. Москвы) // Вопр. географии. М.: Мысль, 1976. Сб. 102. С. 179–184.
- Чуян Г.А., Бойченко З.А., Тур О.П. Методические рекомендации по оценке выноса биогенных веществ поверхностным стоком. М.: ВАСХНИЛ, 1985. 32 с.
- Шмакова М.В. Модель почвенной эрозии. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021662286, 26.07.2021. Заявка № 2021661585 от 26.07.2021.
- Ясинский С.В. Пространственная неоднородность и водоотдача снежного покрова на склонах водосборов малых рек центральной лесостепи // Малые реки России. М.: МЦ ГО РФ, 1994. С. 207–229.
- Ясинский С.В., Веницианов Е.В., Кашутина Е.А., Сидорова М.В., Ершова А.А., Макеева И.Н. Вклад микро-частиц в перенос загрязнения реками и подземными водами в крупном городе // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Тр. VIII Всерос. науч.-практич. конф. с междунар. участием. Пермь, 2021. С. 407–411.
- Ясинский С.В., Вишневская И.А., Веницианов Е.В. Диффузное загрязнение водных объектов и оценка выноса биогенных элементов при различных сценариях землепользования на водосборе // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 2. С. 232–244.
- Ясинский С.В., Гуров Ф.Н., Шилькрот Г.С. Метод оценки выноса биогенных элементов в овражно-балочную и речную сеть малой реки // Изв. РАН. Сер. геогр. 2007. № 4. С. 44–53.
- Ясинский С.В., Гусев Е.М. Динамико-стохастическое моделирование процессов формирования весеннего склонового стока на малых водосборах // Почвоведение. 2003. № 7. С. 847–861.
- Ясинский С.В., Кашутина Е.А., Сидорова М.В. Результаты и перспективы гидрологических исследований на Курской биосферной станции Института географии РАН // Изв. РАН. Сер. геогр. 2021. Т. 85. № 4. С. 529–649.
- Ясинский С.В., Кашутина Е.А., Сидорова М.В., Нарыков А.Н. Антропогенная нагрузка и влияние водосбора на диффузный сток биогенных элементов в крупный водный объект (на примере водосбора Чебоксарского водохранилища) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 630–648.
- American Public Works Association. Water Pollution Aspects of Urban Runoff. U.S. Department of Interior, FWPCA (present EPA), Washington D.C. WP-20-15. 1969. 200 p.
- Arheimer B., Olsson J. Integration and Coupling of Hydrological Models with Water Quality Models: Application in Europe. Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), 2003. 53 p.
- Avellaneda P., Ballesterio T.P., Roseen R.M., Houle J.J. On parameter estimation of urban storm-water runoff model // J. Environ. Engineering. 2009. Vol. 135. P. 595–608.
- Behrendt H., Opitz D. Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load // Hydrobiologia. 1999. P. 111–122.
- Chen J., Adams B.J. Analytical urban storm water quality models based on pollutant buildup and washoff processes // J. of Environ. Engineering. 2006. Vol. 132. P. 1314–1330.
- Gander W. Buildup / Washoff Model for Dissolved Iron in Stormwater Runoff. Univ. of New Orleans, 5-18-2007. 73 p.
- Gironás J., Roesner L.F., Davis J. Storm water management model. Applications manual. Department of Civil and Environ. Engineering Colorado State Univ., Fort Collins, 2009. 180 p.
- Li R.M. Water and Sediment Routing from Watersheds / Modeling of Rivers. Wiley Int. Publ., 1979. P. 9.1–9.88.
- Shaw S.B., Stedinger J.R., Walter M.T. Evaluating urban pollutant buildup/wash-off models using a Madison, Wisconsin catchment // J. Environ. Engineering. 2010. Vol. 136. P. 194–203.
- Sutherland R.C., McCuen R.J. Simulation of Urban and Nonpoint Source Pollution // Wat. Res. Bul. 1978. Vol. 14(2). P. 409–428.
- Terstriep M.L., M.T. Lee, E.P. Mills, A.V. Greene, M. Razeur Rahman. Simulation of urban runoff and pollutant loading from the Greater Lake Calumet area. Illinois State Water Survey Champaign, Illinois, October 1990. 99 p.
- Wang L., Wei J., Huang Y., Wang G., Maqsood I. Urban nonpoint source pollution buildup and washoff models for simulating storm runoff quality in the Los Angeles County // Environ. Pol. 2011. Vol. 159. P. 1932–1940.
- Yasinsky S.V., Koronkevich N.I., Kashutina E.A., Sidorova M.V., Narykov A.N. Diffuse biogenic pollution of water bodies in the Volga river basin-example of Cheboksary reservoir basin // Wat. Res. Management: Methods, Appl. and Challenges. 2020. P. 123–152.

The Current State of the Problem of Assessing the Characteristics of Water Bodies Diffuse Pollution in Lowland Watersheds

S. V. Yasinsky^{1, *}, E. A. Kashutina^{1, **}, and M. V. Sidorova^{1, ***}

¹*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: yasinski@igras.ru

**e-mail: kashutina@igras.ru

***e-mail: sidorova@igras.ru

A review of modern ideas about the nature and specifics of diffuse pollution of water bodies is made. The formation, movement, and transformation of water flows formed in watersheds during periods of snowmelt and rainfall saturated with dissolved and suspended substances is a complex multidimensional process distributed over the catchment area. The main factors in the formation of diffuse pollution of water bodies is the interaction of a complex of hydrological and geochemical processes, depending on the climatic features of the territory and the structure of land use in watersheds. The development of the chemical and biological industries has led to the entry into the natural environment of new pollutants alien to the biota, requiring new methods for monitoring and cleaning sources of diffuse and point pollution. In cities, the issue of entry and pollution of water bodies with a wide range of pollutants, including microplastics, is most acute. Suspension microparticles carry a significant proportion of priority pollutants for large cities (surfactants, oil products, heavy metals). It is noted that diffuse pollution of water bodies, which forms on various types of the underlying surface of watersheds, is not registered and is not regulated by any state water management or environmental department. The main reasons for this are the uncertainty of the consumer of diffuse runoff, the complexity of organizing its monitoring, and the incomplete understanding by state water authorities of its key role in pollution of water bodies due to insufficient scientific knowledge of the problem in Russia. The necessity of developing a modern scientifically substantiated network for monitoring diffuse runoff is noted. A review of modern models developed both in Russia and abroad, used to calculate the release of pollutants into water bodies using GIS technologies and advanced databases, is made. In a number of cases, an imbalance was noted in the degree of development of blocks describing the transfer of water, sediment and chemicals. Examples of the work of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences in the modeling of diffuse pollution in the basin of the Cheboksary reservoir under the program "Improvement of the Volga" are given.

Keywords: diffuse pollution, small rivers, urban water environment, modeling, phases of the state of pollutants, transport of pollution with microparticles, xenobiotics

REFERENCES

- American Public Works Association. *Water Pollution Aspects of Urban Runoff*. Washington D.C.: U.S. Department of Interior, FWPCA (present EPA), WP-20-15. 1969. 200 p.
- Arheimer B., Olsson J. *Integration and Coupling of Hydrological Models with Water Quality Models: Application in Europe*. Swedish Meteorol. and Hydrol. Inst. (SMHI), 2003. 53 p.
- Avellaneda P., Ballesteros T.P., Roseen R.M., Houle J.J. On parameter estimation of urban storm-water runoff model. *J. Environ. Eng.*, 2009, vol. 135, pp. 595–608.
- Behrendt H., Opitz D. Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load. *Hydrobiologia*, 1999, pp. 111–122.
https://doi.org/10.1007/978-94-017-2163-9_13
- Bobrovitskaya N.N. Study and calculation of soil erosion from slopes. In *Sbornik rabot po gidrologii* [Collection of Works on Hydrology]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1977, vol. 12, pp. 93–99.
- Bolgov M.V., Golubash T.Yu., Lazareva E.V., Rivar J. Modeling the surface water regime of the historical part of Rostov the Great. *Geoekologiya, Inzhenernaya Geol., Gidrogeol., Geokriol.*, 2003, no. 6, pp. 508–518. (In Russ.).
- Bolgov M.V., Zav'yalova E.V., Zaitseva A.V., Osipova N.V. Evaluating the diffuse runoff from urban territories in the Volga basin: case study of Rostov city. *Water Resour.*, 2020, vol. 47, pp. 673–681.
<https://doi.org/10.1134/S0097807820050036>
- Borisov D.C. Bentley Systems – modeling and operation of external water supply and sewerage networks. *Mech. Eng.*, 2009, no. 5, pp. 64–68. (In Russ.).
- Chalov R.S. River sediments in erosion-channel systems. *Extended Abstract of Doct. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Moscow State Univ., 2021. 50 p.
- Chen J., Adams B.J. Analytical urban storm water quality models based on pollutant buildup and washoff processes. *J. Environ. Eng.*, 2006, vol. 132, pp. 1314–1330.
- Chernogaeva G.M. Hydrological role of urbanization (the case of Moscow). In *Vopr. Geogr.* [Problems of Geography]. Moscow: Mysl' Publ., 1976, vol. 102, pp. 179–184. (In Russ.).
- Chuyan G.A., Boychenko Z.A., Tur O.P. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke vynosa biogennykh veshchestv poverkhnostnym stokom* [Guidelines for Assessing the Removal of Biogenic Substances by Surface Runoff]. Moscow: VASKHNIL, 1985. 32 p.
- Dolgov S.V., Koronkevich N.I. Hydrological layering of the flat territory *Izv. Akad. Ser. Geogr.*, 2010, no. 1, pp. 7–25. (In Russ.).

- Dolgov S.V., Shvydkii V.O., Stamm E.V. Patterns of the formation of nitrogen and phosphorus balance in river drainage areas in the central forest-steppe of the Russian Plain in 1990–2020. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2021, no. 3, pp. 355–367. (In Russ.).
- Dryupina E.Yu., Eirikh A.N., Eirikh S.S., Papina T.S. Influence of large cities on the quality of river waters (the case of the Ob River near Barnaul). *Voda: Khimiya i Ekologiya*, 2014, no. 7, pp. 3–9. (In Russ.).
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B., Rets E.P., Safronova T.I., Bugrov A.A., Telegina A.A., Telegina E.A. *Sovremennye resursy podzemnykh i poverkhnostnykh vod evropeiskoi chasti Rossii: formirovanie, raspredelenie, ispol'zovanie* [Modern Resources of Underground and Surface Waters of the European Part of Russia: Formation, Distribution, Use]. Moscow: Geos Publ., 2015. 320 p.
- Fashchevskaya T.B., Motovilov Yu.G., Algushaeva A.V. Hydrological-hydrochemical models of the formation of diffuse pollution. In *Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ob'ektov: Problemy i resheniya* [Diffuse Pollution of Water Bodies: Problems and Solutions]. Danilov–Danil'yan V.I., Ed. Moscow: Inst. Vodn. Probl. Ros. Akad. Nauk, 2020a, pp. 102–125. (In Russ.).
- Fashchevskaya T.B., Polyani V.O., Kirpichnikova N.V. *Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ob'ektov: istochniki, monitoring, vodookhrannye meropriyatiya* [Diffuse Pollution of Water Bodies: Sources, Monitoring, Water Protection Measures]. Moscow, 2020b. 171 p.
- Frolov A.V., Georgievskii V.Y. Changes in water resources under conditions of climate warming and their impact on water inflow to Russian large reservoirs. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, pp. 390–396. <https://doi.org/10.3103/S1068373918060067>
- Gander W. *Buildup/Washoff Model for Dissolved Iron in Stormwater Runoff*. Univ. of New Orleans, 2007. 73 p.
- Gartsman B.I., Shamov V.V. Field studies of runoff formation in the far east region based on modern observational instruments. *Water Resour.*, 2015, vol. 42, pp. 766–775. <https://doi.org/10.1134/S0097807815060044>
- Gironás J., Roesner L.F., Davis J. *Storm Water Management Model. Applications Manual*. Fort Collins: Dep. Civil and Environ. Eng. Colorado State Univ., 2009. 180 p.
- Golosov V.N. Erosion-accumulative processes in the upper links of the fluvial network of the developed plains of the temperate zone. *Extended Abstract of Doct. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Moscow State Univ., 2003. 45 p.
- Gordin I.V., Kirpichnikova N.V. Comparative assessment of the environmental hazard of surface runoff from industrial sites and urban areas. *Prom. Energetika*, 1993, no. 1, pp. 32–39. (In Russ.).
- Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelirovanie teplo-i vlagoobmena poverkhnosti sushii s atmosferoi* [Modeling of Heat and Moisture Exchange of the Land Surface with the Atmosphere]. Moscow: Nauka Publ., 2010. 328 p.
- Gusev Y.M. Dynamics-stochastic simulation of hydrological processes. *Soviet Meteorol. Hydrol.*, 1982, no. 8, 58 p.
- Kalyuzhnyi I.L., Pavlova K.K. *Formirovanie poter' talogo stoka* [Melt Runoff Losses Formation]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1981. 160 p.
- Kasimov N.S., Lychagin M.Yu., Chalov S.R., Shinkareva G.L., Pashkina M.P., Romanchenko A.O., Pro-makhova E.V. Catchment based analysis of matter flows in the Selenga-Baikal system. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2016, no. 3, pp. 67–81. (In Russ.).
- Khrisanov N.I., Osipov G.K. *Upravlenie evtrofirovaniem vodoemov* [Management of Eutrophication of Water Bodies]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 1993. 279 p.
- Kitaev L.M. Hydroecological assessment of urbanized territories. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1995, no. 3, pp. 81–89. (In Russ.).
- Kitaev L.M. Movement of chemical compounds in the “atmosphere-surface runoff” system in urban conditions. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1993, no. 6, pp. 111–114. (In Russ.).
- Kondrat'ev S.A. *Formirovanie vneshnei nagruzki na vodoe-my: problemy modelirovaniya* [Formation of External Load on Water Bodies: Modeling Problems]. St. Petersburg, 2007. 255 p.
- Kondrat'ev S.A., Shmakova M.V. *Matematicheskoe modelirovanie massoperenosa v sisteme vodosbor–vodotok–vodoem* [Mathematical Modeling of Mass Transfer in the System Catchment Area–Watercourse–Reservoir]. St. Petersburg: Nestor–Istoriya Publ., 2019. 248 p.
- Koronkevich N.I., Mel'nik K.S. Runoff transformation under the effect of landscape changes in the Moskva R. basin and in the territory of Moscow city. *Water Resour.*, 2015, vol. 42, pp. 159–169. <https://doi.org/10.1134/S0097807815020062>
- Kupriyanov V.V. *Gidrologicheskie aspekty urbanizatsii* [Hydrological Aspects of Urbanization]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1977. 184 p.
- L'vovich M.I., Chernyshev E.P. Patterns of water balance and material exchange in urban conditions. *Izv. Akad. Nauk., Ser. Geogr.*, 1983, no. 3, pp. 23–29. (In Russ.).
- Li R.M. Water and Sediment Routing from Watersheds. In *Modeling of Rivers*. Wiley Int. Publ, 1979, ch. 9.1–9.88.
- Litvin L.F., Golosov V.N., Dobrovolskaya N.G., Ivanova N.N., Kiryukhina Z.P., Krasnov S.F. Stationary studies of soil erosion during snowmelt in the Central Non-Chernozem region. In *Eroziya pochv i ruslovy protsessy* [Soil Erosion and Channel Processes]. Chalova R.S., Ed. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1998, vol. 11, pp. 57–76.
- Mikhailov S.A. *Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ekosistem. Metody otsenki i matematicheskie modeli* [Diffuse Pollution of Aquatic Ecosystems. Estimation Methods and Mathematical Models]. Barnaul: Dei Publ., 2000. 131 p.
- Motovilov Yu.G., Gelfan A.N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachakh gidrologii rechnykh basseinov* [Models of Runoff Formation in the Problems of Hydrology of River Basins]. Moscow: Ros. Akad. Nauk, 2018. 300 p.
- Nazarov N.A. Assessments of erosion loss of soils and removal of biogenic substances with surface runoff of melt and rain water in a river basin. *Water Resour.*, 1996, vol. 23, pp. 597–604. (In Russ.).
- Nazarov N.A., Leonov A.V. Modeling of annual water and biogeochemical cycles in a forest basin. Modeling of water and biogeochemical cycles of the forest basin during the year. *Water Resour.*, 1999, vol. 26, pp. 29–40. (In Russ.).

- Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti razvitiya sovremennykh protsessov prirodno-antropogennoi erozii na Russkoi ravnine* [Spatial and Temporal Patterns of Development of Modern Processes of Natural and Anthropogenic Erosion on the Russian Plain]. Golosov V.N., Ermolaev O.P., Eds. Kazan—Moscow, 2019. 371 p.
- Rekomendatsii po raschetu sistem sbora, otvedeniya i ochistki poverkhnostnogo stoka s selitebnykh territorii, ploshchadok predpriyatii i opredeleniyu uslovii vypuska ego v vodnye ob'ekty* [Recommendations for the Calculation of Systems for Collecting, Diverting and Treating Surface Runoff from Residential Areas, Enterprise Sites and Determining the Conditions for Its Release into Water Bodies]. Moscow: NII VODGEO Publ., 2014. 88 p.
- Shaw S.B., Stedinger J.R., Walter M.T. Evaluating urban pollutant buildup/wash-off models using a Madison, Wisconsin catchment. *J. Environ. Eng.*, 2010, vol. 136, pp. 194–203.
- Shmakova M.V. *Model' pochvennoi erozii* [Soil Erosion Model]. Certificate of registration of the computer program 2021662286, 07/26/2021. Application No. 2021661585 dated 07/26/2021. (In Russ.).
- Sukhanovskii Yu.P., Prushchik A.V. Modeling of water erosion of soil. In *Eroziya Pochv* [Erosion of Soils]. Lexon-Prim, 2019. 200 p.
- Sukhanovskii Yu.P., Piskunov A.N., Sanzharova S.I. *Komp'yuternaya model' dlya raschyota srednemnogoletnikh poter' pochvy, obuslovlennykh dozhdovoi eroziei i eroziei pochv pri vesennem snegotayanii* [A Computer Model for Calculating Average Annual Soil Losses Due to Rain and Soil Erosion During Spring Snowmelt]. Kursk: VNIIZPE RAAS Publ., 2009. 50 p.
- Sutherland R.C., McCuen R.J. Simulation of Urban and Nonpoint Source Pollution. *Water Resour. Bull.*, 1978, vol. 14, no. 2, pp. 409–428.
- Terstriep M.L., Ming T. Lee, Evan P. Mills, Amelia V. Greene, M. Razeur Rahman *Simulation of Urban Runoff and Pollutant Loading from the Greater Lake Calumet Area*. Illinois State Water Survey Champaign, Illinois, October 1990. 99 p.
- Upravlenie evtrofirovaniem vodoemov* [Diffuse Pollution of Water Bodies: Problems and Solutions]. Danilov-Danil'yan V.I., Ed. Moscow: Inst. Vodn. Probl. Ros. Akad. Nauk, 2020. 512 p.
- Wang L., Wei J., Huang Y., Wang G., Maqsood I. Urban nonpoint source pollution buildup and washoff models for simulating storm runoff quality in the Los Angeles County. *Environ. Pollut.*, 2011, vol. 159, pp. 1932–1940.
- Yasinsky S.V. Spatial Heterogeneity and Water Loss of Snow Cover on the Slopes of Watersheds of Small Rivers in the Central Forest–Steppe. In *Malye reki Rossii* [Small Rivers of Russia]. Moscow: MTs GO RF Publ., 1994, pp. 207–229. (In Russ.).
- Yasinskii S.V., Gusev E.M. Dynamic-stochastic modeling of spring slope runoff in small drainage areas. *Eurasian Soil Sci.*, 2003, no. 7, pp. 761–774.
- Yasinskii S.V., Kashutina E.A., Sidorova M.V., Narykov A.N. Anthropogenic load and the effect of drainage area on the diffuse runoff of nutrients into a large water body: case study of the Cheboksary reservoir. *Water Resour.*, 2020, vol. 47, pp. 810–827.
- Yasinsky S.V., Koronkevich N.I., Kashutina E.A., Sidorova M.V., Narykov A.N. Diffuse biogenic pollution of water bodies in the Volga river basin-example of Cheboksary reservoir basin. In *Water Resources Management: Methods, Applications and Challenges*, 2020, pp. 123–152. (In Russ.).
- Yasinsky S.V., Venitsianov E.V., Kashutina E.A., Sidorova M.V., Ershova A.A., Makeeva I.N. The contribution of microparticles to the transport of pollution by rivers and groundwater in a large city. In *Sovremennye problemy vodokhranilishch i ikh vodosborov* [Modern Problems of Reservoirs and Their Watersheds]. Perm, 2021, pp. 407–411. (In Russ.).
- Yasinsky S.V., Vishnevskaya I.A., Venitsianov E.V. Diffuse pollution of water bodies and estimation of export of biogenic elements under different scenarios of water use in the watershed. *Water Resour.*, 2019, vol. 46, pp. 266–277.
- Yasinsky S.V., Gurov F.N., Shilkrot G.S. Method of drifted-over evaluation of biogenic elements to ravine-balka and river system by small river. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2007, no. 4, pp. 44–53. (In Russ.).
- Yasinsky S.V., Kashutina E.A., Sidorova M.V. Results and Prospects of Hydrological Research at the Kursk Biosphere Station of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2021, vol. 85, no. 4, pp. 629–640. (In Russ.).
- Zhidkin A.P., Golosov V.N., Dobryansky A.S. Assessment of the accuracy of digital elevation models for modeling soil erosion (by the example of a small catchment area in the kursk region). *Sov. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2021, vol. 18, no. 5, pp. 133–144. (In Russ.).
- Zinov'ev A.T., Papina T.S., Kudishin A.V., Lovtskaya O.V., Dyachenko A.V., Marusin K.V., Noskova T.V. Experimental research and modeling of water quality to assess the impact of diffuse runoff from urban areas. In *Nauchnye problemy ozdorovleniya rossiiskikh rek i puti ikh resheniya* [Scientific Problems of Improving Russian Rivers and Ways to Solve Them]. Moscow: Studio F1 Publ., 2019, pp. 359–365.

УДК 628.1:614.79

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА СЕЛЬСКОГО БЫТОВОГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ДОМАШНИХ ХОЗЯЙСТВ (НА ПРИМЕРЕ СЕМЛОВСКОГО СЕЛЬСКОГО ОКРУГА, ЯРОСЛАВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

© 2023 г. Г. А. Фоменко^{a, b, *}, М. А. Фоменко^{c, **}, К. А. Лошадкин^{b, c, ***}

^aНПО Институт Устойчивых Инноваций, Ярославль, Россия

^bЯрославский государственный технический университет, Ярославль, Россия

^cАНО Научно-исследовательский проектный институт “Кадастр”, Ярославль, Россия

*e-mail: info@npo-kad.ru

**e-mail: fomenkoma@rcs-cad.com

***e-mail: loshadkina@rcs-cad.com

Поступила в редакцию 17.02.2022 г.

После доработки 06.08.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

В статье показаны особенности бытового водопотребления сельских домашних хозяйств на рубеже XX–XXI вв. и обоснована потребность в изменении сложившихся технократических подходов к планированию бытового водопользования. На примере Семловского сельского округа Даниловского района Ярославской области с 1976 г. изучалась практика выбора жителями источника в зависимости от качества воды, экономических и технических возможностей, а также от социокультурных традиций. Исследования базировались на методологии изучения сельского водопользования выдающегося географа Гилберта Уайта на основе подходов поведенческой географии. С помощью полевых исследований, интервьюирования и полуструктурированных опросов выявлялось, каким образом сельские жители решают проблему обеспечения водой, выбирают источник и оценивают воду как экономическое благо. Изучены представления управленцев в сфере бытового водоснабжения и проанализированы плановые документы. Показано, что ориентация исключительно на централизованное водоснабжение, с целью обеспечить соблюдение нормативов качества воды, на селе производит обратный эффект, когда рациональный выбор водопользователя смещается на более дешевый и надежный источник, но с худшим качеством воды. Обоснована важность ориентации водохозяйственной деятельности на реальные предпочтения сельских жителей в бытовом водопотреблении. Показана целесообразность комплексного подхода к разработке стратегий сельского водоснабжения с учетом проживания водопользователей в различных социально-географических условиях. Тем самым удовлетворение потребности людей в качественном водоснабжении становится возможным без увеличения затрат сельских домашних хозяйств. Отмечено, что реализация такого подхода требует изменения стратегического видения проблем пространственного развития, что неизбежно усложняет работу сервисных водохозяйственных организаций.

Ключевые слова: водопользование, поведенческая география, сельское водопотребление, сельские домашние хозяйства, источник водоснабжения, Ярославская область

DOI: 10.31857/S2587556623010065, **EDN:** LFLBUW

ВВЕДЕНИЕ

Бытовое водопотребление — неотъемлемая часть жизни каждого человека. Не случайно право на воду провозглашено ООН в качестве одного из основных прав человека. Принципиально, что вода трактуется весьма широко — как вода, используемая для всех обычных бытовых целей, включая потребление, купание и приготовление пищи (Guidelines ..., 1993, 2003, 2017). Между тем ситуация в сфере бытового водопотребления далека от благополучной. Несмотря на то, что в 2015 г. 6.6 млрд человек (более 90% населения мира) бы-

ли обеспечены безопасной питьевой водой (Progress towards ..., 2017), для 2.3 млрд человек все еще недоступны базовые санитарные услуги¹. Во многих регионах нарастает дефицит пресной питьевой воды². В наибольшей степени это касается сельских жителей.

¹ <https://undocs.org/ru/A/RES/72/178> (дата обращения 24.01.2022).

² <https://www.unwater.org/water-facts> (дата обращения 29.01.2022).

В Российской Федерации при обеспеченности 97% населения безопасной питьевой водой, в 2018 г. только 67.3% сельских жителей получали качественную воду из систем централизованного водоснабжения, тогда как в городах данный показатель составлял 94.7%. Что касается нецентрализованного водоснабжения, то доля сельского населения страны здесь составляла более 17.53%, а в городах — 1.8% (Государственный ..., 2019). Широко распространено мнение, что главной причиной такой ситуации остается отсутствие достаточного финансирования³. Однако проблема обусловлена не только и не столько недостаточным финансированием. В современном мире предпринимались попытки реализации множества больших и малых водных проектов, которые частично или полностью потерпели неудачу из-за того, что социально-географические аспекты водопользования не были должным образом проанализированы или интегрированы в комплексные водохозяйственные решения (Lund, 2015).

Цель данной статьи — на основании результатов многолетних исследований на пилотной территории в регионе Центральной России показать изменения в сельском бытовом водопотреблении домашних хозяйств в результате социальных и экономических преобразований на рубеже XX—XXI вв., создав расширенную картину сельского бытового водопользования за многолетний период, и на этой основе обосновать потребность и наметить тренды преодоления укоренившихся технократических подходов к организации сельского водоснабжения. Для этого были поставлены задачи изучить долгосрочную динамику состояния и использования источников бытового водоснабжения, с акцентом на доступность и качество воды; исследовать, каким образом сельские жители решают для себя проблему обеспечения водой, выбирая тот или иной водоисточник; как их действия соотносятся с решениями территориальных органов власти по улучшению водоснабжения.

МЕТОДОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИЯ

Сельский житель ежедневно принимает решение по обеспечению водой домашнего хозяйства; он руководствуется набором потребностей в воде и набором возможных способов удовлетворения этих потребностей из нескольких источников. Обе этих составляющих кардинальным образом зависят от широко понимаемых географических условий конкретной территории и определяются социокультурными традициями. В этом контексте многофакторная оценка выбора водоисточников для различных бытовых целей в конкрет-

ных географических условиях представляет собой первоочередную задачу (JMP Methodology ..., 2018).

В России вопросы сельского водопользования рассматриваются в работах географов: Ю.С. Никольникова (1979), В.А. Пуляркина (2005), Н.И. Коронкевича (Koronkevich et al., 2022), Л.М. Коротного (Коротный и др., 2018), Б.М. Ишмуратова (Ишмуратов, Шагжиев, 2018), Н.Н. Колосовского (2006) и др. Раскрытие проблем комплексного использования водных ресурсов, применение организационно-экономических механизмов управления на основе оценки полной экономической ценности питьевой воды осуществлено в работах С.Н. Бобылева (Бобылев, Горячева, 2019), Р.А. Перелета (2010, 2013), Ю.В. Бабиной (Бабина, Кочуров, 2021) и др. Отечественные исследования водопотребления сельского населения преимущественно нацелены на решение вопросов обеспечения качества воды в соответствии с санитарными нормами и надежности ее доставки сельским водопользователям в комплексе с развитием сельскохозяйственного производства на основе систем централизованного водоснабжения (Демин, 2008; Малышева, Козина, 2015). В аналитике в большинстве случаев используются данные статистики и административные данные в сфере коммунального хозяйства.

Поведенческие особенности деятельности сельских домохозяйств постсоветской России также не остались без внимания, однако преимущественно рассматриваются потребительские расходы домашних хозяйств в условиях изменения рыночной конъюнктуры за счет экономических, политических факторов и не затрагивают выбор вариантов водопользования. Некоторые полезные подходы можно найти в институциональном анализе деятельности домохозяйств. Здесь следует отметить результаты исследования “виртуальной мастерской” под руководством Р.М. Нуреева по институциональным особенностям деятельности российских домашних хозяйств. Интересно и исследование институциональных ловушек низкого уровня доходов и роли государства, способствующей выходу из них (Капогузов, Быкова, 2014; Фролова, 2006).

Литературный обзор показал, что важнейшая черта сельского бытового водопользования — возможность выбора источника питьевого водоснабжения в увязке с предпочтениями и мотивацией людей в регионах России — не изучена, и этот фактор не принимается во внимание при организации водоснабжения сельского населения. Учет этого фактора актуален, поскольку он касается комплексного регулирования водопользования на селе в условиях нехватки инвестиций на содержание дорогостоящих систем централизованного водоснабжения.

³ <https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2011/ece/ece.astana.conf.2011.8.e.pdf> (дата обращения 29.01.2022).

Эта новая область исследования сложного и многофакторного поведения людей относительно важнейшего из потребляемых человеком ресурсов — питьевой воды привлекла наше внимание в середине 1990-х годов. В мире ее развитие связывают с именем Г. Уайта, который впервые с коллегами (White et al., 1972), развивая подходы поведенческой географии Дж. Голда (1980), начал изучение поведения людей относительно питьевой воды. На примере Восточной Африки он по-новому взглянул на, казалось бы, привычные сложные проблемы сельского бытового водопользования и увидел непривычные пути их решения.

Внимание к методологии Г. Уайта существенно возросло в связи с широким распространением подходов устойчивого развития (Balasubramaniam et al., 2011; Baldwin, 1983; Irianti et al., 2014; Thompson et al., 2003). Так, Т. Кативху, исследовав устойчивость систем водоснабжения в сельских районах Зимбабве, убедительно показал актуальность предложенных подходов для развивающихся стран (Kativhu, 2016). А. Газзинелли с соавторами (Gazzinelli et al., 1998) на уровне домохозяйства в небольшой сельской деревне на севере штата Минас-Жерайс в Бразилии изучили взаимосвязь между водопользованием и социально-экономическими, экологическими и пространственными параметрами (использовались такие методы, как прямое наблюдение, опросы домохозяйств, статистическое картографирование). Исследователи выявили, что домохозяйства при принятии решений по обеспечению себя водой руководствуются следующим: совместное использование водоисточников домохозяйствами; использование одним домохозяйством нескольких водоисточников и избегание загрязненных; преобладание социально-экономических факторов при выборе водоисточника. Изучая эффективность предоставления услуг в области доступа к безопасной воде, санитарии и гигиены в штате Кадуна, Нигерия, на основании опросов сельских водопользователей М. Шридхар с соавторами показали, что важным условием достижения успеха в реализации эффективной и устойчивой системы управления водными ресурсами является наличие достаточных знаний о потребностях домашних хозяйств в воде (Sridhar et al., 2020).

На постсоветском пространстве наиболее широким по охвату следует назвать исследования в Армении, Беларуси, Грузии, Молдове, Казахстане, Кыргызстане, России и Украине, где опросами в области сельского водопотребления было охвачено 18 428 человек в возрасте старше 18 лет. Это крупнейшее исследование продемонстрировало, что значительное число людей, живущих в сельских районах бывшего Советского Союза, не имеют доступа к водопроводу и канализации в помещениях (McKee et al., 2006). Было сделано

важное обобщение, что многие проблемы бытового водоснабжения в этих странах в значительной мере обусловлены особенностями функционирования государственной системы коллективного сельскохозяйственного производства, когда совхозы и колхозы, как основные экономические агенты, занимались вопросами жизнеобеспечения местного населения (своих трудовых ресурсов). Развивая эти исследования на примере Центрального Казахстана, А. Омарова с соавторами выполнили оценку текущего доступа к воде и предполагаемого качества воды в деревнях с различными типами водоснабжения (Omarova et al., 2019).

Все эти исследования расширяют рамки узкого, отраслевого, часто механистического взгляда на управление сельским бытовым водопотреблением домашних хозяйств и предполагают действия по повышению устойчивости развития “живых” территориальных антропо-природных систем (АПС) (англ. Human-Dominated Ecosystems), в которых на каждом этапе эволюции складывается баланс интересов различных групп водопользователей. Применительно к сельскому бытовому водопотреблению это предполагает многоцелевое использование источников воды для различных хозяйственных нужд (например, для стирки половиков не нужна вода питьевого качества), а также согласование целей устойчивого развития территорий и действий, эффективных в контексте поддержания “здоровья” антропо-природных систем.

Такой взгляд на сельское бытовое водопотребление домашних хозяйств как составную часть АПС не только более гибок в экономическом и социальном отношениях, но и стимулирует заботу сельских жителей об исправном состоянии водоисточников и о сохранении окружающей природной среды. Он существенно повышает мотивацию сельских жителей к сохранению и восстановлению экосистем и потоков экосистемных услуг. Такая модель предусматривает повышение роли конструктивного диалога, налаживание взаимодействия в решении проблем обеспечения водой. Тем более что локальные, исторически сложившиеся практики природопользования (в том числе и водопользования) часто оказываются более жизнеспособными и устойчивыми в конкретных географических условиях (Ostrom, 2010).

На этой методологической платформе нами были выполнены исследования⁴ сельского бытового водопотребления в населенных пунктах Семловской административной территории в Даниловском муниципальном районе Ярославской области за период с 1976 по 1996 г. (Лошадкин, 2001; Фоменко Г., Фоменко М., 1998, 1999). В

⁴ Работа выполнена при поддержке Российского гуманитарного научного фонда. Проект 96-02-02108.

2019 г. такие же полевые исследования были проведены в тех же населенных пунктах: пос. Семлово — центральная усадьба ТОО «Рассвет», деревни Тошаново, Скипино, Ломки, Беклюшки, Романцево, Бякишево, хутор Починок. Изучались имеющиеся на территории источники воды — по видам, количеству и состоянию, в динамике, начиная с 1976 г. По единой методике изучалось мнение местных жителей и муниципальных управленцев (проводились в 1996 и в 2019 г. с использованием полуструктурированных опросников) о том, какие источники являются наиболее предпочтительными для обеспечения бытового водопользования. Важную часть исследований составил анализ факторов выбора источника воды или отказа от использования источника, по мнению местных жителей и по мнению муниципальных управленцев. Такой анализ выполнялся по единой группе факторов — качество воды (соответствие санитарным нормативам), технические возможности забора воды, экономическая эффективность, влияние других людей. Определение ценности воды для сельских потребителей было выполнено с использованием метода прямой нерыночной оценки (субъективная оценка на основе готовности платить)⁵.

Исследованиями было охвачено 168 домашних хозяйств в 1996 г. и 145 хозяйств в 2019 г. В деревнях Тошаново, Скипино, Ломки, Беклюшки, Романцево, Бякишево и хутор Починок выборка опрошенных домашних хозяйств была равна их общему числу в указанных деревнях, а в поселке Семлово выборка составила 20% хозяйств поселка и всех перечисленных деревень. Репрезентативность выборки была обеспечена случайностью выбора домашних хозяйств для опроса. Много ценного дали беседы с руководителем Семловского сельского округа, сотрудниками администрации Даниловского муниципального района, ответственными за бытовое водоснабжение и санитарию, руководством муниципальной водохозяйственной организации. Также в ходе исследований были изучены программные и плановые документы по организации и развитию систем коммунального водоснабжения на данной территории. Сведения о состоянии водоснабжения населения в 1976 г. были получены в ходе дополнительных интервью со старожилами этих населенных пунктов и в результате анализа документов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Численность населения обследованных населенных пунктов, постоянно проживающего и круглогодично потребляющего воду, в 1996 г. составляла 398 человек (что примерно на 30% меньше, чем в 1976 г.)⁶, из них 292 человека (73%) — в

пос. Семлово. При этом в летний сезон количество проживающих стабильно повышалось, приrost составлял около 80 человек (или 20% от общего количества проживающих); еще 150–200 человек приезжали сюда во время отпусков и в выходные дни. Был отмечен неравномерный характер сезонного увеличения количества проживающих (и потребляющих воду) в населенных пунктах: если в пос. Семлово и д. Тошаново численность водопользователей в летний период возрастала приблизительно на 20%, то в д. Ломки — в 4.9 раза, а в д. Беклюшки — в 7.9 раза. В 2019 г. численность постоянно проживающего населения в обследованных населенных пунктах составила 333 человека (что приблизительно на 16% ниже показателя 1996 г. и на 46% ниже показателя 1976 г.); в деревнях Беклюшки и Бякишево уже не осталось постоянных жителей, отмечено только временное летнее проживание; хутор Починок перестал существовать. В целом за рассматриваемый период в обследованных населенных пунктах сохранился характер проживания с сезонным увеличением бытового водопотребления.

Характеристика источников воды. Бытовое водоснабжение на обследованной территории традиционно осуществляется из подземных водонесных горизонтов, верховодки, поверхностных водотоков и водоемов (пруды в населенных пунктах, рр. Касть и Удисна), а также водой атмосферных осадков (дождь и снег). Используются следующие источники: 1) подземные скважины — глубокие (80–130 м, на артезианской воде), с подачей воды в централизованную водопроводную систему и неглубокие скважины (5–10 м, на верховодке); 2) колодцы — глубокие (более 5 м, на грунтовых водах) и неглубокие (3–5 м, на верховодке); 3) родники; 4) реки, ручьи и пруды; 5) приспособления для сбора дождевой воды с крыш, преимущественно в традиционных сельских домах. В ходе обследования 2019 г. наибольшее разнообразие источников воды отмечено в пос. Семлово (рис. 1). Выполненные расчеты⁷ показали, что в среднем на 1 км² рассматриваемой территории приходится 14.3 источника, а минимальное их количество равняется 5. Домохозяйства имеют воз-

⁶ Принято по динамике численности населения в Даниловском районе Ярославской области. <https://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения 31.01.2022).

⁷ В соответствии с принятой методикой (Уайт и др., 1990), теоретически возможные источники бытового водоснабжения определялись в радиусе 500 м вокруг населенных пунктов, поскольку на большее расстояние жители за водой не ходят. При этом учитывались все возможные источники водоснабжения, за исключением крыш домов, так как этот источник является сезонным, доступен практически всем и повсеместно используется как вспомогательный, даже при частичном оборудовании слива с крыши или его отсутствии. При наличии нескольких находящихся рядом колодцев или скважин, имеющих односторонний характер использования и находящихся в распоряжении одного хозяина, они рассматривались как единичный источник.

⁵ ГОСТ Р ИСО 14008-2019 Денежная оценка воздействия на окружающую среду и соответствующих экологических аспектов.

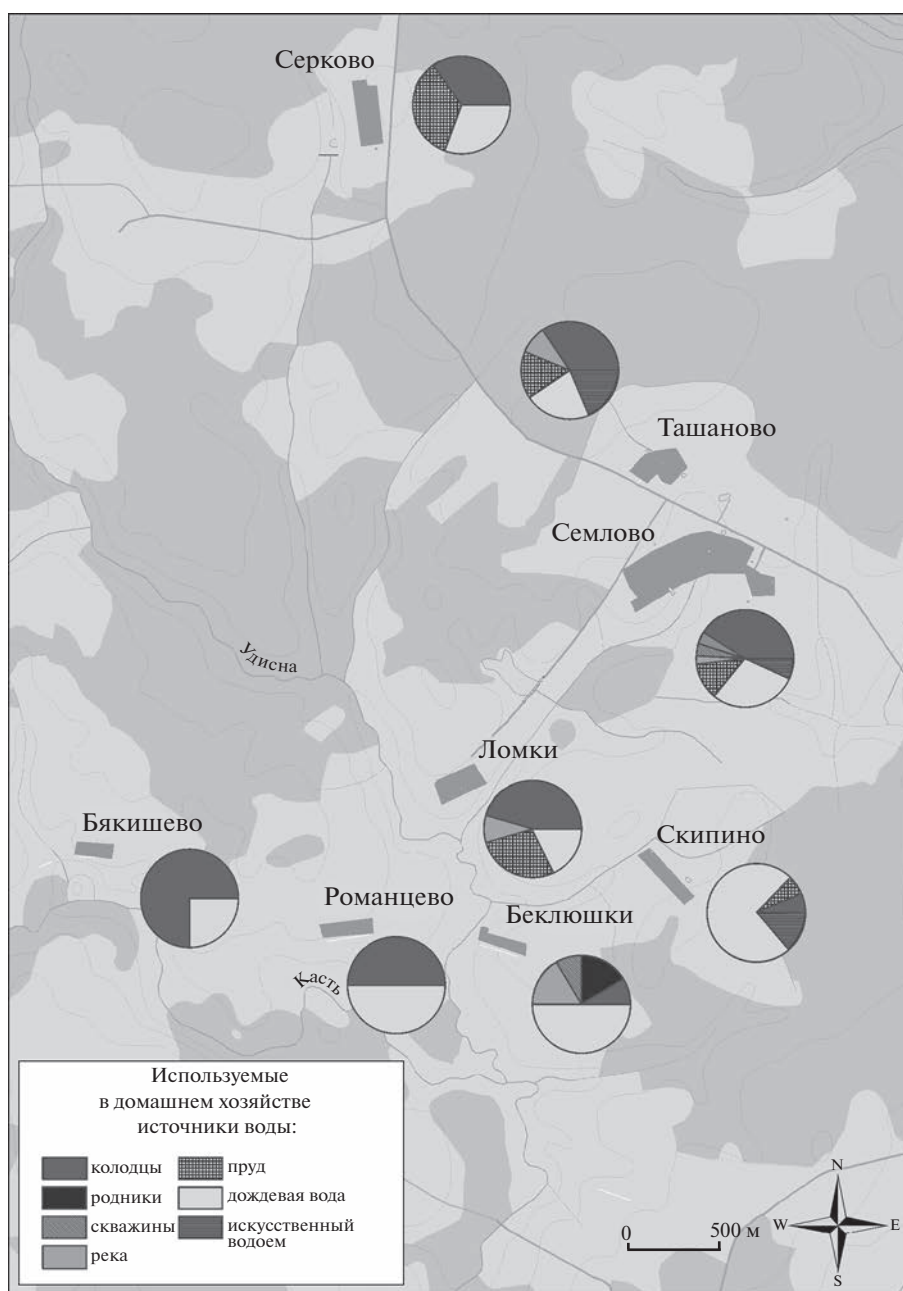


Рис. 1. Структура используемых источников воды домашними хозяйствами в 2019 г.

возможность выбора источников воды, руководствуясь различными целями ее использования (питье и приготовление пищи, стирка и уборка помещений, содержание скота, полив огорода, отдых и др.). Исключение составляет зона многоэтажной застройки в пос. Семлово, где люди, пользующиеся централизованным водопроводом, ограничены в использовании дополнительных источников воды (по техническим и экономическим причинам).

Однако износ сетей водоснабжения в целом по поселению составляет 30–80%. Ежегодно растет количество прорывов на сетях водоснабжения, что приводит к утечкам и неучтенному расходу

воды при транспортировке в системах водоснабжения. На территории поселения неучтенный расход достигает более 16% поданной в сеть воды. Износ водопроводных сетей постоянно увеличивается, в связи с чем требуется немедленная перекладка отдельных участков водопроводных сетей. Износ водозаборных сооружений составляет около 80% (Схема ..., 2018).

Изменения в количестве и состоянии основных источников бытового водоснабжения на обследованной территории за 1976–2019 гг. отражены в табл. 1.

Таблица 1. Изменение основных источников бытового водоснабжения на обследованной территории

№	Источник воды	Состояние и динамика			
		1976 г.	1996 г.	2019 г.	Характер динамики
1	Артезианские скважины с подачей воды в централизованный водопровод	—	Функционируют 5 артезианских скважин, из них 3 в пос. Семлово (для жителей двух многоэтажных домов и части домов сельского типа), по одной в дер. Ташаново (для населения) и дер. Семлово (для животноводческого комплекса). Централизованный водопровод в пос. Семлово; в деревнях Ташаново и Ломки водопровод отсутствует	Функционируют 2 артезианские скважины в пос. Семлово (износ 80%). Централизованный водопровод в пос. Семлово, износ от 30 до 80%, потери воды составляют до 20%. Низкий напор в сети, частые перебои в подаче воды	Неуклонно снижается надежность подачи воды в дома и ее качество, поскольку плата за воду не покрывает растущие издержки на эксплуатацию скважин и сетей
2	Подземные скважины неглубокие	—	Имеется 6 скважин, все в частной собственности у новых владельцев сельских домов	Имеется 11 скважин, все в частной собственности	Расширяются возможности жителей в получении доступной воды, однако низкого качества и с перебоями
3	Колодцы	Более 50, все глубокие, с питанием от подземных вод. Все в общественном пользовании	51 колодец, из них 29 колодцев (57%) в общественном пользовании, 22 колодца (43%) в собственности новых владельцев сельских домов. Частные колодцы все были в исправном состоянии. Среди общественных колодцев только половина находилась в исправном состоянии. Произошла замена заброшенных общественных глубоких колодцев на новые колодцы, но уже в частной собственности и неглубокие	64 колодца. Рост количества (на 25% к уровню 1996 г.) за счет новых частных колодцев, неглубоких (3–5 м). Количество исправных общественных колодцев (глубоких) сократилось на 3 штуки	Неуклонно изменяется тип питания колодцев (замена подземных водоносных горизонтов на верховодку). Постоянно снижается качество и надежность колодезного водоснабжения. В сухой сезон периодически (2–3 года из 10 лет) вода за счет поселковой администрации доставляется к домам цистернами; колодцы используются как резервуары для хранения воды
4	Родники	6 родников, все в общественном пользовании, в исправном состоянии	5 родников, из них 2 остались в общественном пользовании и эксплуатировались; 3 родника перешли в частное пользование и были в исправном состоянии; 1 родник был заброшен	Ситуация без изменений	Более половины родников — признанных лидеров по качеству воды перешло в частное пользование, с ограничением доступа

Таблица 1. Окончание

№	Источник воды	Состояние и динамика			
		1976 г.	1996 г.	2019 г.	Характер динамики
5	Пруды	27 прудов, все в общественном пользовании, существовал порядок раздельного пользования прудами для разных нужд – стирка белья и купание, полив огорода и содержание водоплавающей птицы	27 прудов, из них 18 (67%) в общественном пользовании, 9 прудов приватизированы новыми владельцами сельских домов, с прекращением общественного доступа	15 прудов, все в общественном пользовании, для отдыха местного населения и, реже, для хозяйственных нужд; пруды не пересыхают из-за подземного питания; вода в них грязная из-за отсутствия ухода. 12 прудов заросли и не используются	Уменьшение количества прудов, неотъемлемой составляющей деревенского ландшафта, и противопожарных водоемов – в результате отсутствия общественных усилий по их надлежащему содержанию
6	Реки и ручьи	9 источников, в общественном пользовании, для хозяйственных и рекреационных целей	Без изменений	Без изменений	Основной вопрос – обустройство и содержание приспособлений для доступа к воде (мостки, лавы и проч.) – решается частично за счет поселковой администрации, либо за счет платежеспособных новых владельцев сельских домов
7	Дождевая и талая вода	Используется повсеместно в домах сельского типа	Без изменений	Без изменений	Признана наиболее подходящей для стирки и бани благодаря низкому содержанию солей. Сельские дома и постройки оборудованы специальными устройствами для сбора дождевой воды

Анализ показал, что выявленные изменения в системе водопользования обусловлены произошедшими изменениями численности населения и характера проживания, когда на фоне общего снижения количества постоянных жителей в середине 1990-х годов активизировался процесс приобретения сельских домов (с приватизацией некоторых источников воды) городскими жителями, обладающими достаточными финансовыми средствами, преимущественно для сезонного проживания и отдыха. В связи с этим произошло изменение в собственности на источники воды, прежде всего колодцы и родники. Их переход из коллективного в частное пользование происходил спонтанно, неформальным порядком, при сочетании ряда факторов (например, сокращение числа пользователей, рост затрат на ремонт и поддержание, инициативы новых собственников земли и др.). Различное сочетание и степени влияния перечисленных факторов могут привести

либо к переходу родника в частное пользование, либо к его запустению.

Важную роль сыграла и трансформация сельскохозяйственной деятельности, когда в 1992 г. на смену совхозу “Рассвет”, который был владельцем и оператором сооружений и сетей централизованного водоснабжения, пришло коллективно-совместное предприятие, которое занимается только вопросами сельскохозяйственного производства. С тех пор все вопросы жизнеобеспечения местного населения перешли в компетенцию сельской поселковой администрации, весьма ограниченной в средствах, или стали решаться самими водопользователями.

Удовлетворенность качеством водоснабжения. По результатам опросов жителей населенных пунктов выявлена серьезная озабоченность качеством водоснабжения – более 40% респондентов,



Рис. 2. Результаты обобщения ответов домашних хозяйств на вопрос: “Довольны ли вы используемыми водоисточниками?” в 2019 г.

с существенной дифференциацией по населенным пунктам (рис. 2).

Согласно оценочным суждениям представителей домашних хозяйств относительно их пользования различными источниками воды, наивысшую оценку получили колодцы и родники, которые, как правило, дополняют или заменяют друг друга. Поверхностные водоемы также активно используются, в основном для хозяйственно-бытовых целей. Скважины получили самый низкий рейтинг.

В пос. Семлово жители, пользующиеся централизованным водопроводом, не удовлетворены качеством воды, даже несмотря на то, что согласно официальным данным удельный вес проб воды из централизованной системы водоснабжения поселка, которые не отвечают гигиеническим нормативам по санитарно-химическим показателям, составляет 0.1% и по микробиологическим показателям – 0.1% (Схема ..., 2018). На практике жители вынуждены пользоваться другими источниками (чаще всего колодцами) для получения

Таблица 2. Значимость факторов принятия решений при выборе источника воды или отказе от использования источника в представлениях жителей обследованных населенных пунктов, 2019 г., доля, %

Населенный пункт	Обоснование выбора				Обоснование отказа			
	К	Т	Э	В	К	Т	Э	В
пос. Семлово	25	27	44	4	9	37	24	30
д. Тошаново	23	28	49	—	5	53	25	17
д. Ломки	30	20	36	14	19	23	27	31
д. Беклюшки	28	32	38	2	20	21	8	51
д. Романцево	25	28	30	17	31	7	33	29
д. Бякишево	35	23	35	7	10	40	15	35
Всего (среднее)	28	26	39	7	16	30	22	32

Примечание. Буквами обозначены факторы — качество воды (К), технические возможности забора воды (Т), экономическая эффективность (Э), влияние других людей (В).

воды хорошего качества для питья или для пополнения запаса воды при перебоях в подаче воды в системе. Вода централизованного водопровода (из подземных водоносных горизонтов) характеризуется повышенной минерализацией и высоким содержанием железа. Это заставляет предпринимать превентивные меры по улучшению получаемой водопроводной воды: более 80% опрошенных кипятят воду, 30% — фильтруют, 48% — отстаивают, 40% — используют другие источники питьевой воды и употребляют другие жидкости для питья; 72% опрошенных предпринимают более одной меры.

Выбор источника воды. Важность выяснения мнений жителей относительно того, почему они выбирают тот или иной источник воды или отказываются от его использования, обусловлена тем, что сельские домашние хозяйства, в отличие от городских, имеют в своем распоряжении несколько источников воды. Опросы (в 1996 и 2019 гг.) были выполнены в соответствии с методикой Г. Уайта, по группе факторов, с дальнейшим расчетом суммарных рейтингов по принятым факторам, в пределах каждого населенного пункта (табл. 2).

“Качество воды” играет наиболее существенную роль при выборе источника воды. Особенно это касается воды для питья, когда вода из колодцев и тем более из родников считается предпочтительной. Респонденты в пос. Семлово говорили о том, что артезианская вода из водопровода не такая вкусная, как вода из колодца, она очень жесткая, содержит много железа (желтая и мутная) и ее необходимо фильтровать. При этом они хотели бы иметь водопроводную артезианскую воду для скота, подчеркивая, что за питьевой водой все равно лучше ходить на колодец или родник. Относительно низкий удельный вес фактора качества воды при отказе от вод источника может свидетельствовать о достаточно высоком качестве воды в целом.

“Технические возможности” забора воды занимают (как и влияние других людей) первое место среди причин отказа от использования источника и третье — среди причин выбора. Повсеместно жители указывали в основном на нехватку или периодическое отсутствие воды в мелких колодцах и неглубоких скважинах, а также на отсутствие специалистов и технической возможности для ремонта старых глубоких колодцев. Также в пос. Семлово среди причин назывались частые аварии на водопроводных сетях и сооружениях. Говорилось и о недостатке емкостей для сбора воды с крыш и об отсутствии возможности сделать дождевые сливы.

“Экономическая эффективность” играет ведущую роль при обосновании предпочтений в выборе источника. Наибольшее значение имеет близость источника к дому — приемлемость расстояния, на которое носят воду. В то же время при мотивировке отказа от источника данный фактор приводился гораздо реже, чем технические возможности и влияние других людей, что косвенно говорит о сохранении на селе скорее меновых, чем товарно-денежных отношений.

“Влияние других людей” наиболее значимо при отказе от пользования источником (наравне с техническими возможностями забора воды), при минимальном значении при объяснении предпочтений. Данный факт, по всей видимости, отражает скрытый конфликт в использовании источников воды между новыми владельцами сельских домов и коренными жителями, обостряющийся в летние засушливые сезоны. Многие местные жители, считая приезжих чужими, фактически не признают за ними равных прав в пользовании колодцами, особенно когда мало воды; слово “дачник” традиционно употребляется с неким отрицательным оттенком, даже несмотря на то, что именно сезонно приезжающие горожане, люди с иными представлениями о способах жизнеобеспечения, наиболее активно занимаются водо-

обеспечением — по собственной инициативе и за свой счет восстанавливают источники воды, но, как правило, уже для себя.

Особенности принятия муниципальными управлениями решений по организации сельского водоснабжения. Важность выяснения данного круга вопросов вызвана тем, что наряду с мнением местных жителей эффективность водоснабжения на селе в значительной мере зависит от тех решений, которые ежедневно принимают конкретные организации и специалисты в сфере муниципального управления и коммунального хозяйства. На основании изучения мнений ответственных специалистов и анализа плановых документов (Схема ..., 2018) было выявлено, что безусловный приоритет отдается вопросам надлежащей эксплуатации централизованной системы водопровода. Иные источники обеспечения водой домашних хозяйств подавляющего большинства сельских населенных пунктов фактически не рассматриваются. Решение проблем улучшения бытового водоснабжения на селе связывается исключительно с дополнительным финансированием из бюджета региона или со стороны федерального центра. Основное внимание уделяется строительству и ремонту существующих водопроводных сетей и артезианских скважин в поселках городского типа и крупных деревнях, развитие водоснабжения связывается с необходимостью строительства новых колодцев и даже новых систем водоснабжения. Для государственных и муниципальных служащих характерна ориентация на высокие показатели качества воды. Источники, в которых качество воды не соответствует действующим нормативам, вообще не рассматриваются. Налицо весьма сложная ситуация: с одной стороны, нацеленность исключительно на соблюдение нормативов качества воды заставляет строить скважины, установки доочистки, очистные сооружения и т.д., с другой стороны — экономическая ситуация в настоящее время не позволяет реализовать эти намерения. При этом относительно более дешевые и технически осуществимые мероприятия, которые реально могут улучшить бытовое водоснабжение на селе, практически не рассматриваются в программах развития, поскольку они не обеспечивают достижения высоких нормативов качества воды.

Социально-экономическая ценность воды для потребителей в бытовом водопользовании на селе. Выявлено, что вода на обследованной территории воспринимается преимущественно как общественное благо, а не как товар — только 10% жителей в 1996 г. и 12% в 2019 г. в ходе опросов высказали готовность платить, чтобы у них в доме была чистая питьевая вода. В основном это были жители пос. Семлово, проживающие в домах с системой централизованного водоснабжения и в какой-то степени разделяющие ценности, свой-

ственные городской социальной среде, где давно практикуется плата за услуги (в том числе и воду). В то же время практически все жители деревень говорили, что платить не будут вообще. Аргументация отказов сводилась к тому, что вода всегда была бесплатной и общей. Это подтверждает стойкость традиционного отношения сельских жителей Центральной России к воде как к общественно доступному, принадлежащему всем и поэтому бесплатному, общественному благу (Белобородова, 2001).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

За последние сорок лет на исследуемой территории усилился процесс индивидуализации водопользования и деградации источников коллективного водопользования в результате обезлюдения ряда деревень (в нашем случае, две деревни и хутор). Более чем половиной сельских домов владеют городские жители для сезонного (летнего) проживания, которые избегают коллективных действий совместно с местными жителями. Даже в поселке городского типа произошла замена части коренного сельского населения жителями городов. В ходе интервьюирования 1996 и 2019 гг. выявилось стойкое недоверие между постоянными жителями и приезжими. По словам и тех, и других, лучше иметь свой колодец, чем пользоваться общественным. В первую очередь это отразилось на поддержании в исправности глубоких общественных колодцев (20 и более метров), которые сегодня не функционируют. Другим следствием стала их массовая приватизация (см. табл. 1). Частные хозяева содержат их за свой счет и по своему усмотрению разрешают соседям ими пользоваться; иногда колодцы запираются на замки, что довольно необычно для деревень Центральной России.

Приоритетным стало строительство неглубоких (до 5 м) частных колодцев; они питаются верховодкой и значительно менее надежны по сравнению со старыми глубокими колодцами, которые достигают подземных водоносных горизонтов. Неглубокие колодцы часто пересыхают, и местные органы власти вынуждены развозить питьевую воду несколько раз в год. Можно сказать, что на хорошо обеспеченной водой территории сформировалось новое, ранее не практикуемое направление бюджетных расходов — централизованный развоз питьевой воды частным домохозяйствам. Другим значимым явлением следует назвать ситуацию, когда жители многоэтажных домов в пос. Семлово за качественной водой постоянно ходят на колодцы и родники из-за низкого качества водопроводной воды.

Тем не менее, как и 40 лет назад, системы централизованного водоснабжения (с подачей воды из глубоких подземных водоносных горизонтов)

до сих пор рассматриваются как наиболее надежные, прежде всего, с точки зрения соответствия качества воды санитарно-гигиеническим нормативам. В программных документах по организации сельского водоснабжения до сих пор преобладают технические решения, удобные для муниципальной водохозяйственной организации. Фактически не учитываются многофакторность выбора источника воды сельскими жителями, происходит их подмена интересами поставщика питьевой воды, как правило, монопольного на конкретной территории (местное предприятие ЖКХ). Так, в Схеме водоснабжения и водоотведения (пилотного) Даниловского СП Даниловского муниципального района Ярославской области в качестве основной ставится задача повышения эффективности муниципальных водохозяйственных служб по развитию и эксплуатации централизованных систем водоснабжения за счет увеличения финансирования из государственных бюджетов на постоянной основе (Схема ..., 2018). При этом игнорируются относительно дешевые и технически осуществимые мероприятия, которые реально могут улучшить ситуацию, например, строительство и содержание в общественном пользовании глубоких колодцев с гарантированной водой приемлемого качества, уход за родниками и др.

В стремлении управленцев сохранить существующие и создавать новые централизованные системы водоснабжения, несмотря на невозможность сделать их самокупаемыми и при ориентации исключительно на централизованные дотации в сфере сельского бытового водопотребления, сложилась ситуация “институционального запаздывания”, когда большинство формальных институтов (нормы, правила и т.п.) потеряли эффективность, а исторически сложившиеся неформальные институты (в первую очередь отношение к воде как к общественному благу и отказ воспринимать ее в качестве объекта частной собственности значительной частью населения) не учитывались в ходе законодательной деятельности (Фоменко, 2004). Это привело на практике к ухудшению условий водоснабжения и качества потребляемой воды.

Создание современной устойчивой модели сельского бытового водопотребления предполагает переход от использования простых систем к более сложным теориям, форматам и пространственным моделям, что невозможно без понимания разнообразия и многоаспектности проблем, с которыми сталкиваются люди, обеспечивая себя водой для бытовых целей и взаимодействуя между собой при их решении. Системы водопользования на сельских староосвоенных территориях Центральной России целесообразно воспринимать как исторически сложившиеся и саморазвивающиеся антропо-природные системы. Это предполагает внимание к эколого-социально-экономи-

ческим условиям, демографической ситуации и культурным традициям отношения сельских жителей к воде, а уже на основе этого — к техническим аспектам проектирования, эксплуатации, строительства и реконструкции водохозяйственных систем. Исторически сложившиеся практики природопользования, в том числе и водопотребления (тем более дополненные новыми адаптивными технологиями — *авт.*), часто оказываются более эффективными (Олстром, 2010). В этой связи повышается значение разработки комплексных природо-совместимых решений по обеспечению сельского населения водой надлежащего качества в каждой деревне и поселке.

Организация сельского бытового водопотребления с учетом возможности выбора источников воды предполагает изучение и понимание поведенческих аспектов принятия решений сельскими водопользователями, поскольку сельский житель в соответствии со своими разнообразными потребностями в воде различного качества (приготовление пищи, содержание домашнего скота, полив огорода, стирка и баня и т.д.) имеет возможность выбирать тот или иной источник воды либо отказываться от использования источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты многолетних наблюдений на пилотной территории показали, что, несмотря на высокую водообеспеченность, здесь сложилась эклектичная и неустойчивая система сельского бытового водопотребления, в которой причудливо переплетаются представления сельских жителей и управленцев, с одной стороны, унаследованные из советского периода, с доминированием коллективных хозяйств, а с другой стороны — связанные с начавшейся в 1990-х годах дачной экспансией горожан. Эта система характеризуется индивидуализацией и снижением роли коллективных усилий в содержании источников воды. Как следствие — реальное ухудшение условий водопользования, с преобладанием неглубоких колодцев и скважин, пересыхающих по несколько раз в год, и ухудшением качества централизованного водоснабжения в связи с хронической нехваткой финансирования ремонтов и нового строительства. Результатом стала парадоксальная ситуация, ненаблюдаемая ранее в истории этих мест, когда за счет местного бюджета стал привычным развоз воды в цистернах в засушливый период года. Муниципальные специалисты, ориентированные исключительно на соблюдение централизованно установленных нормативных требований, ориентируются исключительно на централизованные системы водоснабжения. На практике такие завышенные ожидания приводят к ухудшению ситуации, когда направление ограниченных ресурсов на единичные дорогостоящие

объекты оставляет без внимания многие простые и малозатратные меры.

Выход из сложившейся ситуации во многом зависит от географизации управления сельским бытовым водопользованием с ориентацией на реальные потребности людей в воде и их представления о возможных способах их удовлетворения на конкретной территории. Такой подход сочетает в себе рыночную основу бытового водоснабжения и передовые новейшие технологии, местные традиции водопользования и решения, обусловленные природными условиями. При разработке систем водопользования на селе целесообразно опираться на представления, ценности и культурный опыт водопользователей; учесть потребности, знания, практики, идентичность, убеждения и мировоззрения реальных потребителей воды. Решение подобной задачи связано с изучением проблем адаптации человека к различным географическим условиям.

ЗАЯВЛЕНИЕ ОБ ЭТИКЕ

Мы получили этическое одобрение от Департамента природопользования и охраны окружающей среды Ярославской области в 1996 и в 2019 г. на проведение полевых исследований и опрос жителей Семловской административной территории. Мы сообщили респондентам, что участие в опросе было полностью добровольным и что они вольны отказаться от предоставляемой нам информации в любое время без предоставления обоснования. Данное исследование одобрено административным органом Семловского сельского округа.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проект 96-02-02108) (1996 г.) и Научно-производственного объединения “Институт устойчивых инноваций” (2019 г.).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность всем жителям обследованных населенных пунктов, которые внесли существенный вклад в наше понимание исследуемой ситуации, ее эволюции в течение 40-летнего периода истории российской деревни. В проведении опросов и уточнении данных об использовании источников воды неоценимую помощь оказали учителя Семловской средней школы и ее директор Н.В. Головяшкина. Организационно и информационно поддерживали работы Л.С. Лошадкина и А.В. Лошадкин, а также В.П. Каблукова и Е.Г. Максименко. Результаты исследований были бы неполными без участия органов муниципального управления, в первую очередь

Л.Н. Кузьминой и А.В. Иваницкого, руководителей и сотрудников служб коммунального хозяйства, охраны окружающей среды, санитарии и эпидемиологии.

FUNDING

The article was prepared with the financial support of the Russian Humanitarian Scientific Foundation (project 96-02-02108) (1996) and the Group of Companies Institute of Sustainable Innovation (2019).

ACKNOWLEDGMENTS

The authors express their deep gratitude to all the residents of the surveyed settlements, who, with their stories about the daily water use in their households and their memories of past experiences, made a significant contribution to our understanding of the situation under study and its evolution over the fairly long 40-year period of history of Russian rural areas. Teachers at the Semlovo Secondary School and the headmaster Golovyashkina N. provided invaluable assistance in conducting surveys and in clarifying certain special data regarding the availability and use of water sources. L. Loshadkina and A. Loshadkin, V. Kablukova and E. Maksimenko provided organizational and informational support for this work. The research results would have been incomplete without the positive participation of municipal authorities (first and foremost L. Kuzmina and A. Ivanitskiy), the heads and employees of the public utilities, the environmental protection agencies, the sanitary services, and activists from public organizations.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабина Ю.В., Кочуров Б.И.* Проблемы защиты поверхностных водных объектов в контексте земельных отношений на юге России // Юг России: экология, развитие. 2021. Т. 16. № 3. С. 180–190. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-3-180-190>
- Белобородова И.Н.* Традиции жизнеобеспечения: пространственно-временной аспект // Социокультурная методология охраны окружающей среды: Тематический сб. / под ред. Г.А. Фоменко. Ярославль, 2001. 152 с.
- Бобылев С.Н., Горячева А.А.* Идентификация и оценка экосистемных услуг: международный контекст // Вестн. международных организаций: образование, наука, новая экономика. 2019. № 1. С. 225–236. <https://doi.org/10.17323/1996-7845-2019-01-13>
- Государственный доклад “О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2018 году” / Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. 2019.
- Демин А.П.* Современные проблемы водообеспечения сельского хозяйства России // Природообустройство. 2008. № 2. С. 37–44.
- Ишмуратов Б.М., Шагжиев К.Ш.* Истоки глобального кризиса и проблемы жизнеобеспечения человечества // Вестн. Бурят. гос. ун-та. Биология. География. 2018. № 1. С. 62–71.

- Капогузов Е.А., Быкова К.Г. Государственно-частное партнерство как объект институционального анализа: к вопросу о систематизации формальных институтов // J. Inst. Stud. 2014. Т. 6. № 3. С. 132–145.
- Колосовский Н.Н. Избранные труды. Смоленск: Ойкумена, 2006. 336 с.
- Корытный Л.М., Гагаринова О.В., Ильичева Е.А., Кичигина Н.В. Развитие сибирской ландшафтно-гидрологической школы // Водное хозяйство России. 2018. № 4. С. 92–106.
- Лошадкин К.А. Водоснабжение сельского населения в условиях трансформации геоэкономического пространства. Ярославль: НПП “Кадастр”, 2001. 164 с.
- Макконнелл К.Р., Брю С.Л. Экономика: принципы, проблемы и политика. М.: Республика, 1992. Т. 1. 399 с.
- Малышева А.В., Козина Л.Н. О проблемах сельского водоснабжения и путях их решения // Вестн. НГИЭИ. 2015. № 6 (49).
- Никульников Ю.С. Эколого-географические основы оценки хозяйственной освоенности территории // География освоения ресурсов Сибири. Новосибирск: Наука, 1979. С. 3–10.
- Перелет Р.А. Дефицит водных ресурсов и экономика водоеффективности // География и экология в школе XXI века. 2013. № 10. С. 7–22.
- Перелет Р.А. Приватизируем воду или водоснабжение и водоотведение? // Экология промышленности. 2013. № 8. С. 27–33.
- Пуляркин В.А. Локальные цивилизации во времени и пространстве (взгляд географа). М.: Эслан, 2005. 536 с.
- Схема водоснабжения и водоотведения Середского сельского поселения Даниловского муниципального района Ярославской области. Актуализация на 2018 год. Иваново, 2018. 70 с.
- Уайт Г., Уайт Э., Бредли Д. Бытовое водоснабжение в Восточной Африке / Уайт Г. География, ресурсы и окружающая среда. Избр. статьи: пер. с англ. М.: Прогресс, 1990. С. 352–381.
- Фоменко Г.А. Управление природоохранной деятельностью: Основы социокультурной методологии. М.: Наука, 2004. 390 с.
- Фоменко Г.А. Устойчивый экосистемный дизайн: предпосылки и подходы. Ярославль: АНО НИПИ “Кадастр”, 2021. 216 с.
- Фоменко Г.А., Фоменко М.А. Денежные оценки ресурсов окружающей среды на микроуровне для управления региональным развитием // Полюса и центры роста в региональном развитии: Сб. статей / под ред. Ю.Г. Липеца. М., 1998. С. 117–122.
- Фоменко Г.А., Фоменко М.А. Особенности обеспечения питьевой водой сельского населения Ярославской области в современных условиях // Изв. РАН. Сер. геогр. 1999. № 5. С. 55–60.
- Фоменко Г.А., Фоменко М.А. Экономический транзит и охрана природы: социокультурные аспекты. Ярославль: Научно-исследовательский проектный институт “Кадастр”, 2016. 313 с.
- Фролова Т.А. “Ловушка низкого уровня доходов” и роль государства на пути выхода из нее // Рос. экон. интернет-журн. 2006. № 4.
- Balasubramaniam D., Chatterjee S., Mustard D. Got water? Social divisions and access to public goods in rural India // Economica. 2011. № 81. P. 140–160. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1365393>
- Baldwin G.B. Why present value calculations should not be used in choosing rural water supply technology // World Development. 1983. Vol. 11. № 12. P. 1075–1081.
- Core questions on Drinking water and Sanitation for households surveys / World Health Organization and UNICEF. 2006. 24 p.
- Gazzinelli A., Souza M., Nascimento I., Cadete I., Kloos H. Domestic water use in a rural village in Minas Gerais, Brazil, with an emphasis on spatial patterns, sharing of water, and factors in water use // Cad. Saúde Pública. 1998. Vol. 14. № 2. <https://doi.org/10.1590/s0102-311x1998000200003>
- Gold J. An introduction to behavioural geography. Oxford Univ. Press Publ., 1980. 290 p.
- Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum / WHO. Geneva, 2017. 541 p.
- Guidelines for drinking-water quality. Vol. 1: Recommendations. 2nd ed. / WHO. Geneva, 1993. 179 p.
- Guidelines for Safe Recreational Water Environments. Vol. 1: Coastal and Freshwaters / WHO. Geneva, 2003. 219 p.
- Hutton G. Editorial: Can we meet the costs of achieving safely managed drinking water, sanitation and hygiene services under the new sustainable development goals? // J. Water, Sanitation Hygiene Development. 2016. № 6. P. 191–194. <https://doi.org/10.2166/washdev.2016.037>
- Irianti S., Prasetyoputra P., Saputro F., Sasimartoyo T. A review of access, safety, and use of drinking-water from various sources in Indonesia (Unpublished Report). Jakarta: National Inst. of Health Research and Development, Ministry of Health, Republic of Indonesia, 2014.
- JMP Methodology: 2017 Update & SDG Baselines / WHO, UNICEF. 2018. 23 p.
- Kativhu T. An analysis of sustainability of communally-managed rural water supply systems in Zimbabwe. Univ. of the Western Cape, 2016. 262 p.
- Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Zaitseva I.S. Assessment of Modern Water Consumption in the World and on Continents and Its Impact on the Annual River Runoff // Herald Russ. Acad. Sci. 2022. Vol. 92. № 2. С. 199–206. <https://doi.org/10.1134/S1019331622020034>
- Lund J.R. Integrating social and physical sciences in water management // Wat. Resour. Res. 2015. Vol. 51. P. 5905–5918. <https://doi.org/10.1002/2015WR017125>
- McKee M., Balabanova D., Akingbade K., Pomerleau J., Stickley A., Rose R., Haerpfer C. Access to water in the countries of the former Soviet Union // Public Health. 2006. № 120 (4). P. 364–372. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2005.05.013>
- Omarova A., Tussupova K., Hjorth P., Kalishev M., Dosmagambetova R. Water Supply Challenges in Rural Areas: A

- Case Study from Central Kazakhstan // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2019. № 16 (5). P. 688. <https://doi.org/10.3390/ijerph16050688>
- Ostrom E. Beyond Markets and States: Polycentric Governance of Complex Economic Systems // *Transnational Corporations Rev.* 2010. № 2. P. 1–12.
- Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene – 2017. Update and SDG Baselines / WHO, UNICEF. Geneva: WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, 2017. 57 p.
- Progress towards the Sustainable Development Goals. Report of the Secretary-General. E/2017/66 / United Nations. 2017. 19 p.
- Roberts B. et al. Changes in household access to water in countries of the former Soviet Union // *J. Public Health*. 2012. № 34 (3). P. 352–359. <https://doi.org/10.1093/pubmed/fdr115>
- Sridhar M.K.C., Okareh O.T., Mustapha M. Assessment of Knowledge, Attitudes, and Practices on Water, Sanitation, and Hygiene in Some Selected LGAs in Kaduna State, Northwestern Nigeria // *J. Environ. Public Health*. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6532512>
- Thompson J., Porras I., Katui-Katua M., Mujwahuzi M., Tumwine J. Drawers of Water II: assessing change in domestic water use in East Africa // *Practical Action Publ.* 2003. Vol. 22. № 1. P. 22–25. doi . 00927.x <https://doi.org/10.1046/j.1365-3156.2002>
- Water, Sanitation and Hygiene: Transforming the Regional Agenda towards Equitable Access to Safe and Sustainable Services / WHO. Copenhagen: World Health Organization, 2017.
- White G., Bradley D., White A. Drawers of water: domestic water use in East Africa. Chicago: Univ. of Chicago Press, 1972. 306 p.

Long-Term Dynamics of Rural Household Water Use (the Case of Semlovsky Rural Settlement, Yaroslavl Oblast)

G. A. Fomenko^{1, 2, *}, M. A. Fomenko^{3, **}, and K. A. Loshadkin^{2, 3, ***}

¹Group of Companies Institute for Sustainable Innovation, Yaroslavl, Russia

²Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

³Autonomous Non-Commercial Research and Development Institute “Cadaster,” Yaroslavl, Russia

*e-mail: info@npo-kad.ru

**e-mail: fomenkoma@rcs-cad.com

***e-mail: loshadkinka@rcs-cad.com

The article proves the necessity to change approaches to the development of water output system in rural settlements by improving the quality of forecast of expected changes in rural water use. The study is based on the evolution of behavioral preferences of rural households on the case of the pilot Semlovsky rural settlement of Danilovsky district of Yaroslavl oblast. This research was inspired by the logic and beauty of the methodology of studying rural water use by the outstanding geographer Gilbert White which is based on the approaches of behavioral and evolutionary geography. Through interviews and semi-structured surveys from 1976 to 2019, the study examined how rural residents provide water for themselves, choose their source of water output, and how they really value water as an economic good. The perceptions of managers in the sphere of domestic water output were also investigated and planning documents were analyzed. The study of the evolution of rural domestic water use for more than 40 years revealed the peculiarities of source selection depending on water quality, economic and technical capabilities of residents, and socio-cultural traditions. It has been established that focusing on centralized water supply, to comply with water quality standards for the population, can have the adverse effect, when the users choose a cheaper water source which is reliable and has a poorer water quality. In practical terms, the article shows it's reasonable to apply an integrated approach to developing rural water output strategies, taking into account the adaptability of water users to different geographical conditions. It also reveals ways of including behavioral features of water use in rural areas in project and planning documents.

Keywords: water use, behavioral geography, evolutionary geography, sustainable development, rural households, water output source

REFERENCES

- Babina Yu.V., Kochurov B.I. Problems of protection of surface water bodies in the context of land relations in the South of Russia. *Yug Rossii: Ekologiya, Razvitiye*, 2021, vol. 16, no. 3, pp. 180–190. (In Russ.). <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-3-180-190>
- Balasubramaniam D., Chatterjee S., Mustard D. Got water? Social divisions and access to public goods in rural India. *Economica*, 2011, no. 81, pp. 140–160. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1365393>
- Baldwin G.B. Why present value calculations should not be used in choosing rural water supply technology. *World Development*, 1983, vol. 11, no. 12, pp. 1075–1081.

- Beloborodova I.N. Traditions of Life Support: Spatio-Temporal Aspect. In *Sotsiokul'turnaya metodologiya okhrany okruzhayushchei sredy* [Sociocultural Environmental Protection Methodology]. Fomenko G.A., Ed. Yaroslavl', 2001. 152 p.
- Bobylev S.N., Goryacheva A.A. Identification and assessment of ecosystem services: an international context. *Vestn. Mezhdunarodnykh Organizatsii: Obrazovanie, Nauka, Novaya Ekonomika*, 2019, no. 1, pp. 225–236. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17323/1996-7845-2019-01-13>
- Core questions on Drinking water and Sanitation for households surveys. World Health Organization and UNICEF, 2006. 24 p.
- Demin A.P. Modern problems of water supply of agriculture in Russia. *Prirodoobustroistvo*, 2008, no. 2, pp. 37–44. (In Russ.).
- Fomenko G.A. *Upravlenie prirodookhrannoi deyatel'nost'yu: Osnovy sotsiokul'turnoi metodologii* [Environmental Management: Fundamentals of Socio-Cultural Methodology]. Moscow: Nauka Publ., 2004. 390 p.
- Fomenko G.A. *Ustoichivyy ekosistemnyi dizain: predposylki i podkhody* [Sustainable Ecosystem Design: Background and Approaches]. Yaroslavl': Autonomous Non-Commercial Research and Development Institute "Cadaster" Publ., 2021. 216 p.
- Fomenko G.A., Fomenko M.A. Monetary assessments of environmental resources at the micro level for managing regional development. In *Polyusa i Tsentry Rosta v Regional'nom Razvitii* [Poles and Centers of Growth in Regional Development]. Lipets Yu.G., Ed. Moscow, 1998, pp. 117–122. (In Russ.).
- Fomenko G.A., Fomenko M.A. Peculiarities of providing drinking water to the rural population of the Yaroslavl region in modern conditions. *Izv. Akad. Nauk., Ser. Geogr.*, 1999, no. 5, pp. 55–60. (In Russ.).
- Fomenko G.A., Fomenko M.A. *Ekonomicheskii tranzit i okhrana prirody: sotsiokul'turnye aspekty* [Economic Transition and Environmental Protection: Socio-Cultural Aspects]. Yaroslavl: The Cadaster Research and Designing Institute Publ., 2016. 313 p.
- Frolova T.A. The low-income trap and the role of the state on the way out of it. *Ross. Ekon. Internet-Zh.*, 2006, no. 4. (In Russ.).
- Gazzinelli A., Souza M., Nascimento I., Cadete I., and Kloos H. Domestic water use in a rural village in Minas Gerais, Brazil, with an emphasis on spatial patterns, sharing of water, and factors in water use. *Cad. Saúde Pública*, 1998, vol. 14, no. 2.
<https://doi.org/10.1590/s0102-311x1998000200003>
- Gold J. *An introduction to behavioural geography*. Oxford University Press Publ., 1980. 290 p.
- Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii sanitarno-epidemiologicheskogo blagopoluchiya naseleniya v Rossiiskoi Federatsii v 2018 godu" [State report On the State of Sanitary and Epidemiological Welfare of the Population in the Russian Federation in 2018]. Federal Service for the Oversight of Consumer Protection and Welfare, 2019.
- Guidelines for drinking-water quality*. Vol. 1: Recommendations. 2nd edition. Geneva: WHO, 1993. 179 p.
- Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum*. Geneva: WHO, 2017. 541 p.
- Guidelines for Safe Recreational Water Environments*. Vol. 1: Coastal and Freshwaters. Geneva: WHO, 2003. 219 p.
- Hutton G. Editorial: Can we meet the costs of achieving safely managed drinking water, sanitation and hygiene services under the new sustainable development goals? *J. Water Sanit. Hyg. Dev.*, 2016, no. 6, pp. 191–194.
<https://doi.org/10.2166/washdev.2016.037>
- Irianti S., Prasetyoputra P., Saputro F., Sasimartoyo T. *A review of access, safety, and use of drinking-water from various sources in Indonesia*. (Unpublished Report). Jakarta: National Institute of Health Research and Development, Ministry of Health, Republic of Indonesia, 2014.
- Ishmuratov B.M., Shagzhiev K.Sh. The origins of the global crisis and the problems of human life support. *Vestn. Buryat. Gos. Univ. Biol. Geogr.*, 2018, no. 1, pp. 62–71. (In Russ.).
- JMP Methodology: 2017 Update & SDG Baselines*. WHO, UNICEF, 2018. 23 p.
- Kapoguzov E.A., Bykova K.G. Public-private partnership as an object of institutional analysis: on the issue of systematization of formal institutions. *J. Institutional Studies*, 2014, vol. 6, no. 3, pp. 132–145. (In Russ.).
- Kativhu T. *An analysis of sustainability of communally-managed rural water supply systems in Zimbabwe*. University of the Western Cape, 2016. 262 p.
- Kolosovskii N.N. *Izbrannye trudy* [Selected Writings]. Smolensk: Oikumena Publ., 2006. 336 p.
- Koronkevich N.I., Barabanova E.A. and Zaitseva I.S. Assessment of Modern Water Consumption in the World and on Continents and Its Impact on the Annual River Runoff. *Herald Russ. Acad. Sci.*, 2022, vol. 92, no. 2, pp. 199–206.
<https://doi.org/10.1134/S1019331622020034>
- Korytnyi L.M., Gagarinova O.V., Il'icheva E.A., Kichigina N.V. Development of the Siberian landscape and hydrological school. *Vodn. Khozyaistvo Rossii*, 2018, no. 4, pp. 92–106. (In Russ.).
- Loshadkin K.A. *Vodosnabzhenie sel'skogo naseleniya v usloviyakh transformatsii geoekonomicheskogo prostranstva* [Water Supply of the Rural Population in the Context of the Transformation of the Geo-economic Space]. Yaroslavl': NPP "Cadaster", 2001. 164 p.
- Lund J.R. Integrating social and physical sciences in water management. *Water Resour. Res.*, 2015, vol. 51, pp. 5905–5918.
<https://doi.org/10.1002/2015WR017125>
- Makkonel K.R., Bryu S.L. *Ekonomika: printsipy, problem i politika* [Economics: Principles, Problems and Politics]. Vol. 1. Moscow: Republic Publ., 1992. 399 p. (In Russ.).
- Malysheva A.V. and Kozina L.N. On the problems of rural water supply and ways to solve them. *Vestn. NGIEI*, 2015, no. 6 (49). (In Russ.).
- McKee M., Balabanova D., Akingbade K., Pomerleau J., Stickley A., Rose R., and Haerper C. Access to water in the countries of the former Soviet Union. *Public Health*, 2006, no. 120 (4), pp. 364–372.
<https://doi.org/10.1016/j.puhe.2005.05.013>
- Nikul'nikov Yu.S. Ecological and geographical bases of assessment of economic development of the territory. In *Geografiya osvoeniya resursov Sibiri* [Geography of De-

- velopment of Siberian Resources]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1979, pp. 3–10. (In Russ.).
- Omarova A., Tussupova K., Hjorth P., Kalishev M., and Dosmagambetova R. Water Supply Challenges in Rural Areas: A Case Study from Central Kazakhstan. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2019, no. 16 (5), 688 p. <https://doi.org/10.3390/ijerph16050688>
- Ostrom E. Beyond Markets and States: Polycentric Governance of Complex Economic Systems. *Transnational Corporations Review*, 2010, no. 2, pp. 1–12.
- Perelet R.A. Water scarcity and the economics of water efficiency. *Geogr. Ekologiya v Shkole XXI veka*, 2013, no. 10, pp. 7–22. (In Russ.).
- Perelet R.A. Privatize water or water supply and sanitation? *Ekologiya Promyshlennosti*, 2013, no. 8, pp. 27–33. (In Russ.).
- Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene – 2017. Update and SDG Baselines*. WHO, UNICEF. Geneva: WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, 2017. 57 p.
- Progress towards the Sustainable Development Goals*. Report of the Secretary-General. E/2017/66. United Nations, 2017. 19 p.
- Pulyarkin V.A. *Lokal'nye tsivilizatsii vo vremeni i prostranstve (vzglyad geografa)* [Local Civilizations in Time and Space (Geographer's View)]. Moscow: Eslan Publ., 2005. 536 p.
- Roberts B. et al. Changes in household access to water in countries of the former Soviet Union. *J. Public Health*, 2012, no. 34 (3), pp. 352–359. <https://doi.org/10.1093/pubmed/fdr115>
- Skhema vodosnabzheniya i vodootvedeniya Seredskogo sel'skogo poseleniya Danilovskogo munitsipal'nogo raiona Yaroslavskoi oblasti. Aktualizatsiya na 2018 god* [Scheme of Water Supply and Sanitation of the Seredsky Rural Settlement of the Danilovsky Municipal District of the Yaroslavl Oblast. Update for 2018]. Ivanovo, 2018. 70 p.
- Sridhar M.K.C., Okareh O.T., Mustapha M. Assessment of Knowledge, Attitudes, and Practices on Water, Sanitation, and Hygiene in Some Selected LGAs in Kaduna State, Northwestern Nigeria. *J. Envir. Public Health*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6532512>
- Thompson J., Porras I., Katui-Katua M., Mujwahuzi M., and Tumwine J. Drawers of Water II: assessing change in domestic water use in East Africa. *Practical Action Publ.*, 2003, vol. 22, no. 1, pp. 22–25. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3156.2002.00927.x>
- Water, Sanitation and Hygiene: Transforming the Regional Agenda towards Equitable Access to Safe and Sustainable Services*. Copenhagen: World Health Organization, 2017.
- White G., Bradley D., and White A. *Drawers of Water: Domestic Water Use in East Africa*. Chicago: University of Chicago Press, 1972. 306 p.
- White G., White A., Bradley D. Domestic water use in East Africa. *Geografiya, resursy i okruzhayushchaya sreda*. Selected articles: transl. from English. Moscow: Progress Publ., 1990, pp. 352–381. (In Russ.).

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 379.85

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ТУРИЗМА ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ В КОНТЕКСТЕ КОНЦЕПЦИИ ЦЕНТР–ПЕРИФЕРИЯ

© 2023 г. М. В. Гудковских^а, *, Д. А. Дирина^а

^аТюменский государственный университет, Тюмень, Россия

*e-mail: m.v.gudkovskikh@utmn.ru

Поступила в редакцию 31.08.2021 г.

После доработки 05.09.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

Статья посвящена анализу пространственной структуры туристского хозяйства в Тюменской области. Теоретико-методологической основой анализа выступает концепция центр–периферия. Развитие внутреннего туристского рынка признано одним из важнейших приоритетов региональной экономики Тюменской области. В этой связи актуальной задачей является выявление закономерностей пространственной организации туризма как центр–периферической системы, в которой выделяются разные по своим функциям и статусу зоны. Выявление и изучение данных закономерностей имеет не только и не столько научно-теоретическое, сколько прикладное значение. Полная и достоверная информация такого типа является неременной основой для рационального территориального планирования развития туристской инфраструктуры; принятия эффективных управленческих решений в сфере туризма; залогом успешной инвестиционной политики. В исследовании применяется метод кластерного анализа (через правила одиночной и полной связи, взвешенного попарного среднего, взвешенного центроидного методов и метода Варда) для вычленения групп муниципальных образований, схожих по набору переменных, отражающих инфраструктурную обеспеченность и культурно-исторический потенциал территории. Такой подход гарантирует адекватную сегментацию туристского пространства региона на региональный центр, концентрирующий максимальное количество и разнообразие туристских ресурсов и, соответственно, наиболее разноплановые виды туристской активности; вторые центры, фиксирующиеся по повышенным показателям туристского потенциала с явно выделяющимися отраслями специализации. Полупериферия туристского пространства области определяется как наиболее перспективная и имеющая экономический, природно-культурный и инфраструктурный потенциал для роста туристских прибытий, где должны концентрироваться максимальные усилия региональных властей в поддержке туристской отрасли. Периферийные районы чрезвычайно слабо оснащены туристской и сопутствующей инфраструктурой, характеризуются внутренней неоднородностью в развитии туризма, имеют единичные дестинации с транспортной изолированностью. При этом туризм для них является средством преодоления экономической отсталости, но находится в зоне рискованного предпринимательства. Результаты исследования позволяют совершенствовать научное и практическое содержание туристского районирования и территориального планирования туристской отрасли Тюменской области.

Ключевые слова: центр–периферия, пространственная организация туризма, кластерный анализ, Тюменская область, туристско-рекреационный потенциал

DOI: 10.31857/S2587556623010077, EDN: LGHQQS

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современных ограничительных ре-
алий развития внешнего туризма внутренний ту-
ризм в России набирает обороты. В этой связи ту-
ристско-рекреационная деятельность постепенно
включается в приоритетные направления соци-
ально-экономического развития многих регионов
страны. Не стала исключением и Тюменская об-
ласть, не относящаяся к числу традиционных ту-
ристских регионов России. В Стратегии соци-
ально-экономического развития Тюменской об-

ласти до 2030 г. туристско-рекреационная
деятельность признана одной из перспективных
отраслей региональной экономики. И надо при-
знать, правительство области делает немало для
развития этой отрасли. При этом первостепенное
значение для эффективного развития туризма,
отдыха и оздоровления в регионе имеет изучение
закономерностей пространственной организа-
ции туризма и туристско-рекреационного потен-
циала. Это необходимо для научно-обоснованно-
го территориального планирования и решения

сугубо практических задач экологического, экономического и социального характера, неизбежно возникающих в формирующихся туристских дестинациях.

Рассмотрение развития туризма в регионе с позиции центр-периферической модели не только констатирует разделение пространства на структурные элементы, но и позволяет конструктивно оценить перспективы развития выделенных центров и периферийных зон. Каждый структурный элемент центр-периферийной системы имеет свои закономерности развития, которые необходимо учитывать при территориальном планировании, однако не всегда просто однозначно определить границы центров, периферии и полупериферии в конкретном регионе. Одним из распространенных методов дифференциации явлений по заданным признакам выступает кластерный анализ, он широко применяется на глобальном, страновом, макрорегиональном уровнях и позволяет обоснованно провести границы структурных элементов центр-периферийной модели.

Целью данного исследования является выявление закономерностей пространственной организации туризма в Тюменской области. В качестве теоретико-методологической основы для достижения данной цели была принята концепция центр-периферия. Основными задачами выступали теоретико-методологический анализ концепции, дифференциация туристского пространства методом кластерного анализа и сегментация территории на элементы центр-периферической системы.

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

Зародившаяся в рамках классической геополитики центр-периферическая концепция дифференциации мирового пространства с середины XX в. все чаще стала использоваться географами и экономистами при анализе закономерностей пространственной организации общества. Американский географ Дж. Фридман, разработавший общую теорию регионального развития на базе модели центр-периферия на примере Венесуэлы, показал, что неравномерность экономического роста и процессы пространственной поляризации непременно приводят к разрыву между центром и периферией. Центру (ядру) соответствует несоразмерно меньшая территория, генерирующая наиболее прогрессивные современные достижения, центр распространяет импульсы развития разнообразных отраслей. Периферия подразделяется на ближнюю, тесно связанную с ядром и более развитую, и дальнюю, в которой практически не ощущается связь и мобилизующее влияние центра (Friedmann, 1966).

Центр и периферия непрерывно связаны потоками информации, капитала, товаров, рабочей силы и др. Качественная трансформация центра обеспечивает постоянное развитие системы центр-периферия за счет генерирования и внедрения новшеств. Основные закономерности в развитии центра проявляются в стабильности его доминирования через поддержку инновационной деятельности, которая, в свою очередь, обеспечивает доступ к информации, возможностям для многочисленных контактов, что порождает обилие сопутствующих благоприятных условий для развития (сервисные, рыночные, организационные и др.). Более того, центр систематически изымает разнообразные ресурсы из периферии, тем самым усиливаются различия и ослабевает рост и развитие периферии (Грицай и др., 1991).

И. Валлерстайн (2001) дополнил классическую модель мировой системы понятием полупериферии как наиболее динамичного промежуточного звена между центром и периферией, сочетающего черты обоих. В полупериферии происходит эксплуатация ядра (центра), но задействуется и периферия; таким образом, полупериферия служит стабилизирующим элементом, обеспечивающим гибкость и эластичность общественных систем. Свою теорию И. Валлерстайн распространял на пространственную структуру мирового хозяйства в политических и экономических процессах, однако считал, что трехзвенная структура характерна для всех полярных категорий (политические партии, социальная структура общества и др.).

В.Л. Каганский, развивая теорию культурного ландшафта, предложил четырехчленную центр-периферическую модель. В ней он выделил следующие пространственно-статусные зоны: центр-провинция-периферия-граница. Он объясняет их функциональные различия: «Центр интегрирует систему изнутри. Граница очерчивает ее извне. Центр и граница, полярные позиционно-функциональные края, конкретизируют систему... Система без центра внутренне неопределенна, задана извне («колония»); без провинции — аморфная масса, сжатая центром и границей; без периферии — лишена гибкости, запаса возможностей; система без границы недоопределенна» (Каганский, 1998, с. 74–75).

В настоящее время концепция центр-периферия общепризнана мировым научным сообществом как эффективный инструмент изучения пространственной организации различных (прежде всего общественных) явлений. Сформировалась методическая база, позволяющая диагностировать центр-периферические системы на разных пространственных уровнях (в разных масштабах) (Rezani, 2001; Taylor et al., 2002; Wu et al., 2001; и др.).

Территориальная структура мирового туризма в общих чертах совпадает с географией мирового хо-

зяйства, здесь идентично можно вычленить три основные пространственно-статусные зоны (центр, полупериферия и периферия), отличающиеся уровнем экономического развития, ролью и специализацией. Они связаны между собой потоками туристов и факторами производства туристского продукта. С центрами отождествляется генерирование так называемых инноваций (нововведений) туристского продукта, а местом их распространения выступает периферия (Кружалин В., Кружалин К., 2010).

Французский географ Е. Гормсен подтвердил своими исследованиями пространственной структуры приморского туризма существование центро-периферической неоднородности в мировой туристской системе, в которой периферийные зоны получают толчок к развитию извне, с прибытием иностранных туристов из центра. Кроме того, главным положением является тот факт, что периферия не отличается однородностью: ближняя периферия, более тесно связанная (территориально) с центром, отличается опережающим развитием расчетных показателей при слабом влиянии центра на дальнюю периферию (Gormsen, 1997).

Базовые теоретические модели пространственной структуры туризма затрагиваются в зарубежных исследованиях (Husbands, 1981; Keller, 1983; Mowforth and Munt, 2015).

Современную пространственную структуру глобального туристского пространства установила А.Ю. Александрова (2009). Страны центра отличаются диверсифицированным рынком туризма с разнообразием функций и внутренней устойчивостью, для них характерна высокая концентрация капитала и генерация инноваций в сфере туризма. Полупериферия демонстрирует ускоренный рост рынка туризма, а Периферия имеет неоднородную структуру, где выделяются “продвинутая” и “глубокая” части.

Солидарную структуру мирового туристского пространства представил В.К. Крыстев (2015). В ней для центра характерны совершенная модель туристского бизнеса, высокая концентрация транснациональных корпораций, улучшенные технологии обслуживания. Полупериферийные страны находятся в процессе ускоренного формирования современной туристской системы, но с более простой структурой, чем в странах центра, являются среднеразвитыми в экономическом отношении, отличаются высокой интенсивностью международных туристских посещений и быстрым освоением инноваций. Периферия находится в положении субординации по отношению к центру и полупериферии, структура туризма фрагментирована, преимущественно моно- или дуально специализирована, в большинстве случаев туризм внедрен извне, управляется в соответ-

ствии с предпочтениями инвесторов и в итоге вырождается в неокOLONИализм с оттоком доходов).

А.Г. Манаков (2009) также провел анализ мирового туристского пространства с позиций концепции центр—периферия. В качестве основных критериев для анализа он использовал не только данные о мировом туристическом обмене (через показатели прибытий международных туристов по странам мира в соотношении с численностью населения принимающих стран; доходов государств от туризма), но и о концентрации наиболее значимых объектов туристского интереса, которыми были признаны объекты всемирного наследия ЮНЕСКО. Автор делает выводы о том, что основные функционально-статусные зоны туристского пространства: центр—полупериферия—периферия, несколько отличаются от таковых в глобальной экономической дифференциации планеты. Так, относящиеся к глобальной экономической полупериферии небольшие государства Центральной и Южной Европы (Чехия, Греция, Испания и др.), несомненно, относятся к зоне глобального туристского центра. Также он указывает на будущие тенденции в смещении границ функционально-статусных зон туристского пространства.

В пределах туристского пространства отдельной взятой страны С.Г. Ашугатоян (2017) вычленила центр, депрессивные периферийные районы и связывающую их буферную зону — полупериферию.

Зарубежные исследования региональных аспектов развития туризма с позиции центро-периферических закономерностей акцентируют внимание на специфике функционирования периферийных зон, рассматривая региональные разграничения пространств туризма на основе спроса и предложения, а также с применением ГИС (Aubert et al., 2010; Ghimire, 2001; Holmgren and Lindkvist, 2016; Manyane, 2017; Penzes, 2013; Zimmermann, 2005).

А.И. Зырянов (2021) представил секторность туристского пространства регионального масштаба как закономерную пространственную структуру, согласующуюся с секторно-концентрическим социально-экономическим строением и природной дифференциацией. На примере Пермского края им определены ключевые зоны регионального туристского пространства: регионального центра, его ближайшего окружения, ближней маргинальной зоны, зоны вторых центров, транзитной периферии и дальней окраины. Отмечается, что распределение зон также зависит от конфигурации региона, сложившейся транспортной и гидрографической сети.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Анализ пространственной организации туризма Тюменской области с применением центр-периферической модели предварялся комплексной оценкой туристско-рекреационного потенциала (ТРП) по 128 показателям (Гудковских, 2017). Оценочная методика включила природные, историко-культурные, социально-экономические, непосредственно рекреационные составляющие, а также негативные (лимитирующие) факторы, оцениваемые в баллах. На основе суммарных значений ТРП маркировались группы районов, ранжируемые от высоких до низких возможностей развития туризма (рис. 1). Полученные значения ТРП, дифференцируемые по муниципальным образованиям Тюменской области, показывают концентрацию или дефицит туристско-рекреационных ресурсов, условий и ограничений развития туризма, что обуславливает специфику территориальной организации и функционирования туристской отрасли региона.

Дальнейшее изучение территориальной неравномерности развития туризма региона предлагается через наложение центр-периферической модели, которая позволяет проследить проявления пространственной неоднородности развития туристских процессов. Это целесообразно учитывать при оптимизации и планировании развития сферы внутреннего туризма, при поиске новых конкурентных преимуществ региона в результате возросшей потребности путешествий внутри страны.

Для последовательной дихотомии туристского пространства использовался многомерный кластерный анализ. Данный метод классификационного анализа позволяет дифференцировать множество исходных данных на однородные по заданным признакам (переменным) группы, или кластеры. Главным достоинством метода является способность производить разбиение объектов по ряду признаков, при этом исходные данные могут быть произвольной природы. Группировка объектов идет на основе сходства, определяемого через расстояние между точками.

Кластерный анализ центр-периферической структуры Тюменской области осуществлялся на уровне муниципальных районов, так как по ним имеется открытая статистическая информация. На более низком уровне (сельских поселений) статистические данные недоступны. Следует отметить, что среднемасштабный уровень исследования и картографическая визуализация его результатов потребовали включения городов областного значения с их показателями развития туризма в состав районов, в пределах которых данные города территориально размещаются (г. Тюмень с Тюменским районом, г. Ишим с Ишимским, Ялуторовск с Ялуторовским, Тобольск с Тобольским). В результа-

те, объектами кластеризации (анализа) выступили 22 административных района области, включая города и городские округа.

В качестве переменных для кластерного анализа использовались официальные статистические данные, характеризующие степень насыщенности района объектами туристской индустрии и инфраструктуры, дополненные справочными материалами из баз данных интернет-порталов 2GIS, tripadvisor.ru и др. Всего было сгруппировано 8 типов переменных для каждого объекта кластеризации:

- число коллективных средств размещения (КСР) по сведениям органов федеральной статистики (за 2020 г.);
- число КСР по данным справочных материалов и проверка их функционирования на момент проведения исследования (июнь 2021 г.);
- число специальных средств размещения (санатории, пансионаты);
- общее число пробуренных скважин по добыче минеральной подземной воды по материалам Тюменского филиала ФБУ “Территориальный фонд геологической информации по Уральскому федеральному округу” на 01.07.2021 г.;
- число оборудованных и функционирующих термальных источников с открытым бассейном (базы отдыха и санатории);
- число баз отдыха (без термальных источников) с разнообразными услугами;
- число стационарных детских лагерей и санаториев;
- число памятников архитектуры (федерального и регионального значения) как показатель разнообразия культурно-исторического наследия.

Для адекватного проведения процедуры иерархической классификации путем кластерного анализа проводилась предварительная стандартизация (нормирование) исходных данных через автоматическую функцию стандартизации в программе STATISTICA для получения соизмеримых данных. Стандартизованное значение получено при вычитании из исходного значения среднего и деления результата на стандартное отклонение¹.

На рис. 2–4 представлены вертикальные дендрограммы методов кластеризации, по оси *x* указаны все анализируемые операционные территориальные единицы (наблюдения), которыми выступают муниципальные районы Тюменской области, по оси *y* — расстояния между кластерами, которые исходят из изучаемых переменных.

Момент прерывания цепочки кластеризации, постановка границы (показатель расстояния

¹ StatSoft, Inc. (2012). Электронный учеб. по статистике. Москва, StatSoft. <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm> (дата обращения 27.05.2021).

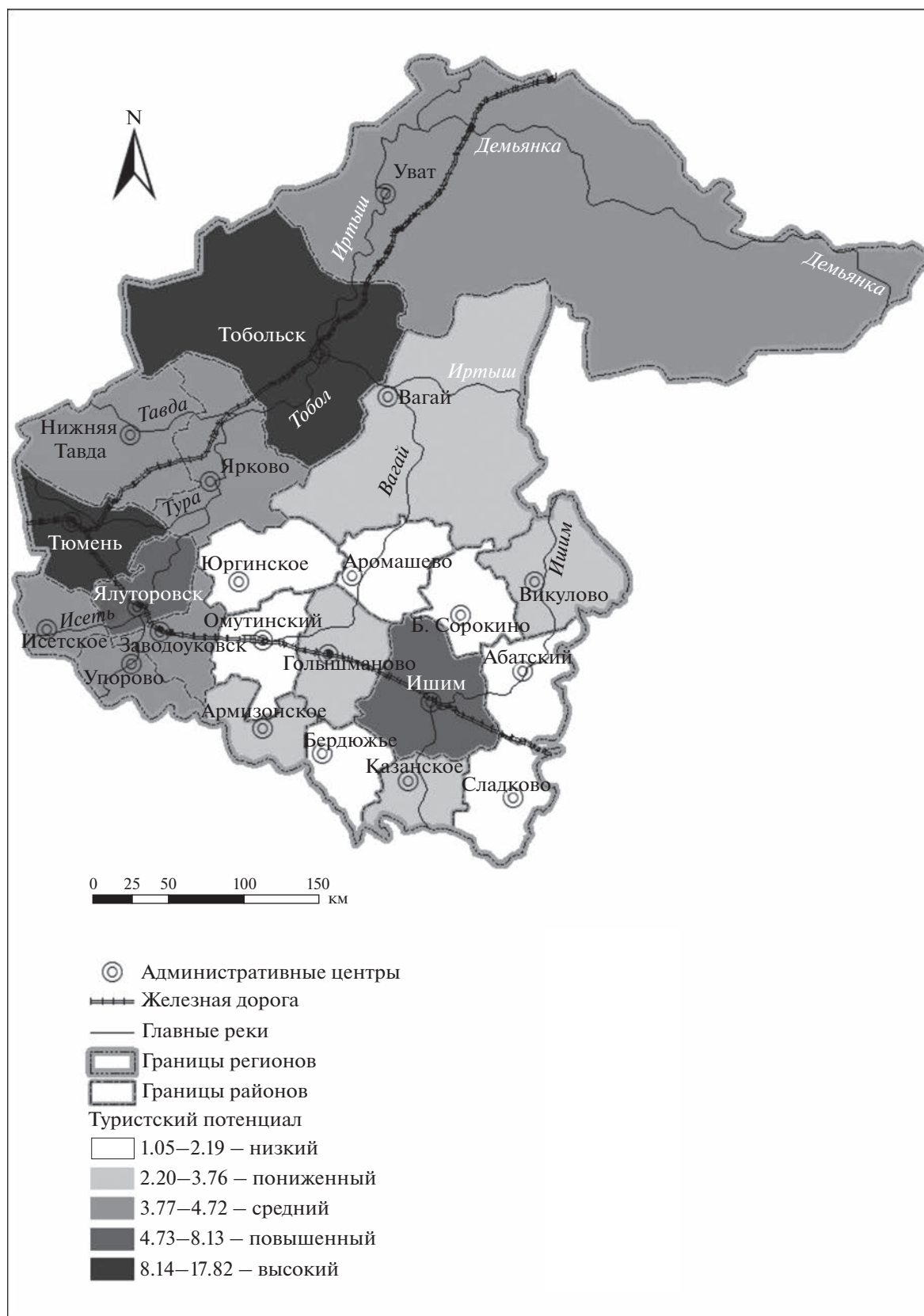


Рис. 1. Туристско-рекреационный потенциал Тюменской области.

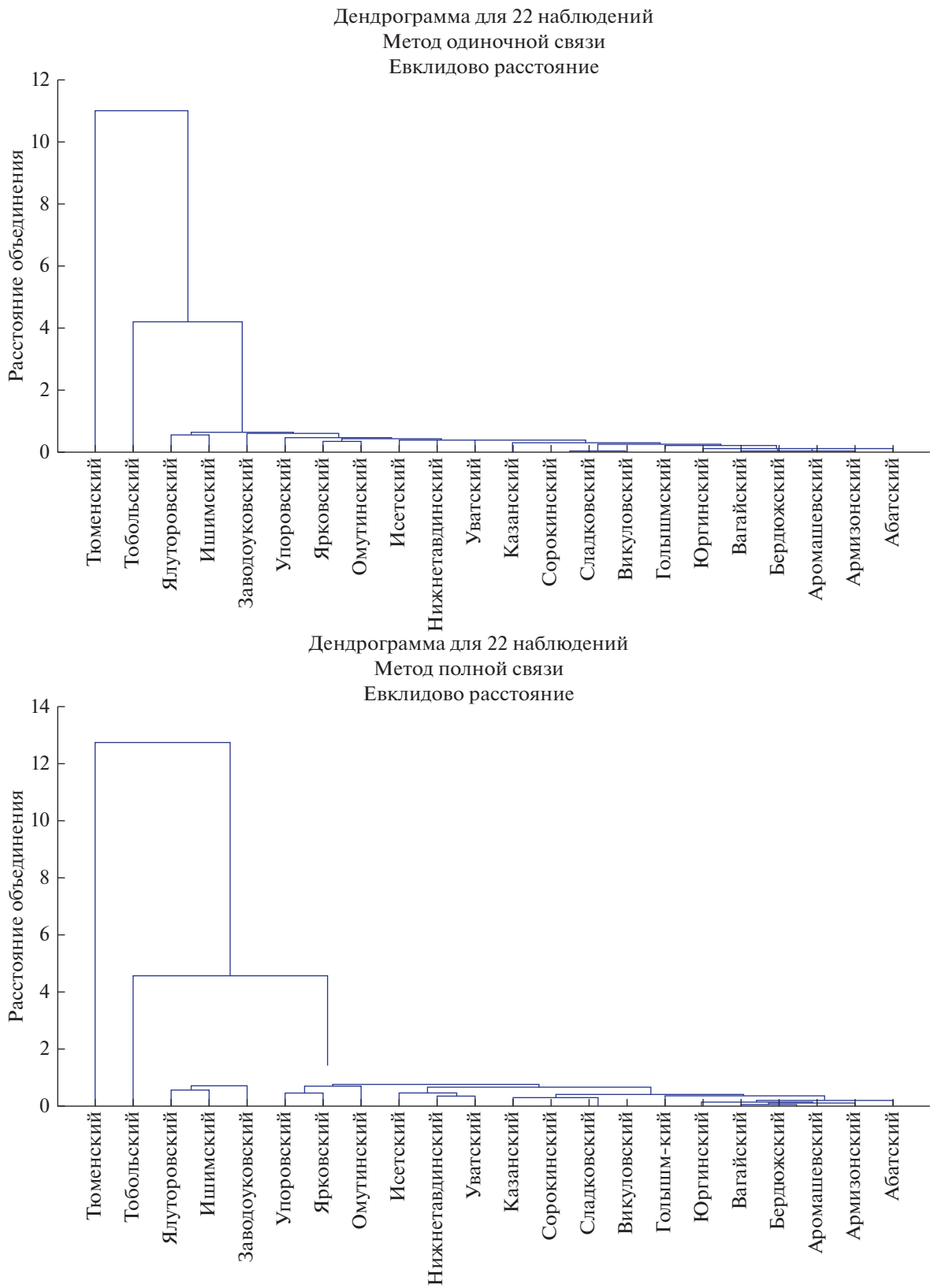


Рис. 2. Дендрограммы одиночной и полной связи STATISTICA.

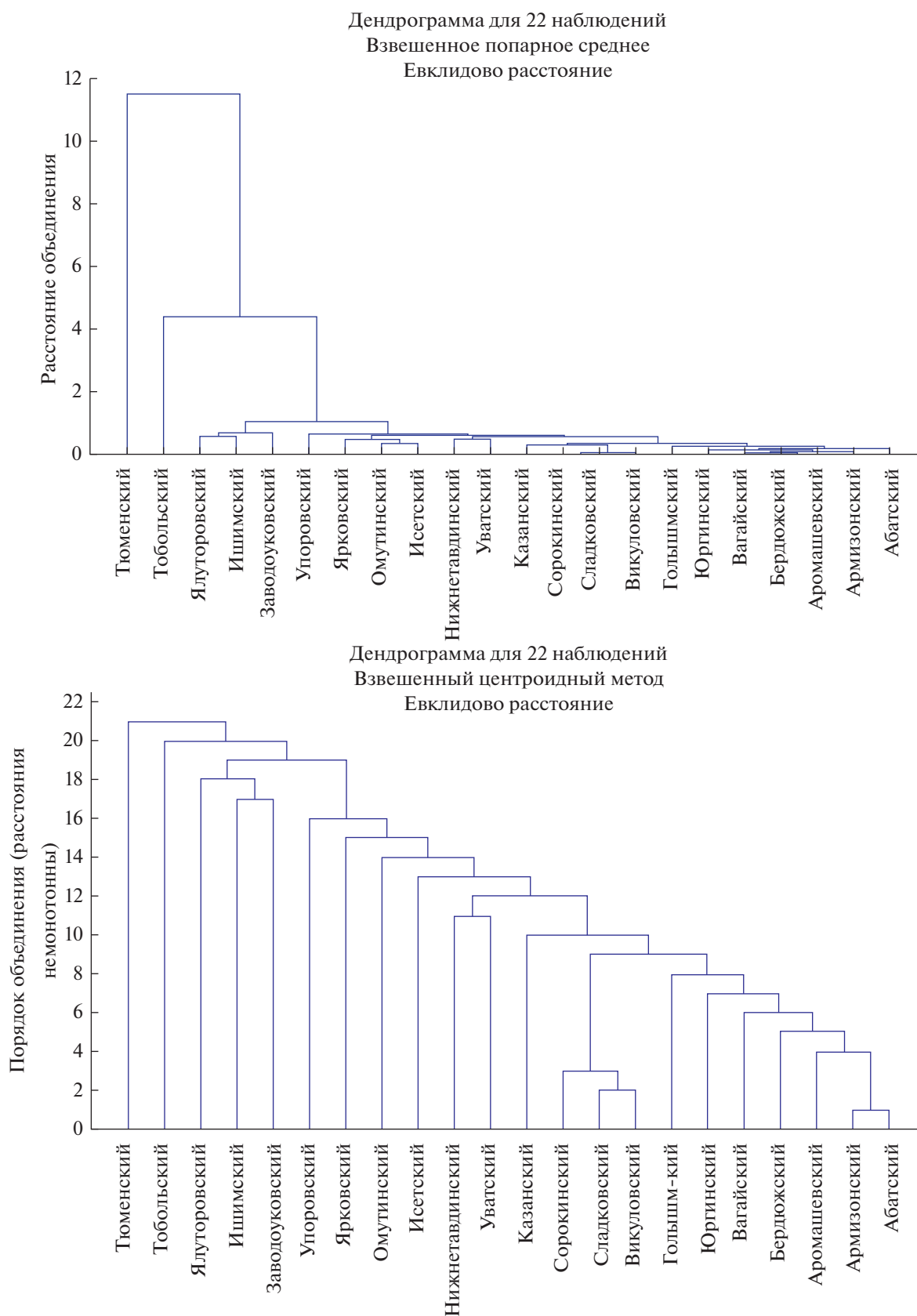


Рис. 3. Дендрограммы по методу взвешенного попарного среднего и по центроидному методу STATISTICA.

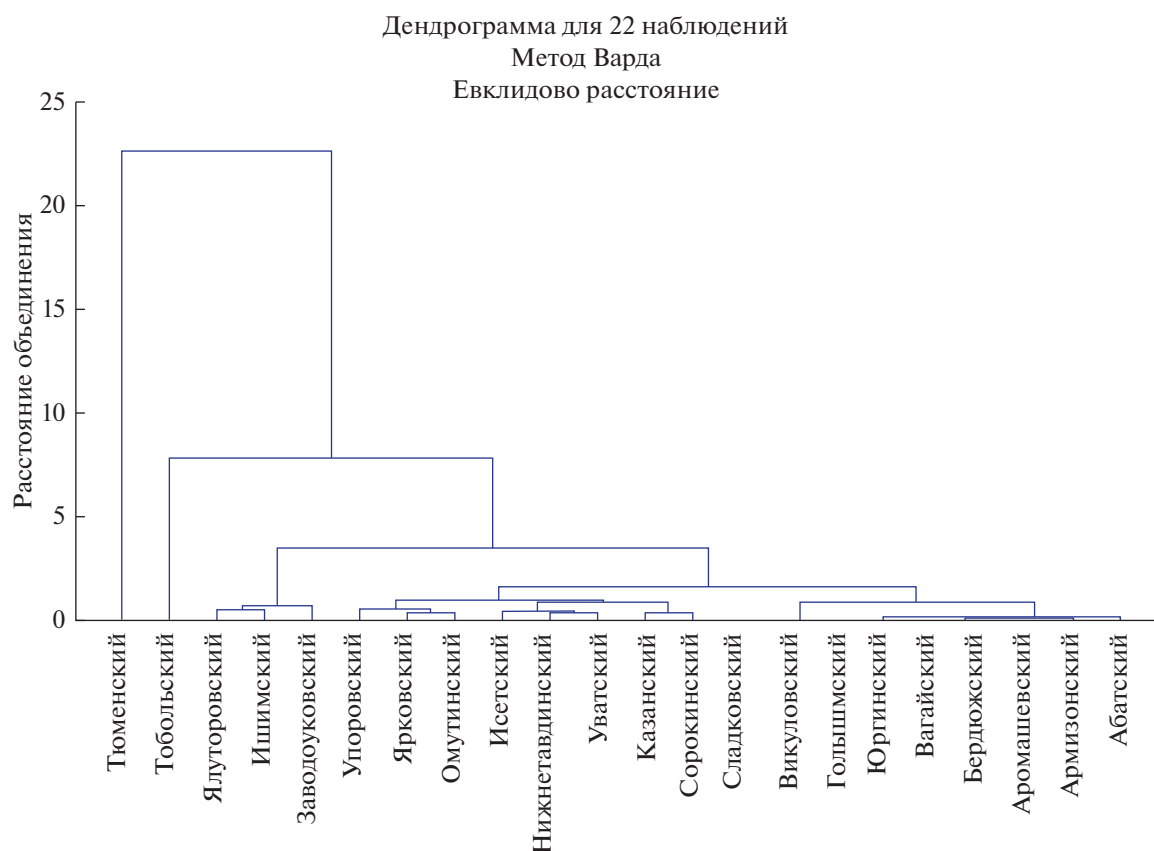


Рис. 4. Дендрограмма по методу Варда STATISTICA.

между объектами), где необходимо поставить точку обреза – важная задача финального этапа метода, обычно это производится там, где расстояние между объединяемыми кластерами становится большим, так как большое расстояние говорит об объединении непохожих объектов. Прекращение процесса кластеризации показывает выявленные кластеры по каждому методу объединения групп объектов и расстояние, на котором объекты объединились в кластеры (табл. 1).

Заключительный этап кластеризации – анализ и интерпретация результатов. Для содержательных логичных заключений необходимо проследить наполненность кластеров объектами, учитывая случайное попадание в связи с тем, что автоматическое объединение не учитывает особенности географического положения и территориальные факторы изучаемых объектов.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Наиболее адекватные результаты кластеризации показали методы Варда, взвешенной попарной средней и полной связи, они позволяют выделить от 4 до 6 кластеров (см. табл. 1). Согласованные кластеры дают возможность практически

без корректировки обозначить главные и вторые центры. Единичные муниципальные образования были изъяты из кластеров при дальнейшем анализе; чаще всего такая необходимость возникала из-за территориального разрыва районов. Например, Ишимский район объединялся в кластер вместе с Ялуторовским и Заводоуковским районами, они действительно схожи по сравнимым показателям, здесь отмечается заметное увеличение концентрации туристских предприятий, однако удаленность Ишима совершенно не позволяет его объединить в зону ближайшего окружения региональной столицы (полупериферии). Ишим имеет повышенные значения комплексного туристско-рекреационного потенциала (см. рис. 1), здесь наблюдается генерация туристских продуктов, поэтому на фоне других периферийных соседних районов Ишим выступает явным лидером и отнесен к категории центров второго порядка.

Проблематичным моментом является четкое вычленение районов полупериферии и ближней, более развитой, периферии (транзитной); имея схожие повышенные показатели оснащенности туристской инфраструктуры, при кластерном анализе они объединяются в единые группы. Разобраться

Таблица 1. Процедура отбора кластеров

Метод кластеризации/ расстояние	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3	Кластер 4	Кластер 5	Кластер 6
<i>Одиночная связь</i>	Ял–Аб	Тоб	Тюм	–	–	–
Расстояние	<1	>2	>4	–	–	–
<i>Полная связь</i>	Ял–З	Ув–Ис	Уп–О	К–Аб	Тоб	Тюм
Расстояние	<1	<1	<1	<1	>4	>5
<i>Взвешенное попарное среднее</i>	Ял–З	Ис–Аб	Тоб	Тюм	–	–
Расстояние	<1	<1	>2	>4	–	–
<i>Варда</i>	Ял–З	Уп–Г	Сл–Аб	Тоб	Тюм	–
Расстояние	<1	>1	>1	>5	>10	–
<i>Взвешенный центроидный</i>	<i>Непригодный метод вследствие большого количества длинных самопересекающихся кластеров</i>					

Примечание. Сокращения названия районов: Ял – Ялуторовский, Аб – Абатский, Тоб – Тобольский, Тюм – Тюменский, З – Заводоуковский городской округ, Ув – Уватский, Ис – Исетский, Уп – Упоровский, О – Омутинский, К – Казанский, Г – Голышмановский городской округ, Сл – Сладковский.

здесь помогает опыт оценки ТРП, географический анализ транспортной доступности, социально-экономического развития муниципальных образований (МО), изучение туристских и экскурсионных маршрутов, отраслевая специфика туризма.

Совершенно непригодными методами кластеризации оказались правило одиночной связи (по причине большого количества микрокластеров) и взвешенный центроидный метод из-за обилия длинных самопересекающихся кластеров. Данные методы не позволяют проследить закономерности при объединении в группы объектов наблюдений.

В результате были выделены пять структурных элементов центрально-периферической системы развития туризма в Тюменской области с определенным набором туристских отраслей (видов туристской деятельности), в которых число туристских функций уменьшается от центра к периферии (рис. 5).

Региональным центром туристского пространства области выступают г. Тюмень и Тюменский район. Здесь концентрируется 75.5% областного туристского потока (по размещенным в КСР), 81.7% общего турпотока по данным ГАУ ТО “Агентство туризма и продвижения Тюменской области”. Высокий уровень социально-экономического развития демонстрируют показатели среднемесячной заработной платы и доля производства товаров и услуг (табл. 2). Тюмень консолидирует максимальные инфраструктурные и транспортные возможности. Туристская отрасль

региональной столицы обладает наибольшей степенью разнообразия выполняемых функций. Центр отражает максимальную концентрацию туристских достижений (инноваций), здесь же находится “Агентство туризма и продвижения Тюменской области”, в котором происходит генерация, информационная поддержка и продвижение новых маршрутов. Здесь фиксируется большая часть прибытий в целях лечебно-оздоровительного, культурно-познавательного, экскурсионного, делового (производственного, научного, конгрессного), событийного туризма; представлены современные развлекательные виды отдыха и оздоровления.

Главной отраслью специализации центра Тюменской области международного и общероссийского масштаба является *лечебно-оздоровительный туризм*, детерминированный уникальными месторождениями термальных источников (46 скважин, из которых 22 находятся в эксплуатации) с организацией круглогодичного отдыха. Регион получил статус “Термальная столица России” и заключил соглашения с известными туроператорами России по обеспечению организованных туров. Именно в Тюмени и Тюменском районе сосредоточено наибольшее количество баз отдыха и санаториев с открытыми термальными источниками – 11 учреждений разного уровня благоустройства и ценообразования для различных потребителей.

Параллельно центр обеспечивает прибывающих туристов *познавательными* и *историко-куль-*

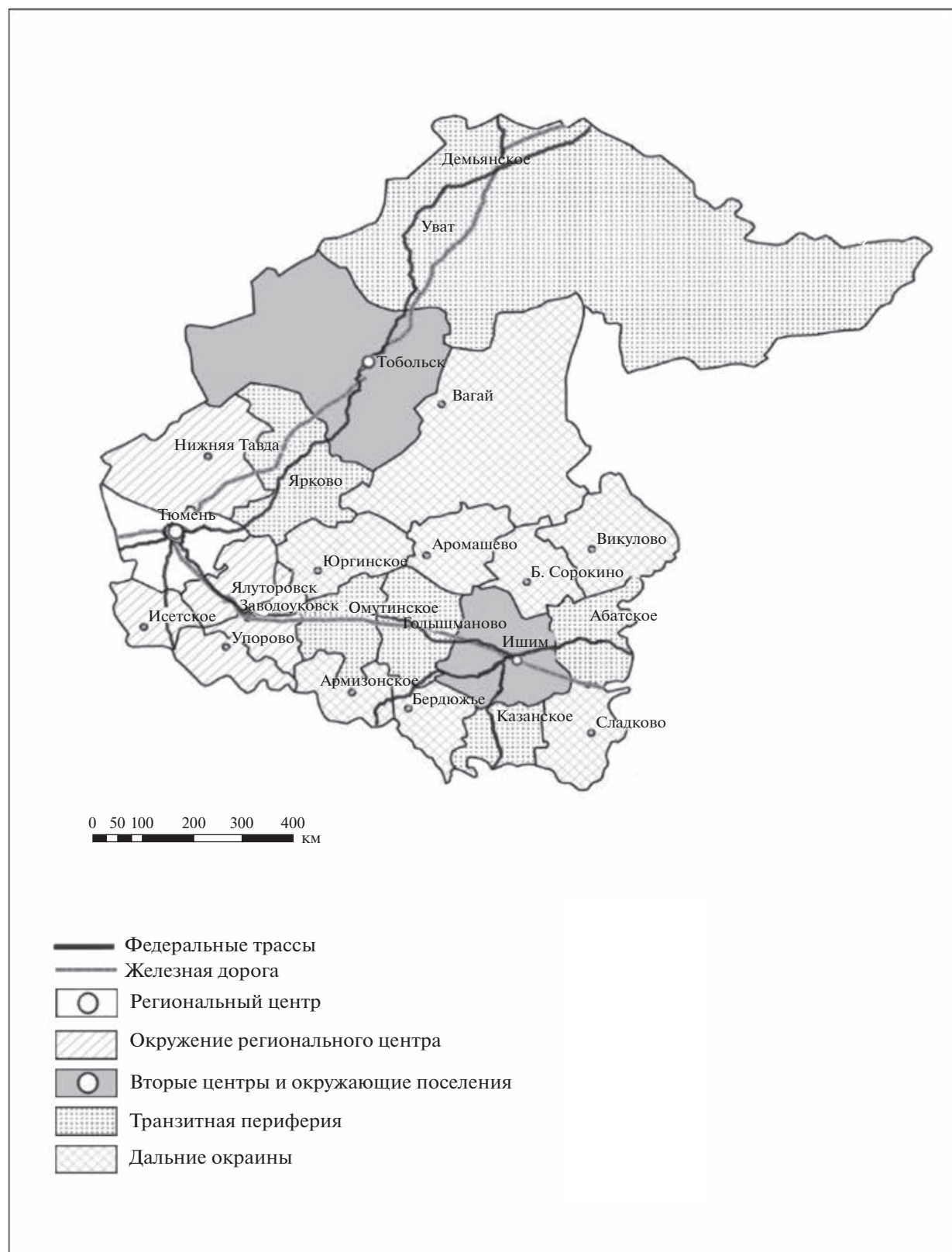


Рис. 5. Центр-периферическая система туризма Тюменской области.

Таблица 2. Основные демо- и социально-экономические показатели муниципальных образований Тюменской области

Муниципальное образование (МО)	Площадь МО, км ²	Численность населения, чел., на 1 января 2021 г.	Плотность населения, чел./км ²	Туристский поток в КСР, тыс. чел., 2020 г.	Доля турпотока по КСР, %	Среднемесячная заработная плата работников организаций*, январь—март 2022 г., руб.	Среднемесячная заработная плата работников гостиниц и предприятий общественного питания*, январь—март 2022 г., руб.	Количество КСР, 2021 г., ед.	Отгружено товаров собственного производства, выполнено работ и услуг, январь—март 2022 г., тыс. руб.	Доля производства МО, %
<i>Региональный центр</i>										
Тюмень	698.48	816700	1169.25	333.7	61.7	72367	33244	135	152815334	29.0
Тюменский	3691.11	128987	34.95	74.4	13.8	55126	25181	36	10541630.2	2.0
Итого				408.1	75.5				163356964.2	31.0
<i>Вторые центры</i>										
Тобольск	239.21	102071	426.70	26.2	4.8	69477	36276	28	233706901.2	44.3
Тобольский	17205.71	20086	1.17	38.43	7.1	52643	51461	7	281364.9	0.1
Ишим	60.01	64010	1066.66	5	0.9	43541	27086	9	3993549.5	0.8
Ишимский	5443.9	28045	5.15	9.5	1.8	39868	34755	8	989885.9	0.2
Итого				79.13	14.6				238971701.5	45.3
<i>Полупериферия – окружение регионального центра</i>										
Заводоуковский ГО	2996	46382	15.48	7.7	1.4	41561	23606	9	3830546	0.7
Ялуторовск	52.16	39947	765.86	8.1	1.5	42516	21779	7	3504529.4	0.7
Ялуторовский	2847.43	14050	4.93	0.7	0.1	35618	18862	2	207729.8	0.0
Нижнетавдинский	7356.45	21450	2.92	1	0.2	39610	Нет данных	2	741423.3	0.1
Исетский	2751.2	24729	8.99	1.3	0.2	39930	19960	1	910898.5	0.2
Упоровский	3007.7	20038	6.66	0.7	0.1	36461	19875	1	1051107	0.2
Итого				19.5	3.6				10246234	1.9
<i>Транзитная периферия (близкая или продвинутая периферия)</i>										
Ярковский	6656.76	22862	3.43	3.9	0.7	42633	26247	8	466421.9	0.1
Уватский	48329	19243	0.40	5.1	0.9	84339	41869	8	110828946.5	21.0
Омутинский	2828.12	17926	6.34	9.2	1.7	37339	18333	3	988343.4	0.2
Голышмановский	4085.05	24922	6.10	4.7	0.9	39562	14744	5	1226782.7	0.2
Казанский	3094.54	21127	6.83	0.9	0.2	36202	Нет данных	4	373929.1	0.1
Абатский	4080.44	16260	3.98	1.4	0.3	37442	43466	4	146145.8	0.0
Итого				25.2	4.7				114030569.4	21.6
<i>Дальние окраины (дальняя периферия)</i>										
Армизонский	3109.04	9038	2.91	0.0	0.0	36171	Нет данных	0	20445.8	0.0
Аромашевский	3446.36	9873	2.86	1.6	0.3	36490	Нет данных	2	35179.4	0.0
Бердюжский	2828.87	10467	3.70	1.5	0.3	35005	Нет данных	3	253144.2	0.0
Вагайский	18400	20238	1.10	1.5	0.3	38990	41631	2	174498.8	0.0
Викуловский	5780.88	14920	2.58	1.1	0.2	35817	Нет данных	1	77335.3	0.0
Сладковский	4022.78	9735	2.42	0.8	0.1	35742	24121	2	194518.2	0.0
Сорокинский	2701.22	9257	3.43	1.2	0.2	35363	40544	2	205941.9	0.0
Юргинский	4408.51	11026	2.50	0.7	0.1	37799	Нет данных	1	73380	0.0
Итого по Тюменской области				8.4	1.6				1034443.6	0.2
									527639912.5	100.0

* Без субъектов малого предпринимательства.

турными программами. Тюмень — первый город Сибири, основанный в 1586 г., обладает весомым историко-культурным потенциалом. Выделяется концентрацией достопримечательностей старинная центральная часть города, где сохранились уникальные памятники деревянной архитектуры, музеи, церкви, современная набережная.

Инфраструктурная насыщенность регионального центра наиболее высокая. Гостиничный фонд (по данным Тюменьстата за 2020 г.) включает 135 объектов в городском округе Тюмень. По данным справочной системы 2GIS на 26.04.2021 г. — 170 гостиниц и хостелов. Появляясь принципиально новые в концептуальном отношении объекты отдыха (глэмпинги). В функциональном плане это базы отдыха, включающие в себя инновационные черты — индивидуальный стиль, забота об эстетическом восприятии пейзажей; воссоздается атмосфера единения с природой. Особую роль в них играет исключительное внимание к элементам ландшафтного дизайна, где постройки гармонично вписываются в исходный ландшафт. Здесь возникают современные высококласные базы отдыха и спа-курорты.

К сожалению, анализ статистической информации о средней заработной плате сотрудников гостиниц и мест общественного питания показал серьезное занижение более чем в 2 раза по сравнению со средними показателями по экономике области (см. табл. 2), что негативно влияет на развитие туристской отрасли, однако такая тенденция сохраняется во всех МО области.

Вторые центры, более низкого порядка, локализуются в Тобольском и Ишимском районах, расположенных чуть более 250 км от столицы региона, и характеризуются заметно сниженным туристским потоком по размещениям в КСР по сравнению с главным центром (12 и 2.7% соответственно). Тобольск в процессе кластеризации в каждом методе показывал значительный отрыв от остальной группы районов.

Анализируя оценку ТРП вторых центров, следует отметить высокий интегральный потенциал у Тобольска, который выделяется исключительными объектами историко-культурного и религиозного наследия; по ценности и количеству таких объектов Тобольск обходит региональную столицу Тюмень. Город активно развивается, сдаются новые объекты туристской инфраструктуры, улучшается городское пространство, анонсируются новые инвестиционные проекты по строительству гостиниц.

Тобольск опережает столицу и по уровню производства товаров и услуг, являясь лидером среди всех МО области (см. табл. 2), что объясняется

размещением в городе крупнейшей нефтехимической компании “СИБУР”. Благодаря ее финансовой поддержке происходит озеленение города, функционирует новый аэропорт, обустраиваются новые парки, скверы и экологические тропы, организуются экскурсии на промышленную площадку нефтехимического комплекса.

Главной отраслью специализации Тобольска является *экскурсионный (культурно-познавательный) и религиозный туризм*. Тобольск основали в 1587 г. на месте слияния рр. Тобол и Иртыш. Богатейшая история города связана с именами выдающихся исторических деятелей России: Д.И. Менделеева, А.А. Алябьева, П.П. Ершова, С.У. Ремезова, В.Г. Перова, Ю.С. Осипова, Н.В. Никитина. В Тобольске хранится память о пребывании семьи последнего российского императора Николая II. Тобольск — один из духовных центров России. Здесь расположены 13 православных приходских и монастырских храмов, а также 2 мусульманские мечети и католический костел. В Тобольском районе находятся входящие в перечень Всероссийских Святых мест Иоанно-Введенский женский и Абалакский Свято-Знаменский мужской монастыри, а также священное место для сибирских татар — Искерская астана, где покоятся первые проповедники ислама.

В Тобольске активно функционируют культурно-познавательный “Императорский маршрут”, связывающий региональный центр и Тобольск; “В Сибирь по своей воле” и другие экскурсионные программы. Низкое число посещений Тобольска связано с тем, что фиксация для статистики происходит в КСР, а Тобольск в первую очередь — центр экскурсионных туров без ночевки с возвращением в Тюмень.

Явно выраженной второй отрасли специализации у Тобольска нет, остальные примеры программ реализуются в гораздо меньшем объеме и часто носят подчиненный характер как дополнительные услуги в культурно-исторических программах. Отдых на природе осуществляется на площадке туристского комплекса “Абалак”, зоны отдыха “Винокурово”, курорта “Алемасова” и других баз отдыха. Термальный источник в районе только один. Инфраструктурная обеспеченность здесь значительно ниже, чем в Тюмени. В Тобольском районе и г. Тобольске суммарно 35 КСР, 1 специальное средство размещения лечебного профиля, 5 баз отдыха.

Туристский потенциал Ишима и Ишимского района выделяется повышенным уровнем (см. рис. 1), особенно в сфере *лечебно-оздоровительного и детского туризма, историко-культурного и экологического туризма*, что обеспечивается 26 объектами КСР, 2 санаториями, 3 базами от-

дыха и 4 детскими лагерями. Открытых термальных источников в районе нет, однако Ишимский район отличается обилием озер и эстетически привлекательными ландшафтами террасовых комплексов реки Ишим, вдоль которой сосредоточено несколько охраняемых территорий, куда осуществляются экологические маршруты.

Туристский поток в КСР Ишима составляет всего 2.7%, а объемы собственного производства товаров и услуг всего 1%, здесь развиты отрасли агропромышленного комплекса: пищевая, молочное и мясное животноводство, растениеводство. Несомненно, Ишим наименее развитый центр второго порядка в области, при этом среди слабо развитых сельскохозяйственных районов юга области по численности населения и объему производства он является лидером (см. табл. 2). Более того, через Ишим проходит федеральная трасса Тюмень—Омск, вдоль которой возрастает концентрация общедоступных столовых и закусочных и объектов розничной торговли.

Ишимским музейным комплексом и местными туристскими компаниями разрабатываются культурно-познавательные программы “Ишим — родина Конька-Горбунка”, “Ишим купеческий” и др.

Ишим регулярно в методах кластеризации объединялся в группу с другими районами повышенных значений туристкой насыщенности объектов размещения, однако пришлось исключить Ишимский район из кластера *ближайшего окружения регионального центра* по мотивам географической отдаленности и наличия черты генерации туристских маршрутов, характерных для центра.

К *полупериферии* отнесены районы, отличающиеся достаточно высоким количеством объектов размещения и разнообразия туристского продукта, соседствующие со столицей региона. На карте (см. рис. 2) это пространство названо *окружением регионального центра*.

Ближайшее окружение Тюмени включает небольшие города Ялуторовск и Заводоуковск, сельские поселения, лесное окружение и представлено Ялуторовским, Исетским, Нижнетавдинским, Упоровским районами и Заводоуковским городским округом. Благодаря близости большого города зона сохраняет полифункциональную структуру туристской отрасли и специализируется на *бальнеологическом и оздоровительном*, природноориентированном туризме, включающим *промысловые, рыболовные, экологические* формы туристско-рекреационной деятельности. Суммарный турпоток в КСР ближнего окружения составляет 3.6%. Объемы производства товаров и услуг — 1.9%, здесь концентрируется мощный агропромышленный сектор области по производству мясной, колбасной, хлебобулочной продукции, рыбоводство и другие отрасли пищевой промышленности; лесная промышленность

представлена в Упоровском и Нижнетавдинском районах. Вклад туристского сектора в объемы производства услуг не зафиксированы муниципальными отделами статистики. Особенно выделяется Ялуторовский район и Заводоуковский городской округ как бальнеологический курорт с разнообразной инфраструктурой для осуществления лечебно-оздоровительных программ: 2 базы отдыха с термальными источниками, 4 санатория (2 из них с термальным открытым источником), 3 детских лагеря. В Ялуторовском районе функционируют санатории “Светлый” с грязелечением и “Сосновый бор” с собственным горячим источником; в с. Карабаш действует термальный парк “Фешенель”. В Заводоуковском городском округе базируется современный SPA-отель “Ингала” который также имеет термальный минеральный источник.

Вторая отрасль специализации связана с Ялуторовском, который выделяется значимым историко-культурным потенциалом, где *экскурсионный и музейный* туризм особенно развит. В XIX в. город был местом ссылки декабристов, народовольцев, участников польского национально-освободительного движения. В 1970 г. Ялуторовск внесен в список исторических городов России. В городе бережно сохраняется историческое и культурное наследие, работает первый в России музей памяти декабристов.

Исетский и Нижнетавдинский районы имеют существенный потенциал для формирования туристских продуктов *экологической* направленности (база отдыха “Южное”, природно-туристический комплекс “Морелеса”, природный парк “Марьино ущелье”) и *лечебно-оздоровительной* рекреации — санаторий “Ахманка”. *Сельские и этнографические* программы организуются на базе отдыха “Казачье подворье”, и в этностойбище “Увас Мир хот” (Дом Северных людей) в д. Кыштырла.

Разделить *периферию* на ближнюю и дальнюю с помощью кластерного анализа наилучшим образом позволил метод Варда; остальные приемы взвешенной попарной средней и полной связи не дают такой возможности по заданному набору переменных в связи с общими низкими показателями, которые группировались в единый массив микрокластеров. Однозначно оставшаяся группа районов отличается пониженными и низкими показателями интегрального ТРП, единичными объектами туристской инфраструктуры, низким уровнем социально-экономического развития в связи с сельским образом жизни и несравнимо низкой численностью населения (см. табл. 2). Только самый северный Уватский район отличается высокими показателями объемов промышленного производства, так как это единственное

муниципальное образование, где ведется добыча нефти.

Среди множества районов выделяется группа, где наблюдается незначительное инфраструктурное оживление в связи с транспортными магистралями, вдоль которых фиксируется *транзитная периферия (ближняя, или продвинутая периферия)*, состоящая из Ярковского, Уватского, Омутинского, Абатского, Казанского районов, Голышмановского городского округа. Суммарные значения туристского потока по КСР составляют 4.7%, что больше чем в полупериферии, но спорный момент заключается в том, насколько истинно туристские цели отражают эти цифры, скорее это размещение в придорожных отелях, связанное с ночным отдыхом от вождения.

По инфраструктурной обеспеченности нет возможности однозначно определить единую специализацию у района, лишь единичные предприятия предлагают туристские услуги разной направленности: с. Покровское (Ярковский район) — музейный туризм, с. Уват — экологический и спортивный. В Ярковском и Омутинском районах имеются единичные базы отдыха с термальными источниками, слабо оснащенные качественными объектами размещения. Остальные территории отличаются разнообразными природными достоинствами, которые обеспечивают рекреационные потребности местного населения.

Дальние окраины (дальняя периферия) маркируются рассеянными единичными примерами туристско-рекреационных предприятий, низкими значениями комплексного ТРП, что объяснимо коррелирует с незначительными цифрами туристского потока (1.6% посещений). Третий кластер по методу Варда (см. табл. 1) практически безошибочно ограничил районы дальней периферии, лишь некоторые районы из транзитной периферии оказались в общей группе из-за схожести данных по инфраструктурным показателям.

Дальние окраины включают Юргинский, Сладковский, Армизонский, Бердюжский, Вагайский, Аромашевский, Викуловский, Сорокинский районы. В основном районы имеют незначительные возможности для развития *экологического, или охотничье-рыболовного и промыслового, лечебно-оздоровительного туризма* на базе соленых озер (Белозерский заказник, оз. Соленое в Бердюжском районе). Все районы отличаются низкой плотностью и миграционным оттоком населения, крайне низкими показателями собственного производства товаров и услуг, моноспециализацией агропромышленного комплекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее универсальными методами кластеризации для анализа пространственной структу-

ры туризма являются метод Варда, взвешенной попарной средней и полной связи. Однако итоговый процесс объединения объектов в кластеры требует дополнительного анализа в связи, например, с несовершенством автоматической группировки без учета специфики географического положения.

Кластерный анализ преимущественно демонстрирует простое, аргументированное разделение туристского пространства на явные категории поляризации — центр и слабо развитую периферию. Затруднения выявляются при делении схожих средне развитых районов, которые выступают полупериферией (окружение регионального центра) в нашем случае, и ближней периферией. Здесь для их четкого деления необходимо учитывать большее число факторов: анализ повышенных показателей туристской насыщенности показывает в некоторых случаях связь с транзитным фактором, когда вдоль федеральных трасс увеличивается количество объектов придорожного сервиса. В других случаях наблюдается связь с агломерационным эффектом близости столицы или суммарное воздействие обоих причин повышенных значений, анализируемых показателей, как например, в Ялуторовском районе и Заводоуковском городском округе.

Что касается туристской специализации центров и зон, здесь прослеживается следующая закономерность: региональный центр и вторые центры региона, за исключением Ишима, характеризуются максимальными значениями туристского потока, разнообразием экскурсионных программ, насыщенностью объектов туристской инфраструктуры разнообразного уровня благоустройства и цен. При этом в них легко выделяется главная отрасль специализации туризма: Тюмень — лечебно-оздоровительный, Тобольск — культурно-исторический туризм, которые коррелируют с главным мотивом путешествий.

Ишим как наименее развитый центр показывает примеры сразу нескольких видов туристско-рекреационной деятельности, но их охват и разнообразие слабое, и в большей части туристский продукт ориентирован на потребности местных жителей или близлежащих поселков.

Полупериферия и периферия туристского пространства отличаются мононаправленностью в развитии определенных видов туризма, чаще природно-ориентированного характера.

Туристское пространство Тюменской области имеет четко очерченную поляризацию. Ядро (г. Тюмень) и ближайшее окружение с концентрацией подавляющего большинства туристских прибытий. Полупериферия и транзитная периферия как наиболее динамичная зона имеет потенциальные точки роста. Нивелировать отсталость этих районов необходимо путем вовлече-

ния территорий в областные и межрегиональные маршруты, досконально изучить возможности формирования туристских продуктов и наметить перспективные участки для строительства объектов туристской инфраструктуры.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Тюменской области в рамках научного проекта № 20-45-720014 “Комплексная оценка туристско-рекреационных ресурсов Тюменской области и территориальное планирование индустрии туризма”.

FUNDING

The research was funded by RFBR and Tyumen oblast, project no. 20-45-720014 “Comprehensive assessment of tourist and recreational resources of the Tyumen region and territorial planning of the tourism industry.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрова А.Ю.* Структурно-функциональный анализ туристического пространства мира // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2009. № 4. С. 21–26.
- Ашугатоян С.Г.* Трансформация территориальной структуры въездного и внутреннего туризма в Турции // Геогр. вестн. 2017. № 4 (43). С. 153–161.
- Валлерстайн И.* Анализ мировых систем и ситуация в современном мире / пер. с англ. П.М. Кудюкина; под ред. Б.Ю. Кагарлицкого. СПб.: Унив. кн., 2001. 414.
- Грицай О.В., Иоффе Г.В., Трейвиш А.И.* Центр и периферия в региональном развитии. М.: Наука, 1991. 168 с.
- Гудковских М.В.* Методика комплексной оценки туристско-рекреационного потенциала // Географический вестн. 2017. № 1 (40). С. 102–116.
- Зырянов А.И.* Теория и методология рекреационной географии. Пермь, 2021. 368 с. <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/zyryanov-teoriya-i-metodologiya-rekreacionnoj-geografii.pdf>
- Каганский В.Л.* Центр – провинция – периферия – граница. Основные зоны культурного ландшафта // Культурный ландшафт: вопросы теории и методологии исследований: семинар “Культурный ландшафт”: 2-й тематич. вып. докл. М.–Смоленск: Изд-во СГУ, 1998. С. 72–101.
- Кружалин В.И., Кружалин К.В.* Пространственная организация рекреации и туризма в регионах России // Туризм и рекреация: фундаментальные и прикладные исследования: Тр. V Междунар. научн.-практ. конф. МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет (Москва, 28–29 апреля 2010 г.). СПб.: Д.А.Р.К., 2010. С. 19–29.
- Крыстев В.К.* Геоэкономическая поляризация мирового туристского пространства в центрo-периферийном порядке // Социально-политические и эколого-хозяйственные проблемы развития Балтийского региона: К 170-летию Русского географического общества: Материалы междунар. научн.-практ. конф. (Псков, 19–20 ноября 2015 г.). Псков: Псков. гос. ун-т, 2015. С. 3–10.
- Манаков А.Г.* География международного туризма и всемирного наследия ЮНЕСКО: взгляд сквозь призму концепции “центр–периферия” // Псков. регион. журн. 2009. № 8. С. 63–74.
- Aubert A., Csapo J., Pirkhoffer E., Puczkó L., Szabo G.* A method for complex spatial delimitation of tourism destinations in South Transdanubia // Hungarian Geogr. Bul. 2010. Vol. 59. № 3. P. 271–287.
- Friedmann J.* Regional development policy. Boston: Mass. Inst. Techn., 1966. 279 p.
- Ghimire K.B.* Regional tourism and South-South economic cooperation // Geogr. J. 2001. Vol. 167. № 2. P. 99–110.
- Gormsen E.* The impact of tourism on coastal areas // Geo-Journal. 1997. № 42. P. 39–54.
- Holmgren H., Lindkvist K.B.* Resource management regimes and innovation in peripheral nature-based tourism: The case of North Cape tourism and sea-fishing tourism // Norsk Geografisk Tidsskrift. 2016. Vol. 70. № 4. P. 203–215.
- Husbands W.* Centres, peripheries, tourism, and socio-spatial development // Ontario Geogr. 1981. Vol. 17. P. 37–59.
- Keller C.P.* Centre-periphery tourism development and control // Leisure, tourism and social change. Conference papers, Edinburgh. 1983. P. 77–84.
- Manyane R.M.* Rethinking trans-boundary tourism resources at the Botswana-North West Province border // South African Geogr. J. 2017. Vol. 99. № 2. P. 134–151.
- Mowforth M., Munt I.* Tourism and sustainability: Development, globalisation and new tourism in the Third World. London: Routledge, 2015. 476 p.
- Penzes J.* The dimensions of peripheral areas and their restructuring in Central Europe // Hungarian Geogr. Bul. 2013. Vol. 62. № 4. P. 373–386.
- Rezzani R.J.* Classification analysis of world economic regions // Geogr. Analysis. 2001. Vol. 33. № 4. P. 330–352.
- Taylor P.J., Catalano G., Walker D.R.F.* Exploratory analysis of the world city network // Urban Stud. 2002. Vol. 39. № 13. P. 2377–2394.
- Wu X. Ben, Sui Daniel Z.* An initial exploration of a lacunarity-based segregation measure // Environ. and Planning. 2001. Vol. 28. № 3. P. 433–446.
- Zimmermann G.R.* Madagascar: Economic and ecological interdependencies illustrated along a centre-periphery profile // Geographische Rundschau. 2005. Vol. 57. № 4. P. 42–49.

Spatial Structure of Tourism in the Context of the “Center–Periphery” Concept: The Case of Tyumen Oblast

M. V. Gudkovskikh^{1, *} and D. A. Dirin¹

¹Tyumen State University, Tyumen, Russia

*e-mail: m.v.gudkovskikh@utmn.ru

The article is devoted to the analysis of the spatial structure of the tourist economy in the Tyumen region. The theoretical and methodological basis of this analysis is the concept of “center–periphery.” The study uses the method of cluster analysis (using the rules of single and full connection, weighted pairwise average, weighted centroid methods and the Ward method) to isolate groups of municipalities with a similar set of variables reflecting the infrastructure security and cultural and historical potential of the territory, which guarantees an adequate segmentation of the tourist space of the region into a regional center that consolidates record tourist resources and the most diverse types of tourist activity; the second centers are fixed by increased indicators of tourist potential with clearly distinguished branches of specialization. Peripheral areas are extremely poorly equipped with infrastructure components, characterized by internal heterogeneity of tourist manifestations with single destinations and transport isolation, while tourism for them is a means of overcoming economic backwardness, but is located in the zone of risky entrepreneurship. The results of the study allow us to improve the scientific and practical content of tourist zoning and territorial planning of the tourist industry of the Tyumen region.

Keywords: cluster analysis, the concept of center–periphery, tourism, Tyumen oblast, tourist and recreational potential, tourism industry

REFERENCES

- Alexandrova A.Yu. Structural-functional analysis of the world touristic space. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2009, no. 4, pp. 21–26. (In Russ.).
- Ashugatoyan S.G. Transformation of the spatial structure of internal tourism in Turkey. *Geogr. Bull.*, 2017, no. 4 (43), pp. 153–161. (In Russ.).
- Aubert A.A., Csapo J.B., Pirkhoffer, E.C., Puczko L., Szabo G.D. A method for complex spatial delimitation of tourism destinations in South Transdanubia. *Hungarian Geogr. Bull.*, 2010, vol. 59, no. 3, pp. 271–287.
- Friedman J. *Regional development policy*. Boston: Mass. Inst. Techn., 1966. 279 p.
- Ghimire K.B. Regional tourism and South-South economic cooperation. *Geogr. J.*, 2001, vol. 167, no. 2, pp. 99–110.
- Gormsen E. The impact of tourism on coastal areas. *Geogr. J.*, 1997, no. 42, pp. 39–54.
- Gritsai O.V., Ioffe G.V., Treivish A.I. *Tsentr i periferiya v regional'nom razviti* [Center and Periphery in Regional Development]. Moscow: Nauka Publ., 1991. 168 p.
- Gudkovskikh M.V. Methodology for comprehensive assessment of tourism potential. *Geogr. Bull.*, 2017, no. 1(40), pp. 102–116.
<https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-1-102-116> (In Russ.).
- Holmgren H.A., Lindkvist K.B. Resource management regimes and innovation in peripheral nature-based tourism: The case of North Cape tourism and sea-fishing tourism. *Norsk Geogr. Tidsskrift*, 2016, vol. 70, no. 4, pp. 203–215.
- Kaganskii V.L. Center – province – periphery – border. The main zones of the cultural landscape. In *Kul'turnii landshaft: voprosy teorii i metodologii issledovani*. Seminar “Kul'turnyi landshaft”. Vtoroi temat. vyp. dokl. sem. [Cultural Landscape: Issues of Theory and Methodology of Research: Seminar “Cultural Landscape”: The Second Thematic Issue of the Seminar Reports]. Krasovskaya T.M., Ed. Moscow–Smolensk: SGU Publ., 1998, pp. 72–101.
- Keller C.P. Centre-periphery tourism development and control. *Leisure, tourism and social change. Conf. Pap.* Edinburgh, 1983, pp. 77–84.
- Kruzhalin V.I., Kruzhalin K.V. Spatial organization of recreation and tourism in the regions of Russia. *Turizm i rekreatsiya: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: Tr. V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi conf. MGU imeni M.V. Lomonosova, geograficheskii fakultet* [Tourism and Recreation: Fundamental and Applied Research: Proc. of the V Int. Scientific and Practical Conf. Moscow State University, Faculty of Geography. Moscow, 28–29 April 2010]. St. Petersburg: D.A.R.K. Publ., 2010, pp. 19–29.
- Krystev V.K. Geo-economic polarization of the world tourist space in the central-peripheral order. In *Sotsial'no-politicheskie i ekologo-khozyaistvennye problemy razvitiya Baltiiskogo regiona: K 170-letiyu Russkogo geograficheskogo obshchestva: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi conf.* [Socio-political, Ecological and Economic Problems of the Baltic Region Development. To the 170th Anniversary of the Russian Geographical Society: Materials of the Int. Sci. Scientific and Practical Conf. Pskov, 19–20 November 2015]. Pskov: Pskov State University Publ., 2015, pp. 3–10.

- Manakov A.G. Geography of international tourism and UNESCO World Heritage: a look through the prism of the “center-periphery” concept. *Pskov. Reg. Zh.*, 2009, no. 8, pp. 63–74. (In Russ.).
- Manyane R.M. Rethinking trans-boundary tourism resources at the Botswana-North West Province border. *South African Geogr. J.*, 2017, vol. 99, no. 2, pp. 134–151.
- Mowforth M., Munt I. *Tourism and sustainability: Development, globalisation and new tourism in the Third World*. London: Routledge, 2015. 476 p.
- Penzes J. The dimensions of peripheral areas and their restructuring in Central Europe. *Hungarian Geogr. Bull.*, 2013, vol. 62, no. 4, pp. 373–386.
- Rezzani R.J. Classification analysis of world economic regions. *Geogr. Analysis*, 2001, vol. 33, no. 4, pp. 330–352.
- Taylor P.J., Catalano G., Walker D.R.F. Exploratory analysis of the world city network. *Urban Stud.*, 2002, vol. 39, no. 13, pp. 2377–2394.
- Wallerstein I.M. *Analiz mirovykh system i situatsiya v sovremennoy mire* [World-Systems Analysis and the Situation in the Modern World]. Kagarlitskii B.Yu, Ed. St. Petersburg: Univ. kniga Publ., 2001. 414 p.
- Wu X., Ben Sui, Daniel Z. An initial exploration of a lacunarity-based segregation measure. *Envir. Plan.*, 2001, vol. 28, no. 3, pp. 433–446.
- Zimmermann G.R. Madagascar: Economic and ecological interdependencies illustrated along a centre-periphery profile. *Geogr. Rundschau*, 2005, vol. 57, no. 4, pp. 42–49.
- Zyryanov A.I. Theory and methodology of recreational geography. Perm State National Research University Publ., 2021, 19, 368 p. <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/zyryanov-teoriya-i-metodologiya-rekreacionnoj-geografii.pdf> (accessed: 27.05.2021). (In Russ.).

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 504.455; 551.435.326

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ АБРАЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫХ ПЕРЕСЫПЕЙ ЗАЛИВОВ ВОЛГОГРАДСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА КАК ИНДИКАТОР НАНОСОФОРМИРУЮЩИХ СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ

© 2023 г. М. С. Баранова^{1, *}, О. В. Филиппов^{1, **}, Е. С. Брызгалина^{1, ***}, А. И. Кочеткова^{1, ****}

¹Волжский филиал Волгоградского государственного университета, Волжский, Россия

*e-mail: maria_baranova2902@rambler.ru

**e-mail: ovfilippov@list.ru

***e-mail: bryzgalina_elena@mail.ru

****e-mail: aikochetkova@mail.ru

Поступила в редакцию 05.09.2022 г.

После доработки 20.10.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

Отделение заливов от основной акватории Волгоградского водохранилища абразионно-аккумулятивными пересыпями, возникающее вследствие вдольберегового переноса наносов, является в настоящее время одной из региональных проблем. Гранулометрический состав характеризует перемещение слагающих пересыпи наносов под воздействием вдольбереговых течений. По материалам 2019–2020 гг. были определены гранулометрические параметры пересыпей и сделан оценочный расчет нанософормирующих скоростей течения. Изучено 82 образца 24 заливов право- и левобережья. Применялись полевые (отбор проб наносов, визуальная характеристика литологического состава берега) и аналитические методы исследования (гранулометрический анализ, графический и математические методы). Установлено, что в строительстве абразионно-аккумулятивных пересыпей принимают участие наносы размером от 100–50 мм (крупная галька) до 0.05 мм и менее (мелкие пылеватые частицы). Все изученные фракции оказались окатанными или хорошо окатанными, что дает основание причислять их к наносам. Существуют отличия гранулометрического состава наносов пересыпей на право- и левобережье водоема. В составе наносов пересыпей правобережных заливов в одних случаях господствует крупная (100–50 мм) и средняя галька (50–20 мм), в других – средняя (0.5–0.2 мм) и мелкая фракции песка (0.2–0.1 мм). В составе наносов пересыпей левобережных заливов преобладает средняя фракция песка (0.5–0.2 мм), отмечены частицы размером менее 0.05 мм. Скорости течения, формирующие пересыпи, составляют на правобережье водоема от 0.47 до 3.45 м/с, на левобережье – от 0.47 до 1.63 м/с. Пробы наносов устьевых абразионно-аккумулятивных пересыпей имеют разную степень сортировки (1.13–14.40), что свидетельствует о различиях в скоростях течений, формирующих данные формы рельефа в разные временные периоды. Гранулометрический состав наносов является косвенным признаком динамики уже сформированной пересыпи и индикатором наносообразующих скоростей течения. Седиментация наносов на Волгоградском водохранилище происходит на близком расстоянии от источника их поступления.

Ключевые слова: заливы, гранулометрия, литология, абразионно-аккумулятивные пересыпи, скорости течения, интегральные кривые, Волгоградское водохранилище

DOI: 10.31857/S2587556623010041, **EDN:** LEYJYA

ВВЕДЕНИЕ

Процесс разрушения берегов морей и крупных равнинных водохранилищ вместе с производными процессами вдольберегового транспорта и седиментации продуктов разрушения становится на сегодняшний день одним из наиболее актуальных. В результате воздействия процесса вдольберегового переноса материала происходит формирование относительно устойчивых аккумулятивных тел в непосредственной близости от берега (Законнов и др., 2018; Захаров, Алексеев, 2012;

Филиппов, 2004; Bagnold, 1947; Grottoli et al., 2019; Ouillon, 2018; и др.).

В настоящее время исследований, посвященных вопросам современного накопления наносов в прибрежной зоне водоемов, сравнительно немного. На водохранилищах процесс отделения заливов остается практически не изученным. Исключение составляют отдельные исследования Куйбышевского (Баранова и др., 1967; Зубенко, 1962), Цимлянского (Баранова и др., 1967; Вендров,

1958), Камского и Воткинского (Назаров и др., 2013) водохранилищ.

Перекрытие устьевых створов заливов абразионно-аккумулятивными пересыпями (ААП) активно развивается на Волгоградском водохранилище, образованном с возведением плотины ГЭС на р. Волге у Волгограда в 1958 г. Процесс отделения заливов был начат еще при наполнении чаши водоема до НПУ (1961), когда переработка берегов происходила наиболее ускоренно (Филиппов, 2004). По условиям гидрологического режима и особенностям морфологического строения ложа и берегов водохранилище подразделяется на три участка: озерный (Волжская ГЭС—пос. Ровное), озерно-речной (пос. Ровное—г. Маркс) и речной (г. Маркс—Саратовская ГЭС). Особенно динамично процесс развивается на озерном участке водоема.

Отделение заливов пересыпями является негативным процессом для экосистемы водохранилища. Он приводит к потере ряда заливов водоема как части кормовой базы, зон нереста, нагула молоди гидробионтов и экологической среды их обитания (Филиппов, 2004).

Гранулометрический состав наносов определяет характеристики их фракционного перемещения под воздействием волн и течений. Особенности дифференциации материала наносов в зоне пляжа и в приустьевой полосе определяются местами расположения источников поступления, направлением вдольберегового перемещения наносов (Гуров, 2018; Гуров и др., 2019; Чалов, Ефимов, 2021). Гранулометрический состав донных и пляжевых отложений береговых аккумулятивных форм является достаточно “консервативным” параметром с одной стороны, а с другой — динамически активным. Анализ закономерностей формирования пространственных особенностей гранулометрического состава в различных морфологических частях изучаемой аккумулятивной формы рельефа может дать информацию о характере и взаимосвязях процессов, определяющих ее трансформацию; современном рельефе и морфологии, их динамике и устойчивости к изменениям внешних условий (Крыленко В.В., Крыленко М.В., 2014; Hegde et al., 2021; Jarmalavičius et al., 2017; Zhuk et al., 2017). Наносы представляют важным компонентом водных экосистем, являясь продуктом седиментации органического и неорганического материала (Мясникова, Потахин, 2021).

Размерные фракции наносов дают четкое представление о скоростях течения, формирующих устьевые абразионно-аккумулятивные пересыпи заливов, и помогают выявить основные закономерности их образования и развития. Анализ гранулометрического состава абразионно-аккумулятивных отмелей участков многолетних наблюдений за переформированием берегов Волгоградского

водохранилища был впервые проведен О.В. Филипповым (2004). Размеры частиц наносов на отмели варьировали в зависимости от ряда причин (например, повторяемости штормов и направления ветра). Зона волноприбоя (включая пляж, урез и приустьевую часть отмели) является своеобразным сепаратором гранулометрической дифференциации наносов. Из нее полностью удаляются частицы, которые скорости волноприбойных течений способны привести в состояние взвеси. В основном в формировании отмели принимают участие песчаные фракции с размером частиц наносов 0.32–0.13 мм; часть песчаных фракций может выноситься за пределы отмели (Филиппов, 2004). В настоящем исследовании мы сделали анализ гранулометрического состава пересыпей как составной части отмели.

Целью исследования стало вычисление скоростей течений, формирующих устьевые абразионно-аккумулятивные пересыпи заливов Волгоградского водохранилища на основе анализа гранулометрического состава наносов.

Задачи исследования:

1. Провести гранулометрический анализ проб наносов устьевых абразионно-аккумулятивных пересыпей и кос.
2. Определить степень окатанности образцов наносов.
3. Выявить принципиальные отличия в гранулометрическом составе наносов на право- и лево-бережье водоема.
4. Построить интегральные кривые и определить по ним диаметр частиц наносов 5, 10, 25, 50, 75, 90 и 95%-й обеспеченности.
5. Рассчитать коэффициент сортировки S_0 и определить степень сортировки материала абразионно-аккумулятивных кос и пересыпей.
6. Рассчитать скорости течений, формирующих структуру абразионно-аккумулятивных пересыпей.
7. Вычислить скорости транспортировки и определить расстояние, на которое переносятся влекомые наносы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалами исследования послужили пробы наносов устьевых абразионно-аккумулятивных пересыпей и кос, взятые в летний период 2019–2020 гг. Образцы отбирались с гребня пересыпи или косы, с уреза водохранилища и залива, а также в отмелой части в 20 м от берега. Всего проанализировано 82 пробы 24 заливов (рис. 1). На каждом объекте было взято от 2 до 5 проб в зависимости от однородности слагающего пересыпь материала.

В работе использованы полевые и аналитические методы исследования. Полевые включали в

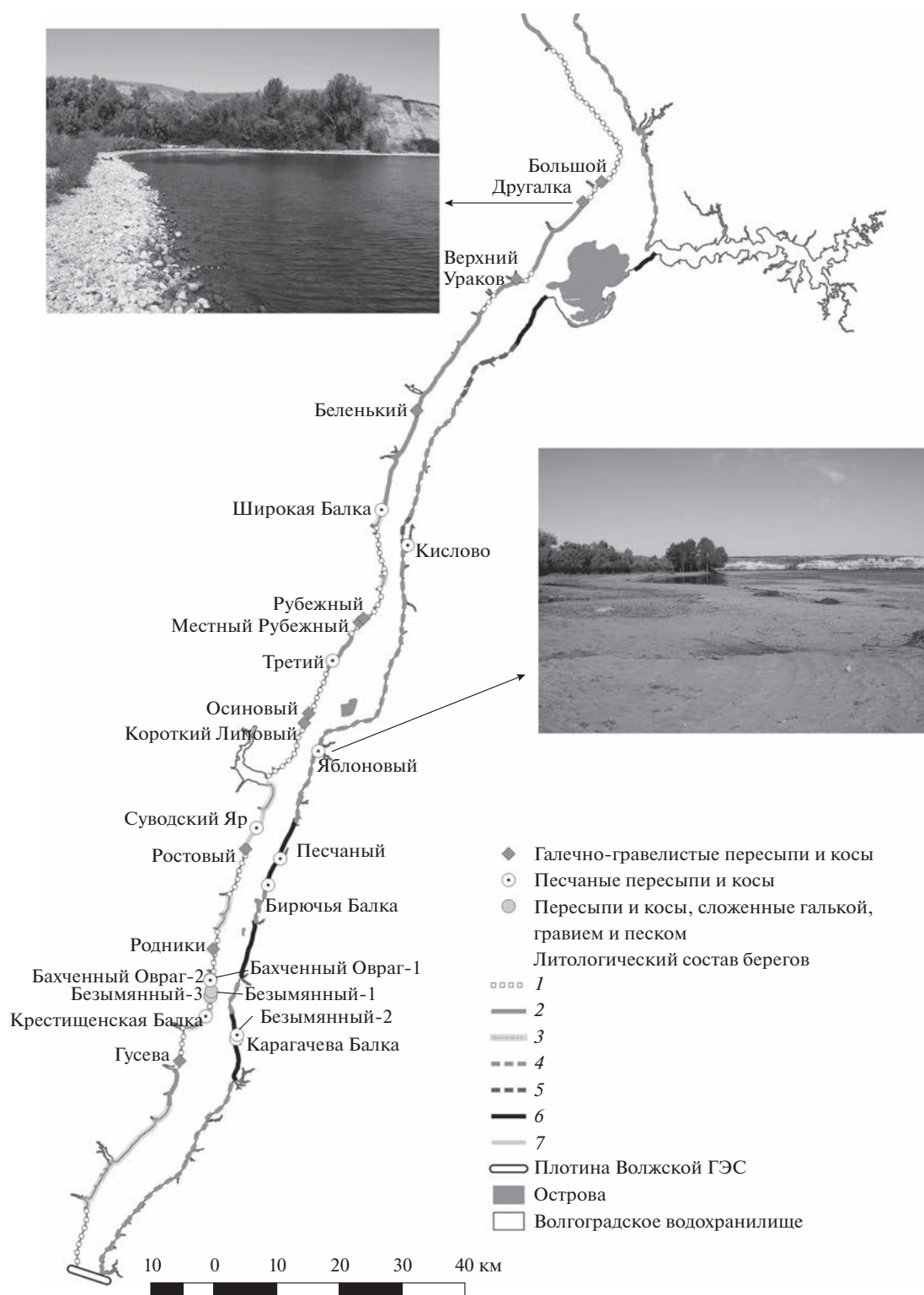


Рис. 1. Преобладающая фракция наносов пересыпей и литологический состав берегов Волгоградского водохранилища: 1 — опoки, песчаники (в том числе опoковидные и кремнистые), опoковидные глины; 2 — суглинки, песчаные глины с опoками и опoковидными песчаниками в нижней части; 3 — слабо уплотненные пески и песчаники с тонкими пластами глин; 4 — супеси, суглинки, местами выходы хвалынских глин; 5 — суглинки, супеси, местами выходы песка и хвалынских глин; 6 — хвалынские шоколадные глины и суглинки под маломощным слоем песка; 7 — белые пески и серые песчаники на контакте с пластом ржавого песка.

Составлено авторами на основе данных Е.В. Милановского (1940), А.И. Барановой (1964), А.В. Сидоренко (1967) и др. и собственных материалов 2019–2020 гг. (Baranova, 2019 и др.).

себя: отбор проб наносов на гранулометрический анализ, визуальную характеристику литологического состава берега вблизи входного створа залива. Аналитические методы: гранулометрический анализ, графический и математические методы, в том числе метод математической статистики.

Гранулометрический анализ проб наносов проводился ситовым способом с использованием комплекта сит лабораторных из набора КСИ (размером 5–0.05 мм) и методом обмера частиц вручную с помощью линейки (размером более 5 мм). Анализ проводился по ГОСТ 12536-2014 (2019) и по Наставлению гидрометеорологическим станциям и постам 1978 г.¹ В соответствии с тем же «Наставлением» 1978 г. проведена классификация наносов по размерам частиц.

Статистическая обработка полученных данных проведена по интегральным кривым в программе Microsoft Excel и с помощью метода квартилей, представленного П. Траском (1932). Последний является одним из способов количественной оценки статистических характеристик частиц наносов по размерам. Общее число гранулометрических фракций описывается тремя значениями: M_d – медиана, Q_1 – первая и Q_3 – третья квартиль. На интегральной кривой через ординаты строят горизонтальные линии, соответствующие диаметру частиц 25, 50, 75% обеспеченности, пока они не пересекутся с кумулятивной кривой. Коэффициент сортировки S_0 показывает уровень однообразия частиц данной совокупности, а медиана M_d – среднюю величину частиц наносов (Мясникова, Потехин, 2021). Коэффициент сортировки рассчитан по формуле:

$$S_0 = \sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}},$$

где S_0 – коэффициент сортировки;

Q_1 и Q_3 – первая и третья квартиль соответственно.

Степень окатанности частиц наносов (K_o) была определена по формуле Р.Д. Рассела и Р.Е. Тейлора (1937) в интерпретации Ф. Дж. Петтиджона (1981):

$$K_o = \frac{0n_0 + 1n_1 + 2n_2 + 3n_3 + 4n_4}{\sum n} \times 25,$$

где K_o – степень окатанности частиц, %;

0, 1 ... 4 – баллы окатанности;

¹ ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2019; Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Ч. I. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 384 с.

$n_0, n_1 \dots n_4$ – число зерен, обладающих соответствующим баллом;

n – общее число зерен.

В зависимости от способа транспортировки наносы подразделяются на взвешенные, переносимые течениями во взвешенном состоянии, и влекомые, перемещаемые в придонном слое потока путем перекачивания, скольжения и сальтации (Караушев, 1977; Шамоу, 1959). Как указано выше, из зоны волноприбоя к внешнему краю отдели удаляются частицы, приводимые течениями в состояние взвеси. У уреза остаются наносы, большей частью переносимые потоком во влекомом состоянии. Поэтому расчет скоростей, образующих прибрежные формы рельефа, проведен нами для влекомых наносов.

Скорости вдольбереговых волноприбойных течений, формирующих устьевые абразионно-аккумулятивные пересыпи и косы, были рассчитаны по формулам Г.И. Шамова (1959) и В.Н. Гончарова (1954). Формулы Г.И. Шамова имеют вид:

$v = 3.7d^{\frac{1}{3}}H^{\frac{1}{6}}$ (для отдельных частиц влекомых наносов),

$v = 6d^{\frac{1}{3}}H^{\frac{1}{6}}$ (начало массового движения влекомых наносов),

где v – скорость течения, м/с;

d – диаметр частиц наносов, м;

H – средняя глубина потока, м.

Формула В.Н. Гончарова для расчета скорости течения:

$$v = \sqrt{2} \lg \left(8.8 \frac{H}{d} \right) \sqrt{2 \times \frac{g(p_s - p)}{3.5p} d},$$

где v – скорость течения, м/с;

d – диаметр частиц наносов, м;

H – средняя глубина потока, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

ρ_s – плотность частиц наносов, кг/м³;

ρ – плотность воды, кг/м³.

Скорости транспортировки частиц наносов были рассчитаны по формуле В.В. Романовского, представленной А.В. Караушевым (1977):

$$v_q = \alpha \left(v_{cp} - v_{нач} \sqrt{\frac{f}{f_0}} \right),$$

где v_q – скорость транспортирования частиц, м/с;

v_{cp} – средняя скорость потока на вертикали, м/с;

$v_{нач}$ – начальная скорость влечения частиц наносов, м/с (рассчитана по формулам, приведенным выше);

α – коэффициент перехода от донной скорости потока к средней скорости на вертикали;

f — динамический коэффициент трения;

f_0 — статический коэффициент трения.

Полученные скорости транспортирования частиц были использованы для вычисления расстояний, на которое наносы переносятся водным потоком.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде чем перейти к результатам настоящего исследования, рассмотрим подробнее процессы переработки берегов Волгоградского водохранилища и образования пересыпей и последствия данных процессов для экосистемы водоема.

1. Процессы переработки берегов Волгоградского водохранилища и образования абразионно-аккумулятивных пересыпей.

До создания Волгоградского водохранилища (1958 г.) рельеф волжского русла и поймы был сформирован естественным гидрологическим режимом Волги. Основной причиной береговых деформаций выступала русловая эрозия. Грядовый речной перенос превалировал в процессе стока наносов. На будущих речном и озерно-речном участках в донном субстрате русла преобладал среднезернистый песок (0.5–0.2 мм). На будущем озерном участке в составе донных наносов господствовала смесь пылеватых частиц (<0.1 мм) с мелкой фракцией песка (0.2–0.1 мм), насыщенная илом (<0.01 мм) (Филиппов, 2004).

После создания водохранилища р. Волга стала слабопроточным водоемом; возникли благоприятные условия для развития ветровых волн, особенно в нижней (озерной) части. На озерном участке водохранилища ведущим геоморфологическим процессом стал размыв берегов. В меньшей степени здесь распространены овражно-балочная эрозия (особенно на правобережье) и эоловая дефляция склонов (Филиппов, 2004). На озерно-речном и речном участках над размывом берегов преобладают эрозионно-аккумулятивные процессы (Баранова и др., 2016).

Темп размыва берегов за весь период существования водохранилища у левого берега равен 4.4–5.9 м/год, у правого — 0.1–1.8 м/год (Филиппов, 2004). В настоящее время среднегодовые темпы отступления несколько снизились и составляют на левом берегу — 1.3–2.1 м/год, на правом — 0.1–0.4 м/год (Баранова и др., 2016).

Вдольбереговой транспорт наносов Волгоградского водохранилища определяется воздействием не стоковых, а вдольбереговых ветровых и волноприбойных течений, которые обладают высокой транспортирующей способностью (Филатова, 1972). В зоне уреза скорости течений достигают максимума (Филиппов, 2004). Волноприбойная зона при слабом и умеренном волнении

занимает часть отмели, при максимальном волнении — всю отмель (Филатова, 1972).

В приходной части баланса наносов Волгоградского водохранилища в целом большая доля принадлежит размыву (абразии) берегов (73.4%); поступление наносов через плотину Саратовской ГЭС составляет 19.9%, приток наносов с бассейна водоема — 6.7%. Расходная часть баланса — только сток наносов через плотину Волжской ГЭС. Величину его можно принять равной притоку через Саратовскую ГЭС (Филиппов, 2004). Приходную часть баланса наносов ААП практически полностью составляет вдольбереговой транспорт. На озерном участке наносы поступают на пересыпи с постоянным стоком только малых рек (Щербаковка, Даниловка, Камышинка и др.). Поставляемый ими объем наносов очень незначителен по сравнению с принесенным вдольбереговым транспортом.

“Абразионно-аккумулятивная пересыпь” — это замыкающая аккумулятивная форма рельефа во входном створе залива, образованная вследствие седиментации продуктов размыва (абразии) берегов. Пересыпь является составной частью прибрежной отмели и включает в себя как надводную, так и подводную ее части во входном створе залива. Началом для каждой ААП служит внешний край прибрежной отмели, окончанием — береговой уступ пересыпи в заливе. “Коса” — это свободная аккумулятивная форма рельефа, включающая только надводную часть прибрежной отмели во входном створе залива (Баранова и др., 1967; Леонтьев, 1961).

Схему образования типичной ААП можно представить следующим образом. Сначала возникает донный порог и надводный аккумулятивный выступ у одного или обоих берегов залива. По мере нарастания надводный выступ превращается в свободную аккумулятивную форму (косу), а донный порог распространяется по всей ширине входного створа. Косы в процессе роста соединяются и образуется замыкающая форма рельефа — абразионно-аккумулятивная пересыпь (Баранова и др., 1967; Леонтьев, 1961).

По степени сформированности устьевых пересыпей заливы Волгоградского водохранилища были классифицированы нами как открытые, в начальной стадии отделения, в активной стадии отделения, в завершающей стадии отделения, закрытые и заливы, входные створы которых подвергались антропогенному воздействию.

2. Заращение пересыпи и акватории залива.

Последствиями процесса отделения заливов является изменение их экологического состояния в сторону ухудшения. Закрытые заливы (особенно малые) проявляют признаки деградации экосистемы: накопление большого количества биогенных веществ, повышение концентраций

главных ионов в воде, зарастание, занесение и заиливание, дефицит растворенного кислорода в придонном горизонте и др. На процессах зарастания пересыпей и заливов остановимся подробнее.

В зависимости от субстрата, возраста и расположения на пересыпях формируются два типа фитоценозов:

– первый фитоценоз представлен разновозрастной древесно-кустарниковой растительностью и образуется на ААП закрытых (закрывающихся) заливов на каменистом и песчаном субстратах. Как правило, он встречается на правом берегу Волгоградского водохранилища (заливы Рубежный, Бахченый Овраг-1 и др.), реже — на левом берегу (залив Бирючья Балка) (Кочеткова и др., 2020);

– второй фитоценоз назван нами прибрежно-водным и для него характерно образование густых зарослей высшей водной растительности (ВВР, макрофитов) у входного створа в залив на глинистом, суглинистом и песчаном субстратах. Данный тип фитоценоза больше распространен на левобережье Волгоградского водохранилища (заливы Яблоньский, Песчаный и др.), но встречается и на правом берегу (заливы Широкая Балка, Крутой) (Кочеткова и др., 2020).

Наблюдения авторов за фитоценозами в многолетнем аспекте выявили активное зарастание акваторий всех заливов, начиная с верховья и сильное зарастание закрытых заливов. Флористическое разнообразие закрытых заливов озерного участка водоема насчитывает 50 видов растений из 42 родов, 28 семейств и 3 отделов (Кочеткова, 2013). В закрытых заливах с большой площадью мелководной зоны и небольшой средней глубиной создаются условия лимнической экосистемы с отсутствием проточности, что в свою очередь положительно сказывается на вегетации макрофитов. Акватории малых заливов активно зарастают гидрофитами: роголистником погруженным (*Ceratophyllum demersum* L.) с отдельными группами рдеста пронзеннолистного (*Potamogeton perfoliatus* L.), рдеста блестящего (*Potamogeton lucens* L.), урути колосистой (*Myriophyllum spicatum* L.), ряски трехдольной (*Lemna trisulca* L.), многокоренника обыкновенного (*Spirodela polyrrhiza* (L.) Schleid.), водокраса лягушачьего (*Hydrocharis morsus-ranae* L.), сальвинии плавающей (*Salvinia natans* (L.) All.).

Среди гелофитов доминируют формации тростника высочайшего (*Phragmites altissimus* (Benth.) Nabile), тростника южного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), рогоза узколистного (*Typha angustifolia* L.). Иногда около входного створа залива встречается осока береговая (*Carex riparia* Curt.) и ежеголовник прямой (*Sparganium erectum* L. (S. ramosum Huds.)). Гелофиты, как правило, образуют сплошное зарастание своего биотопа по периметру мелководной зоны залива.

3. Гранулометрический состав наносов устьевых абразионно-аккумулятивных пересыпей.

В гранулометрическом составе наносов устьевых абразионно-аккумулятивных пересыпей заливов Волгоградского водохранилища присутствуют фракции размером от 100–50 мм (крупная галька) до 0.05 мм и менее (мелкие пылеватые частицы). Отличия в величине преобладающей фракции связаны с литологическим составом берегов водохранилища.

Право- и левобережье Волгоградского водохранилища имеют принципиальные отличия по геологическому строению, литологическому составу береговых склонов. Правый берег сложен более древними и очень устойчивыми к размыву породами. Здесь представлены верхнемеловые породы (темно-серые и желтовато-серые опоки, черные плитчатые кремнистые глины с мало-мощным глауконитовым песчаником в основании, серые и темно-серые мергелистые глины) и породы палеогенового периода (опоки, слюдястые зеленовато-серые песчаники). Левый берег сложен относительно рыхлыми, слабоустойчивыми к размыву отложениями более молодого возраста. В литологическом составе преобладают суглинки, пластинчатые трещиноватые глины, супеси и слабо уплотненные или рыхлые пески (эолового и древнеаллювиального происхождения). Отмечены выходы плотных хвалыньских глин, которые служат сдерживающим фактором размыва (Баранова, 1964; Милановский, 1940; Сидоренко, 1967; Филиппов, 2004; и др.). Поэтому наблюдаются отличия в гранулометрическом составе наносов на право- и левобережье водоема и, как следствие, наносообразующих скоростях течения.

Литологический состав берегов вблизи входного створа залива определен на основе материалов Е.В. Милановского (1940), А.И. Барановой (1964), А.В. Сидоренко (1967) и других ученых и результатов собственных наблюдений 2019–2020 гг. (Ваганова, 2019 и др.). Преобладающая фракция наносов, слагающих ААП и косы, во взаимосвязи с литологическим составом берегов водоема представлена на рис. 1. Правобережье составляет устьевые формы рельефа гальку и гравий всех фракций, крупные пылеватые фракции, в меньшей степени — песок всех фракций. Левобережье — принципиально другой по составу материал — песок всех фракций, в меньшей степени — крупные пылеватые частицы, гравий и гальку.

В составе наносов пересыпей и кос *правобережных заливов* Волгоградского водохранилища, в одних случаях, преобладает крупная (до 79.6%) и средняя галька (до 87.0%). В других случаях преобладающей становится средняя (до 84.0%) и мелкая фракция песка (до 82.0%). На ААП и косах правобережных заливов, сложенных, преимуще-

ственно, галькой и гравием, отмечены наносы размером от 100–50 мм (крупная галька) до 10–5 мм (крупный гравий). Например, на пересыпях заливов Большой, Другалка, левосторонней косе залива Верхний Ураков и др. Однако, встречаются частицы и более мелкого размера, вплоть до пылеватых (правосторонняя коса залива Бельский, левосторонняя коса залива Гусева, пересыпь залива Короткий Липовый и др.). В составе наносов ААП и кос заливов правого берега, сложенных преимущественно песчаными фракциями, преобладают средние (0.5–0.2 мм) и мелкие фракции песка (0.2–0.1 мм). Например, на ААП заливов Бахченый Овраг-1, Бахченый Овраг-2, Крестищенская балка, Суводский Яр. Размер частиц наносов варьирует от 2–1 мм (мелкий гравий) до 0.1–0.05 мм (крупные пылеватые частицы). Практически во всех пробах выявлен небольшой процент фракций размером менее 0.05 мм (мелкие пылеватые и иловатые частицы). В отдельных пробах встречаются более крупные фракции: от 50–20 мм (средняя галька), 20–10 мм (мелкая галька) (на ААП заливов Бахченый Овраг-1, Бахченый Овраг-2, Третий), 10–5 мм (крупный гравий), 5–2 мм (средний гравий). Например, на пересыпях заливов Бахченый Овраг-1, Бахченый Овраг-2, Крестищенская Балка, Безымянный-1.

На ААП и косах *левобережных заливов* преобладает средняя фракция песка (размером 0.5–0.2 мм; до 91.4%), отмечены частицы размером менее 0.05 мм. Например, на правосторонней косе залива Песчаный, на пересыпях заливов Бирючья Балка, Безымянный-2 и др. Размер наносов левобережных ААП составляет от 10–5 мм (крупный гравий) до 0.05 мм и менее (мелкие пылеватые, иловатые и глинистые частицы). В отдельных пробах с правосторонних кос заливов Кислово, Песчаный и левосторонней косы залива Яблоновы отмечены более крупные фракции размером 50–20 мм (средняя галька), 20–10 мм (мелкая галька).

Важной характеристикой воздействия водного потока и его скорости на переносимые частицы служит степень их окатанности. Окатанность резко увеличивается в начале переноса, затем изменение этого показателя происходит постепенно. Высокая степень окатанности отвечает уже первым километрам переноса (Петтиджон, 1981). Во всех пробах частицы на пересыпях заливов Волгоградского водохранилища оказались окатанными или хорошо окатанными. Значения коэффициента окатанности (K_o) варьируют от 0.60 до 0.85 (табл. 2). Это свидетельствует о том, что данные частицы были принесены водным потоком в ходе вдольберегового транспорта и могут быть отнесены к наносам. Значения K_o в пределах одной ААП или косы в большинстве случаев практически не

отличаются. На некоторых пересыпях разница коэффициента на гребне и урезе достигает 0.10–0.14, что связано с сортировкой материала и разницей в транспортирующих скоростях течения.

Первичная статистическая обработка данных по гранулометрическому составу речных наносов заключается в определении гранулометрических параметров $d_{5\%}$, $d_{10\%}$, $d_{25\%}$, $d_{50\%}$, $d_{75\%}$, $d_{90\%}$, $d_{95\%}$. Индекс при d показывает, какой процент частиц меньше данного размера d содержится в составе данной пробы наносов. Значения этих параметров определяются по интегральной (кумулятивной) кривой гранулометрического состава². Интегральные кривые были построены нами в программе Microsoft Excel по возрастанию размера фракций (от более мелких к более крупным) (рис. 2).

В связи тем, что результаты, полученные по интегральным кривым, отличаются пониженной точностью, для определения гранулометрических параметров была подготовлена программа на основе Microsoft Excel “Гранулометрия; интегральная кривая”, позволяющая производить необходимые расчеты для каждой пробы наносов. В программу было введено процентное содержание каждой фракции по массе, размер наиболее крупной частицы (x) и исходные данные, характеризующие пробу (№ пробы, название залива, место отбора, время и дата). В качестве выходных данных мы получили рассчитанные значения $d_{5\%}$, $d_{10\%}$, $d_{25\%}$, $d_{50\%}$, $d_{75\%}$, $d_{90\%}$, $d_{95\%}$ (табл. 1).

Эффективный диаметр частиц наносов 90%-й обеспеченности ($d_{90\%}$) характеризует скорости течения, формирующие поток наносов. Рассчитанные значения $d_{90\%}$ в зависимости от преобладающей фракции наносов в пробе колеблются от 0.25 мм (на абразионно-аккумулятивной отмели около входного створа залива Бахченый Овраг-1) до 87.40 мм (на урезе левосторонней косы залива Местный Рубежный). Пересыпи и косы с преобладанием в составе крупных и средних фракций (100–5 мм) отличаются средними значениями $d_{90\%}$ равными 46.1–50.0 мм. ААП и косы с преобладанием в составе мелких фракций (5–0.05 мм) характеризуются средними значениями $d_{90\%}$ равными 0.58–0.90 мм. Значения $d_{90\%}$, как правило, сильно отличаются на гребне пересыпи и на урезе Волгоградского водохранилища.

Приближенную характеристику степени сортировки материала наносов дает метод квартилей П. Траска (1932) и рассчитанный по этому методу коэффициент сортировки S_0 (Мясникова, Потехин, 2021). По значениям S_0 изученные нами пробы наносов оказались хорошо (1.13–1.57), средне (1.58–2.08) и плохо (2.23–14.40) отсортированы.

² Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Ч. I. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 384 с.

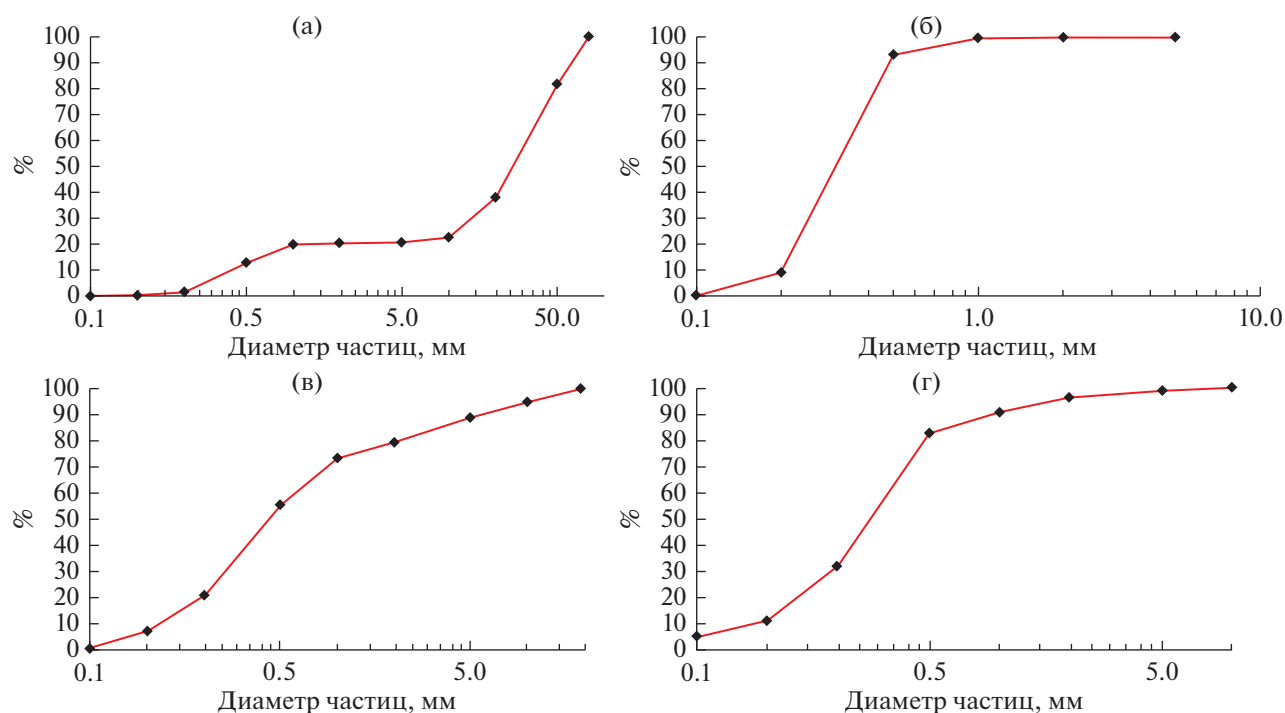


Рис. 2. Интегральные кривые гранулометрического состава наносов ААП правобережного залива Бахченный Овраг-1 ((а) – урез водохранилища, (б) – гребень пересыпи) и левобережного залива Бирючья Балка ((в) – урез водохранилища, (г) – гребень пересыпи).

Пробы с разных участков одной пересыпи или косы, как правило, имеют разную степень сортировки, за исключением нескольких заливов. Все пробы хорошо отсортированы на пересыпях заливов Другалка, Большой, Крестищенская Балка, Суводский Яр, Безымянный-2, левосторонней косе залива Верхний Ураков, правосторонней косе залива Местный Рубежный. Хорошая степень сортировки говорит об однородности скоростей течения, образующих данные формы рельефа. Обе пробы плохо сортированы на ААП залива Третий, обе пробы средне сортированы на левосторонней косе залива Осинový. Разная степень сортировки в пределах одной ААП свиде-

тельствует о неравномерности ее образования во времени при различных скоростях течения.

Пробы наносов с середины ААП или косы почти во всех случаях хорошо сортированы, только в двух случаях – средне отсортированы. Пробы, взятые на абразионно-аккумулятивных отмелях, в большинстве случаев хорошо сортированы. Пробы с урезом Волгоградского водохранилища, как правило, плохо отсортированы, лишь в нескольких случаях – средне отсортированы. Такая закономерность связана с высокой динамикой приустьевой части пересыпи, различиях в высоте волны и скоростях течений, ее формирующих.

Таблица 1. Пример расчета гранулометрических параметров в программе “Гранулометрия; интегральная кривая”

№ пробы, название залива, место отбора	Дата и время отбора	x , мм	$d_{5\%}$, мм	$d_{10\%}$, мм	$d_{25\%}$, мм	$d_{50\%}$, мм	$d_{75\%}$, мм	$d_{90\%}$, мм	$d_{95\%}$, мм
60, Другалка; ААП, урез водохранилища	29.07.2020 18:30	37.0	2.26	2.70	4.02	6.71	9.78	16.74	19.30
30, Суводский Яр; ААП, урез залива	28.07.2019 14:02	7.0	0.15	0.20	0.27	0.37	0.48	0.77	0.89
25, Песчаный; гребень правобережной косы	27.06.2019 11:29	5.0	0.14	0.18	0.25	0.33	0.42	0.47	0.48
71, Кислово; урез правобережной косы	30.07.2020 13:03	29.0	0.29	0.39	0.78	1.62	3.38	4.83	11.02

Таблица 2. Оценочный расчет передвигающих наносы скоростей течений по Г.И. Шамову (1959) и В.Н. Гончарову (1954) и степень окатанности частиц, формирующих пересыпи

Название залива	Абразионно-аккумулятивная форма рельефа	Гребень ААП или косы			Урез Волгоградского водохранилища		
		$d_{90\%}$, мм	$V_{\text{теч}}$, м/с	K_o	$d_{90\%}$, мм	$V_{\text{теч}}$, м/с	K_o
1	2	3	4	5	6	7	8
Правобережные заливы							
Другалка	ААП	42.35	2.63–2.70	0.74	16.74	1.88–1.99	0.80
Большой	ААП	81.58	3.32–3.36	0.61	81.73	3.32–3.37	0.67
Верхний Ураков	Левосторонняя коса	70.51	3.15–3.20	0.82	87.21	3.40–3.45	0.83
Бахченый Овраг-1	ААП	0.49	0.47–0.61	0.66	63.87	3.04–3.10	0.71
Бахченый Овраг-2	ААП	0.58	0.50–0.65	0.69	58.25	2.96–3.01	0.74
Крестищенская Балка	ААП	0.48	0.47–0.61	0.74	0.58	0.50–0.65	0.80
Безымянный-1	ААП	—	—	—	60.43	2.99–3.05	0.68
Третий	ААП	50.91	2.84–2.90	0.79	20.58	2.05–2.14	0.77
Рубежный	Правосторонняя коса	77.67	3.26–3.30	0.78	49.98	2.83–2.89	0.80
Суводский Яр	ААП	0.91	0.60–0.75	0.77	0.90	0.60–0.75	0.78
Гусева	Левосторонняя коса	46.15	2.73–2.79	0.71	52.69	2.87–2.93	0.69
Ростовый	ААП	55.60	2.92–2.97	0.73	75.39	3.22–3.27	0.77
Короткий Липовый	ААП	48.40	2.79–2.85	0.60	70.40	3.14–3.20	0.84
Родники	Правосторонняя коса	59.49	2.98–3.03	0.75	36.48	2.47–2.55	0.66
Широкая Балка	Правосторонняя коса	29.23	2.28–2.36	0.78	56.71	2.93–2.99	0.77
Безымянный-3	Левосторонняя коса	48.85	2.80–2.86	0.70	64.46	3.05–3.11	0.71
Беленький	Правосторонняя коса	56.43	2.93–2.99	0.77	35.05	2.43–2.51	0.74
Беленький	Левосторонняя коса	56.47	2.93–2.99	0.75	41.70	2.61–2.68	0.80
Местный Рубежный	Правосторонняя коса	48.71	2.80–2.86	0.80	54.20	2.89–2.95	0.74
Местный Рубежный	Левосторонняя коса	46.18	2.73–2.79	0.78	87.40	3.41–3.45	0.81
Осиновый	Правосторонняя коса	—	—	—	0.96	0.62–0.77	0.80
Осиновый	Левосторонняя я коса	37.69	2.50–2.58	0.82	17.71	1.92–2.03	0.82
Левобережные заливы							
Песчаный	Правосторонняя коса	0.47	0.46–0.60	0.85	4.50	1.14–1.28	0.72
Бирючья Балка	ААП	0.95	0.62–0.76	0.74	5.87	1.26–1.40	0.69
Безымянный-2	ААП	0.47	0.47–0.61	0.78	0.47	0.47–0.61	0.77
Яблонный	Левосторонняя коса	0.97	0.62–0.77	0.75	9.12	1.50–1.63	0.74
Кислово	Правосторонняя коса	0.50	0.48–0.62	0.84	4.83	1.18–1.32	0.74

Гранулометрический состав наносов служит косвенным признаком динамики и нарастания уже сформированной пересыпи. Во всех пробах наносов ААП залива Другалка в июле 2019 г. преобладала крупная (100–50 мм) и средняя галька (50–20 мм). В пробах 2020 г., взятых на ААП около уреза Волгоградского водохранилища, преобладала мелкая галька (20–10 мм) и крупный гравий (10–5 мм). Это говорит о некотором нарастании пересыпи со стороны водохранилища. Аналогичный процесс мы наблюдали на правосторонней косе залива Широкая Балка, несмотря на то, что все пробы были отобраны в июле 2020 г. В пробе со “старой”

части косы, ближе к береговому уступу, подавляющее большинство наносов относилось к фракции среднезернистого песка (0.5–0.2 мм). В середине “новой” части косы, формирующейся ближе к отмели, наряду с фракцией среднезернистого песка преобладала фракция средней гальки (50–20 мм). На урезе “новой” части косы доминирующей была средняя (50–20 мм) и крупная галька (100–50 мм).

4. Скорости вдольбереговых волноприбойных течений, формирующие абразионно-аккумулятивные пересыпи.

Таблица 3. Скорости влечения наносов и расчетное расстояние, которое частицы могут пройти за 3 ч воздействия “шторма”

x , мм	$v_{\text{ч}}$, км/час	L за 3 ч воздействия “шторма”, км	x , мм	$v_{\text{ч}}$, км/час	L за 3 ч воздействия “шторма”, км
100	1.52	3.0	2	0.98–8.80	17.6
50	0.22–3.87	7.7	1	1.83–9.06	18.1
20	2.87–6.56	13.1	0.5	2.34–9.20	18.4
10	1.08–7.62	15.2	0.2	2.55–9.27	18.5
5	2.25–8.45	16.9	0.1	2.74–9.35	18.7

Примечание. x – размер наиболее крупной фракции наносов в пробе; $v_{\text{ч}}$ – скорость движения частиц наносов; L – расчетное расстояние, которое могут пройти частицы наносов.

В.В. Законнов, А.В. Законнова, А.И. Цветков, Н.Г. Шерышева (2018) отмечают, что скорости течения выше средних формируют основной гранулометрический скелет осадков, а меньше средних – насыщают его структуру тонкодисперсными частицами. При максимальных скоростях течения происходит размыв дна и берегов, сортировка наносов по крупности; а при слабых градиентах скоростного режима создаются условия для накопления тонкодисперсных фракций (Законнов и др., 2018).

В настоящем исследовании мы выполнили оценочный расчет скоростей вдольбереговых волноприбойных течений ($V_{\text{теч}}$), образующих устьевые абразионно-аккумулятивные пересыпи и косы. Скорости подобных течений мы будем называть *нанософормирующими*. Был применен косвенный метод, основанный на гранулометрическом анализе проб наносов (значения $d_{90\%}$). Расчет произведен с использованием формул Г.И. Шамова (1959) и В.Н. Гончарова (1954), так как эти формулы обеспечивают наилучшую сходимость результатов. Рассчитанные скорости течений характерны для “штормовых” условий на водохранилище. Под “штормовыми условиями” в своем исследовании мы будем понимать скорость ветра 10 м/с и более. В табл. 2 приведен оценочный расчет скоростей течения, способных привести в движение частицы наносов и создающих ААП и косы во входных створах заливов.

В табл. 2 видно, что скорость течения варьирует от 0.5 до 3.5 м/с. ААП и косы сформированы в различных “штормовых условиях”. Об этом говорят значения $V_{\text{теч}}$ в пределах двух кос в устье одного залива (Местный Рубежный, Осиновый) или на гребне и урезе одной ААП (Бахченский Овраг-1, Биручья Балка и др.). Применяемая методика расчета скорости была апробирована О.В. Филипповым (2004). Автором проведено вычисление оценочных скоростей течения на прибрежных отмелях участков многолетних наблюдений за пе-

реформированием берегов Волгоградского водохранилища. Значения скорости в зоне волноприбоя варьирует от 0.3 до 3.6 м/с. Полученные в настоящей статье значения скоростей, образующих пересыпи, сопоставимы с этими результатами.

В результате исследования выявлены отличия в нанософормирующих скоростях течения на право- и левобережье водохранилища. На правобережье скорости изменяются от 0.47–0.61 до 3.40–3.45 м/с, на левобережье – от 0.47–0.61 до 1.50–1.63 м/с. Это вывод является одной из выявленных нами закономерностей процесса формирования ААП. Полученные закономерности могут быть применены при изучении процесса формирования устьевых ААП заливов на других водохранилищах зоны недостаточного увлажнения России (например, Куйбышевское и Цимлянское).

Меньшие значения $V_{\text{теч}}$ на левом берегу Волгоградского водохранилища связаны с литологическим составом. Здесь преобладают супеси и суглинки (см. рис. 1), поставляющие на пересыпи, в основном, песчаные фракции. В очень небольшом количестве в зону волноприбоя попадает галечно-гравелистый материал. Поэтому, чтобы привести в движение влекомые наносы в зоне волноприбоя у левого берега требуются меньшие скорости течения.

Переформирование профиля береговой зоны и перераспределение фракций наносов начинается сразу после начала волнового воздействия и наиболее интенсивно происходит в течение первых 3–6 ч (Гуров и др., 2019). На Волгоградском водохранилище наиболее распространены “штормовые условия” продолжительностью 3–9 ч. По полученным скоростям течения были рассчитаны скорости транспортировки частиц наносов ($v_{\text{ч}}$) вдольбереговыми волноприбойными течениями (табл. 3). Были вычислены расстояния (L), на которые могут переноситься частицы наносов в течение 3, 6 и 9 ч. Следует отметить, что расчет был

проведен в общем виде без учета характера движения частиц наносов и их приостановки в процессе движения.

Скорости транспортировки наносов рассчитаны по формуле В.В. Романовского (1974). А.В. Караушев (1977) указывает, что данное решение является достаточно общим и может использоваться для расчета движения влекомых наносов, не зависимо от вида движения. Представленная формула учитывает уравнения скорости частицы и при разгоне, и при замедлении движения. В.В. Романовским (1974) установлено, что скорость перемещения частиц по дну не зависит от размера выступов и шероховатости дна, а является функцией донной скорости потока и формы частиц (Караушев, 1977). Расчеты произведены нами для прибрежной отмели, которую можно считать однородной. Поэтому морфологические особенности дна не учитывались при вычислении скорости.

За 3 ч наносы с преобладанием в составе гравелистых, песчаных и крупных пылеватых фракций могут переместиться на 15–19 км, а наносы, состоящие в основном из галечных фракций – на 3–13 км (см. табл. 3). Расчет перемещения наносов за 6–9 ч дал результаты в несколько десятков км. На наш взгляд, полученные данные несколько завышены, и реальные расстояния будут меньше. Потому что гранулометрический состав наносов пересыпей и кос соответствует литологическому составу берегов водохранилища вблизи устья залива (см. рис. 1). На участках правого берега с преобладанием в литологическом составе опоки и песчаников на устьевых ААП господствуют галечные и гравелистые фракции (заливы Большой, Рубежный, Гусева и др.). На участках с преобладанием суглинков, слабо уплотненных песков и песчаников на пересыпях преобладают песчаные фракции (Крестинская Балка, Третий, Широкая Балка и др.). На левобережье, сложенном супесями и суглинками, на пересыпях господствуют песчаные фракции (Карагачева Балка, Кислово, Яблонный и др.). Следует отметить, что протяженность береговой линии водохранилища, не прерываемой мысами или входными створами заливов, не превышает 20 км, но как правило, это значение составляет 5–10 км. Поэтому перемещаемые наносы аккумулируются не далеко от источника поступления. Авторы предполагают, что седиментация наносов через 6–9 ч произойдет на расстоянии, не превышающем 15–19 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов настоящего исследования позволил сделать следующие выводы:

1. В формировании абразионно-аккумулятивных пересыпей и кос принимают участие наносы размером от 100–50 мм (крупная галька) до 0.05 мм и менее (мелкие пылеватые частицы). Различия в размерах фракций связаны с литологическим составом берегов водохранилища вблизи входного створа залива и нанософормирующих скоростях вдольберегового течения и волноприбойных направлениях ветра и его скорости.

2. Составляющие пересыпи и косы наносы являются окатанными или хорошо окатанными (со значениями коэффициента окатанности 0.60–0.85), что свидетельствует о том, что они были принесены водным потоком в ходе вдольберегового транспорта.

3. В результате исследования выявлены отличия в гранулометрическом составе пересыпей на право- и левобережье водоема. В составе наносов пересыпей и кос *правобережных заливов* Волгоградского водохранилища, сложенных преимущественно галькой и гравием, преобладает крупная (100–50 мм) и средняя галька (50–20 мм), а на ААП и косах, сложенных преимущественно песчаными фракциями, господствуют средние (0.5–0.2 мм) и мелкие фракции песка (0.2–0.1 мм). В составе наносов пересыпей и кос *левобережных заливов* преобладает средняя фракция песка (размером 0.5–0.2 мм), отмечены частицы размером менее 0.05 мм.

4. Гранулометрический состав выступает индикатором наносообразующих скоростей течения в “штормовых условиях”. На правобережье водоема скорости течения составляют от 0.47 до 3.45 м/с, на левобережье – от 0.47 до 1.63 м/с.

5. Пробы наносов устьевых ААП имеют разную степень сортировки (1.13–14.40), что говорит о различиях в скоростях течений, формирующих данные формы рельефа в разные временные периоды. Пробы с гребня ААП или косы почти во всех случаях хорошо сортированы. Пробы наносов с урезов Волгоградского водохранилища, как правило, плохо отсортированы, что связано с высокой динамикой приурезной части пересыпи, различиях в скоростях течений, ее формирующих и высоте волны.

6. Гранулометрические параметры являются косвенными признаками динамики уже сформированной пересыпи. По размерам частиц наносов возможно судить о нарастании ААП во времени со стороны Волгоградского водохранилища.

7. Гранулометрический состав наносов абразионно-аккумулятивных пересыпей соответствует литологическому составу берегов Волгоградского водохранилища вблизи устья залива. Седиментация влекомых и взвешенных наносов происходит на близком расстоянии от источника поступления (не более 15–19 км).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 19-45-343002 р_мол_а “Закономерности формирования абразионно-аккумулятивных пересыпей во входных створах заливов озерного участка Волгоградского водохранилища”.

FUNDING

The reported study was funded by RFBR and Administration of Volgograd oblast according to the research project no. 19-45-343002 r_mol_a “The patterns of formation of abrasion-accumulative jumpers in the entrance gates of the bays of lake area of the Volgograd Reservoir.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранова А.И.* Геолого-геоморфологическая характеристика побережий Волгоградского водохранилища // Материалы к изучению переформирования берегов Волгоградского водохранилища. М.—Л.: Наука, 1964. С. 6—40.
- Баранова А.И., Зубенко Ф.С., Кудрявцева Е.Н., Радченко Э.К., Семенова Н.Н.* Изучение физико-геологических процессов на побережьях и берегах водохранилищ по аэроснимкам. Л.: Наука, Ленинград. отд., 1967. 283 с.
- Баранова М.С., Филиппов О.В., Кочеткова А.И., Брызгалова Е.С.* ГИС-технологии и спутниковые данные как инструменты мониторинга геодинамических процессов Волгоградского водохранилища // Географический вестн. 2016. № 2 (37). С. 148—160. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2016-2-148-160>
- Вендров С.Л.* Об изменении рельефа прибрежной зоны Цимлянского водохранилища // Морской и речной флот. 1953. № 5. С. 28—34.
- Гончаров В.Н.* Основы динамики русловых процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1954. 452 с.
- Гуров К.И.* Результаты мониторинга гранулометрического состава наносов береговой зоны Каламитского залива // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 3. С. 56—63. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-3-56-63>
- Гуров К.И., Удовик В.Ф., Фомин В.В.* Моделирование штормовых изменений рельефа береговой зоны и гранулометрического состава наносов в районе пересыпи оз. Богайлы (Западный Крым) // Морской геофизич. журн. 2019. Т. 35. № 2. С. 185—196. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-2-185-196>
- Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И., Шершьева Н.Г.* Гидродинамические процессы и их роль в формировании донных осадков водохранилищ Волжско-Камского каскада // Тр. ИБВВ РАН. Борок: ИБВВ им. И.Д. Папанина РАН, 2018. Вып. 81 (84). С. 35—46. <https://doi.org/10.24411/0320-3557-2018-1-0004>
- Захаров А.В., Алексеев И.А.* Социально-экологические проблемы Чебоксарского водохранилища // Изв. РАН. Сер. геогр. 2012. № 5. С. 90—101. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2012-5-90-101>
- Зубенко Ф.С.* Берега Куйбышевского водохранилища // Берега Куйбышевского водохранилища. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 154—188.
- Караушев А.В.* Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометиздат, 1977. 272 с.
- Кочеткова А.И.* Пространственно-временной анализ зарастания Волгоградского водохранилища: Дис. ... канд. биол. наук. Борок: Ин-т биологии внутр. вод им. И.Д. Папанина РАН, 2013. 226 с.
- Кочеткова А.И., Баранова М.С., Филиппов О.В., Брызгалова Е.С., Курашов Е.А.* Флористический состав фитоценозов абразионно-аккумулятивных пересыпей озерного участка Волгоградского водохранилища // Проблемы устойчивого развития и экол.-экон. безопасности регионов: Материалы XV Всерос. науч.-практ. конф. (г. Волжский, 9—10 апреля 2020 г.). Волгоград: Сфера, 2020. С. 64—75.
- Крыленко В.В., Крыленко М.В.* Исследование значимости и взаимосвязей природных факторов формирования гранулометрического состава отложений и рельефа аккумулятивных береговых форм Черного моря // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10. № 1. С. 669—675.
- Леонтьев О.К.* Основы геоморфологии морских берегов. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1961. 418 с.
- Милановский Е.В.* Очерк геологии Среднего и Нижнего Поволжья. М.—Л.: Гос. науч.-тех. изд-во нефтяной и горно-топливной лит-ры, 1940. 303 с.
- Мясникова Н.А., Потахин М.С.* Гранулометрический состав донных отложений озера Торосьярви (бассейн Белого моря) // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: География. Геоэкология. 2021. № 1. С. 45—56. <https://doi.org/10.17308/geo.2021.1/3255>
- Назаров Н.Н., Тюняткин Д.Г., Фролова И.В., Черепанов А.В.* Морфолитогенез в зоне вдольберегового переноса наносов на Камском водохранилище (ст. 2 Наносы) // Географический вестн. 2013. № 2 (25). С. 35—39.
- Петтиджон Ф.Дж.* Осадочные породы / пер. с англ. М.: Изд-во “Недра”, 1981. 751 с.
- Сидоренко А.В.* Геология СССР. Т. XI. Поволжье и Прикамье. Ч. 1. Геологическое описание. М.: Изд-во “Недра”, 1967. 605 с.
- Филатова Т.Н.* Исследование течений в озерах и водохранилищах. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 319 с.
- Филиппов О.В.* Формирование природных аквальных комплексов озерной части Волгоградского водохранилища в условиях изменения гидрологического режима: Дис. ... канд. геогр. наук. Волгоград: Волгоград. гос. архит.-строит. ун-т, 2004. 217 с.
- Чалов С.Р., Ефимов В.А.* Гранулометрический состав взвешенных наносов: характеристики, классификации, пространственная изменчивость // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2021. № 4. С. 91—103.

- Шамов Г.И. Речные наносы. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 380 с.
- Baranova M.S. The main formative material of bay's estuarial abrasion-accumulative jumpers and it's interconnection with the lithological composition of Volgograd reservoir coasts // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, VII International Scientific Practical Conference "Modern problems of reservoirs and their catchments" 30 May to 2 June 2019. Perm State Univ., Russia, 2019. Vol. 321. P. 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/321/1/012001>
- Bagnold R.A. Sand movement by waves: some small-scale experiments with sand of very low density // J. Inst. Civil Engineers. 1947. № 27. P. 447–469.
- Grottoli E., Bertoni D., Ciavola P., Pozzebon A. Short term displacements of marked pebbles in the swash zone: Focus on particle shape and size // Marine Geol. 2019. Vol. 367. P. 143–158. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.06.006>
- Hegde V.S., Krishnaprasad P.A., Shalini G., Rajawat A.S. Granulometric dynamics of the coastal sediments of the Central West coast of India: Insight into morpho-tectonic influences on the beach processes // CATE-NA. 2021. Vol. 204. P. 105363. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105363>
- Jarmalavičius D., Žilinskas G., Pupienis D. Geologic framework as a factor controlling coastal morphometry and dynamics. Curonian Spit, Lithuania // Int. J. Sediment Res. 2017. Vol. 32. № 4. P. 597–603. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.07.006>
- Ouillon S. Why and how do we study sediment transport? Focus on coastal zones and ongoing methods // Water. 2018. Vol. 10 (4). № 390. <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/4/390/htm> (Accessed 10 February 2020). <https://doi.org/10.3390/w10040390>
- Zhuk E., Khaliulin A., Krylenko M., Krylenko V., Zodiatis G., Nikolaidis M., Nikolaidis A. Including granulometric sediment coastal data composition into the Black Sea GIS // Proceedings of SPIE. The Int. Soc. for Optical Engineering. (5, 20–23 March 2017). Paphos, 2017. P. 104 440. <https://doi.org/10.1117/12.2279083>

Granulometric Composition of Abrasion-Accumulative Jumpers of Volgograd Reservoir Bays as an Indicator of Sediment-Forming Currents' Speeds

M. S. Baranova^{1, *}, O. V. Filippov^{1, **}, E. S. Bryzgalina^{1, ***}, and A. I. Kochetkova^{1, ****}

¹*Volzhskiy Branch of Volgograd State University, Volzhskiy, Russia*

**e-mail: maria_baranova2902@rambler.ru*

***e-mail: ovfilippov@list.ru*

****e-mail: bryzgalina_elena@mail.ru*

*****e-mail: aikochetkova@mail.ru*

Separation of bays from the main water area of Volgograd Reservoir by abrasion-accumulative jumpers is one of the regional problems now. This process arises due to alongshore sediment transport. Granulometric composition describes the movement of sediments of abrasion-accumulative jumpers under the influence of alongshore currents. We determined granulometric parameters of jumpers, and we made evaluative calculation of sediment-forming currents' speeds based on materials of 2019–2020. We studied 82 samples from 24 right-coast and left-coast bays. Field (sediment sampling, visual characteristic of the coast's lithological composition) and analytical (granulometric analysis, graphic and mathematical methods) research methods were applied. We have established that size of sediments participating in the construction of abrasion-accumulative jumpers is from 100–50 mm (coarse pebble) to 0.05 mm or less (small dusty particles). All studied particles turned out to be rounded or well rounded. This gives grounds to classify them as sediments. There are differences in the granulometric composition of jumpers' sediments on the right and left coasts of the Reservoir. Coarse pebble (100–50 mm) and medium pebble (50–20 mm) or medium sand (0.5–0.2 mm) and fine sand (0.2–0.1 mm) dominates in sediments' composition of right-coast bays jumpers. Medium sand (0.5–0.2 mm) prevails in sediments' composition of left-coast bays jumpers. Here was registered size of sediment particles less than 0.05 mm. The currents' speeds forming abrasion-accumulative jumpers are from 0.47 to 3.45 m/s in the right coast and from 0.47 to 1.63 m/s in the left coast. Sediment samples of estuarine jumpers have different degree of sorting (1.13–14.40). This attests about differences in currents' speeds forming these landforms in different time periods. The granulometric composition of sediments is an indirect sign of the dynamics of already formed jumpers. It is an indicator of sediment-forming currents' speeds. Sedimentation of sediments in the Volgograd Reservoir occurs at a close distance from the source of their income.

Keywords: bays, granulometry, lithology, abrasion-accumulative jumpers, current speeds, integral graphs, Volgograd Reservoir

REFERENCES

- Bagnold R.A. Sand movement by waves: some small-scale experiments with sand of very low density. *J. Institution Civil Engineers*, 1947, no. 27, pp. 447–469.
- Baranova A.I. Geological and geomorphological characteristics of the coasts of the Volgograd Reservoir. In *Materialy k izucheniyu pereformirovaniya beregov Volgogradskogo vodokhranilishcha* [Materials to the Study of

- the Re-formation of the Volgograd Reservoir Coasts]. Moscow—Leningrad: Nauka Publ., 1964, pp. 6–40.
- Baranova A.I., Zubenko F.S., Kudrjavceva E.T., Radchenko E.K., Semenova N.N. *Izucheniye fiziko-geologicheskikh protsessov na poberezh'yakh i beregakh vodokhranilishch po aerosnimkam* [Study of Physical and Geological Processes on the Coasts of Reservoirs from Aerial Photographs]. Leningrad: Nauka Publ., 1967. 283 p.
- Baranova M.S. The main formative material of bay's estuarial abrasion-accumulative jumpers and it's interconnection with the lithological composition of Volgograd reservoir coasts. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, VII Int. Scientific Practical Conf. "Modern problems of reservoirs and their catchments" 30 May to 2 June 2019, Perm State University, Russian Federation, 2019, vol. 321, p. 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/321/1/012001>
- Baranova M.S., Filippov O.V., Kochetkova A.I., Bryzgalina E.S. GIS technology and satellite data as tools for monitoring geodynamic processes in the Volgograd reservoir. *Geogr. Vestn.*, 2016, no. 2 (37), pp. 148–160. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2016-2-148-160>
- Chalov S.R., Efimov V.A. Granulometric composition of suspended sediments: characteristics, classifications, spatial variability. *Vestn. Mosk. Univ. Ser. 5: Geogr.*, 2021, no. 4, pp. 91–103. (In Russ.).
- Filatova T.N. *Issledovanie techenii v ozerakh i vodokhranilishchakh* [Study of Currents in Lakes and Reservoir]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1972. 319 p.
- Filippov O.V. Formation of natural aquatic complexes of the lake part of the Volgograd reservoir under conditions of changes in the hydrological regime. *Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Volgograd: Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, 2004. 217 p.
- Goncharov V.N. *Osnovy dinamiki ruslovykh protsessov* [Basics of the Dynamics of Watercourses Processes]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1954. 452 p.
- Grottoli E., Bertoni D., Ciavola P., Pozzebon A. Short term displacements of marked pebbles in the swash zone: Focus on particle shape and size. *Marine Geology*, 2019, vol. 367, pp. 143–158. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.06.006>
- Gurov K.I. Results of sediment granulometric composition monitoring in coastal zone of the Kalamitskiy bay. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnoi i Shel'fovoi Zon Morya*, 2018, no. 3, pp. 56–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-3-56-63>
- Gurov K.I., Udovik V.F., Fomin V.V. Modeling of the coastal zone relief and granulometric composition changes of sediments in the region of the Bogaili Lake bay-bar (the Western Crimea) during storm. *Morsk. Geofiz. Zh.*, 2019, vol. 35, no. 2, pp. 185–196. (In Russ.). <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-2-185-196>
- Hegde V.S., Krishnaprasad P.A., Shalini G., Rajawat A.S. Granulometric dynamics of the coastal sediments of the Central West coast of India: Insight into morphotectonic influences on the beach processes. *CATENA*, 2021, vol. 204, p. 105363. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105363>
- Jarmalavičius D., Žilinskas G., Pupienis D. Geologic framework as a factor controlling coastal morphometry and dynamics. Curonian Spit, Lithuania. *Int. J. Sediment Res.*, 2017, vol. 32, Iss. 4, pp. 597–603. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.07.006>
- Karaushev A.V. *Teoriya i metody rascheta rechnykh nanosov* [Theory and Methods for Calculating River Sediments]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1977. 272 p.
- Kochetkova A.I. Spatial-temporal analysis of the overgrowth of the Volgograd reservoir. *Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*. Borok: Institute of biology of inland waters by I.D. Papanin RAS, 2013. 226 p.
- Kochetkova A.I., Baranova M.S., Filippov O.V., Bryzgalina E.S., Kurashov E.A. Floristic composition of phytocenoses of abrasion-accumulative jumpers of the Volgograd reservoir lake section. *Problems of sustainable development and ecological and economics regional security*. XV All-Russian scientific and practical conf., Volzhsky, 9–10 April 2020. Volgograd: Sphere Publ., 2020, pp. 64–75. (In Russ.).
- Krylenko V.V., Krylenko M.V. Researching of the significance and interrelationships of natural factors in the formation of the granulometric composition of sediments and the relief of the accumulative coastal forms of the Black Sea. *Geopolitika i Ekogeodinamika Regionov*, 2014, vol. 10, no. 1, pp. 669–675. (In Russ.).
- Leont'ev O.K. *Osnovy geomorfologii morskikh beregov* [Foundations of Geomorphology of Sea Coasts]. Moscow: Moscow University Press., 1961. 418 p.
- Milanovskii E.V. *Ocherk geologii Srednego i nizhnego Povolzh'ya* [The Essay of the Geology of the Middle and Lower Volga]. Moscow-Leningrad: State scientific and technical publishing house of oil and mining fuel literature Publ., 1940. 303 p.
- Myasnikova N.A., Potahin M.S. Granulometric composition of bottom sediments of Torosyarvi lake (White sea basin). *Vestn. Voronezh. Gos. Univ. Ser.: Geogr. Geoekol.*, 2021, no. 1, pp. 45–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/geo.2021.1/3255>
- Nazarov N.N., Tyunyatkin D.G., Frolova I.V., Cherepanov A.V. Morpholithogenesis in the zone of alongshore sediment transport in the Kama reservoir (Article 2. Sediments). *Geogr. Vestn.*, 2013, no. 2 (25), pp. 35–39. (In Russ.).
- Ouillon S. Why and how do we study sediment transport? Focus on coastal zones and ongoing methods. *Water*, 2018, vol. 10 (4), № 390. <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/4/390/htm> (accessed: 10.02.2020). <https://doi.org/10.3390/w10040390>
- Pettidzhon F. Dzh. *Osadochnye porody* [Sedimentary Rocks]. Moscow: Nedra Publ., 1981. 751 p.
- Shamov G.I. *Rechnye nanosy* [River Sediments]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1959. 380 p.
- Sidorenko A.V. *Geologiya SSSR. Tom XI Povolzh'e i Prikam'e. Chast' I Geologicheskoe opisanie* [Geology of the USSR. Tom XI Volga Region and Kama Region. Part 1

- Geological Description]. Moscow: Nedra Publ., 1967. 605 p.
- Vendrov S.L. About the change in the relief of the Tsimlyansk reservoir coastal zone. *Morskoi i Rechnoi Flot*, 1953, no. 5, pp. 28–34. (In Russ.).
- Zaharov A.V., Alekseev I.A. Socio-ecological problems of the Cheboksary reservoir. *Izv. Akad. Nauk. Ser. Geogr.*, 2012, no. 5, pp. 90–101. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15356/0373-2444-2012-5-90-101>
- Zakonnov V.V., Zakonnova A.V., Tsvetkov A.I., Sherysheva N.G. Hydrodynamic processes and their role in the formation of bottom sediments of the reservoirs of the Volga-Kama cascade. *Tr. IBVV Akad. Nauk*, 2018, no. 81 (84), pp. 35–46. (In Russ.).
<https://doi.org/10.24411/0320-3557-2018-1-0004>
- Zhuk E., Khaliulin A., Krylenko M., Krylenko V., Zodiatis G., Nikolaidis M., Nikolaidis A. Including granulometric sediment coastal data composition into the Black Sea GIS. *Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering*: 5, 20–23 March 2017. Paphos, 2017. 104440.
<https://doi.org/10.1117/12.2279083>
- Zubenko F.S. Coasts of the Kuibyshev reservoir. In *Berega Kuibyshevskogo vodokhranilishcha* [Coasts of the Kuibyshev Reservoir]. Moscow–Leningrad: Akad. Nauk SSR Publ., 1962, pp. 154–188.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 551.311.2 (268.45)

СТОК ВОДЫ, ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ И ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭРОЗИИ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЧАСТЬ КАРЕЛЬСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ)

© 2023 г. М. В. Митяев^а, *, М. В. Герасимова^а

^аМурманский морской биологический институт РАН, Мурманск, Россия

*e-mail: mityaev@mmbi.info

Поступила в редакцию 28.09.2022 г.

После доработки 20.10.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

С целью определения скорости понижения водосборных пространств Карельского побережья в период 2005–2017 гг. проведены круглогодичные наблюдения водотоков, впадающих в губы Чупа, Медвежья, Кереть и Летняя Белого моря. В реках и ручьях исследовались сезонные и годовые изменения расхода воды и концентраций взвешенных веществ. Выявлено, что речной водный сток не превышает 2.5 км^3 , а ручьевой — 45 млн м^3 в год. Годовой водный сток распределяется следующим образом: в весеннее половодье в среднем выносится $40 \pm 2\%$, в осенний паводок — $33 \pm 1\%$, в летнюю межень — $23 \pm 1\%$. Несмотря на большую продолжительность зимнего периода, зимний водный сток никогда не превышает 8% от годового стока. По концентрации взвеси реки и ручьи Карельского побережья относятся к водотокам с чистой водной массой: среднееголетняя концентрация взвешенного вещества в них составляет $3.30 \pm 0.95 \text{ мг/л}$. Выявлено, что суммарный речной сток взвешенного вещества составляет 6.5 тыс. т в год, ручьи за год выносят менее 500 т взвесей. Исходя из полученных данных, проведены оценки модуля стока взвешенного вещества и скорости эрозии водосборных пространств. Среднееголетний модуль стока взвешенного вещества в среднем составляет $1.98 \pm 0.31 \text{ т км}^{-2} \text{ г.}^{-1}$, скорость эрозии — $1.1 \pm 0.17 \text{ мкм г.}^{-1}$ ($n = 382$). Низкий модуль стока и медленная скорость понижения водосборных площадей обусловлены географическим положением и геолого-геоморфологическим строением Карельского побережья.

Ключевые слова: Карельское побережье, водный сток, взвешенные вещества, модуль стока взвешенного вещества, скорость эрозии

DOI: 10.31857/S2587556623010120, EDN: LKOUFG

ВВЕДЕНИЕ

Изучение динамики взвешенного вещества (ВВ), выносимого водными артериями, — важное звено комплексного исследования современного осадконакопления и актуально в связи с малой изученностью этой проблемы в регионе, особенно зимний период года. Материковые воды — это не только главный фактор понижения водосборных пространств, но одно из главных богатств северной Карелии. Изменение объемов водного стока, концентраций взвешенного вещества в водотоках непосредственно связаны с региональными изменениями природной среды и климата (Филатов и др., 2012), что требует систематических наблюдений за водными артериями с целью своевременного реагирования на возможные негативные изменения.

Первые результаты комплексного исследования малых водотоков Карельского побережья были освещены в работе (Митяев, Герасимова, 2010). Цель настоящей работы — определить скорость понижения водосборных пространств Ка-

рельского побережья. Для достижения поставленной цели на протяжении двенадцати лет изучались сезонные и годовые изменения расхода воды и концентрации взвешенного вещества водотоков, впадающих в губы Чупа, Медвежья, Кереть и Летняя Карельского побережья. На основе полученных данных определялся модуль твердого стока (Гордеев, 2012) и проводилась оценка скорости понижения водосборных пространств (Кукал, 1987).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в 2005–2017 гг. Методика полевых измерений включала в себя отбор проб воды в пластиковую емкость объемом 2 л , определение скорости течения воды в водотоках (поплавковым методом) и живого сечения русла водотоков (прямым замером) в замыкающем створе, выше сизигийного прилива. Во всех ручьях и р. Летняя пробы отбирались с берега с глубины $5\text{--}10 \text{ см}$, в р. Кереть — в середине русла с

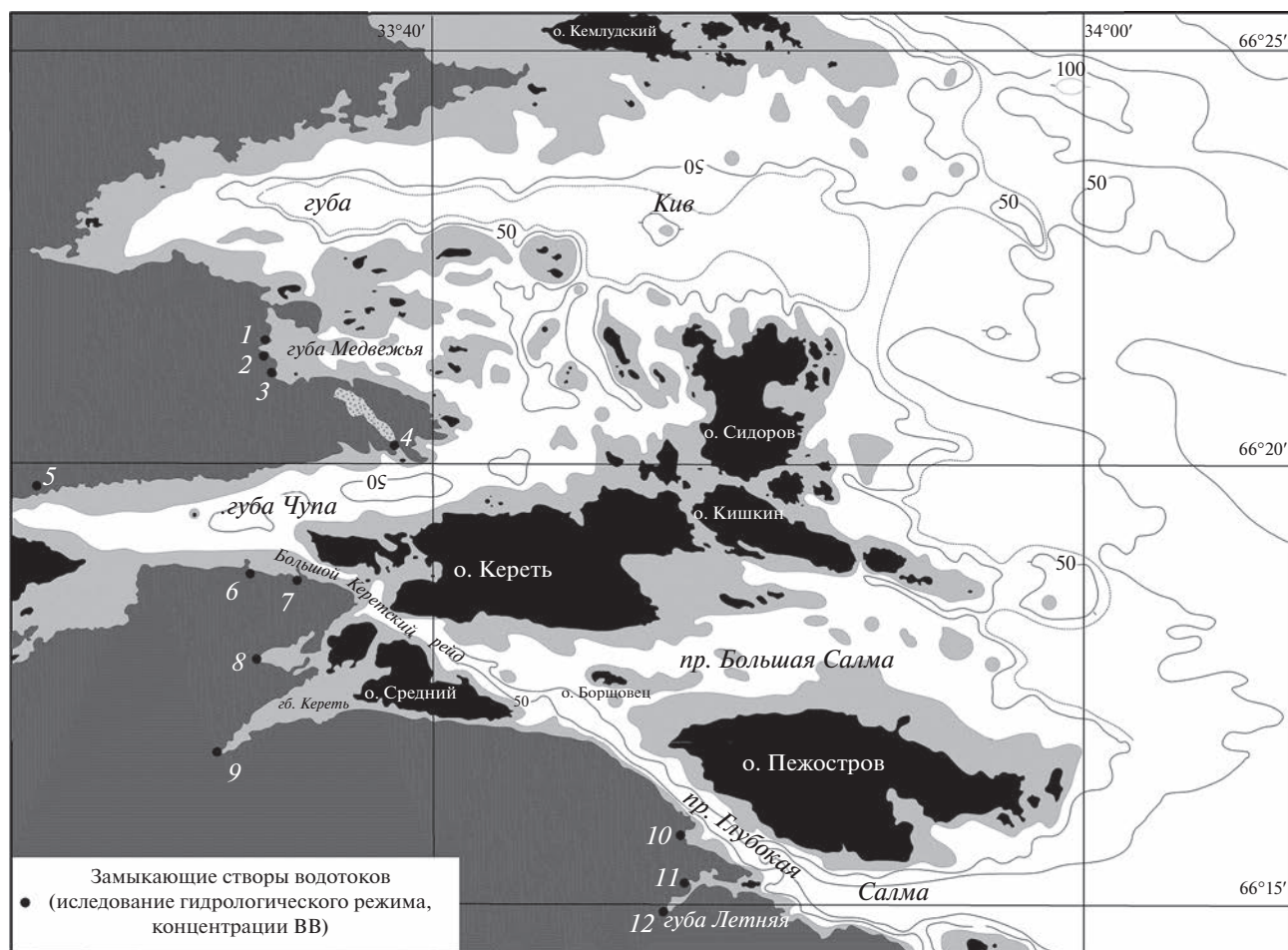


Рис. 1. Схема района исследований. Замыкающие створы водотоков: 1 – руч. 4-й Медвежий; 2 – руч. 3-й Медвежий; 3 – руч. 2-й Медвежий; 4 – руч. Кривой; 5 – руч. Оленчик; 6 – руч. Лисий Нос; 7 – руч. Коровья Варака; 8 – руч. Лебяжий; 9 – р. Кереть; 10 – руч. Яжевников; 11 – руч. Летний; 12 – р. Летняя.

глубины 0.2–0.3 м. Расход воды (в м³ в сутки) вычислялся, исходя из скорости течения воды и площади сечения русла.

Фильтрация проб воды проводилась через предварительно подготовленные ядерные фильтры с размером пор 0.45 мкм и диаметром рабочей поверхности 47 мм. Фильтры с ВВ высушивались в сушильном шкафу при температуре 40–60°C и повторно взвешивались для определения концентрации ВВ. Параллельно почвенным термометром с ценой деления 0.2°C измерялась температура воды. Проведено более 380 наблюдений скорости течения и живого сечения русел 7 водотоков, еще в 5 водотоках проведены единичные расчеты расхода воды за летне-осенний период (рис. 1).

Для изучения ВВ с мая по ноябрь пробы воды отбирались 1–2 раза в месяц (р. Кереть, ручьи 2-й и 4-й Медвежий, Кривой, Оленчик, Лисий Нос, Коровья Варака) и еще в 5 водотоках с июня по сентябрь в течение двух лет раз в месяц (р. Лет-

няя, ручьи 3-й Медвежий, Летний, Яжевников, Лебяжий). В зимний период пробы воды отбирались раз в месяц в марте–апреле. В весеннее половодье 2012–2013 гг. пробы воды отбирались с конца апреля по середину мая раз в 3–5 дней (ручьи Оленчик, Кривой, 2-й и 4-й Медвежий).

Оценка скорости понижения водораздельных пространств осуществлялась через модуль твердого стока (Гордеев, 2012; Страхов, 1954), по модернизированной формуле С. Джадсона и Д. Риттера (Кукал, 1987): $E = \rho \sum M_i / (\delta - \Delta)$, где M_i – модуль твердого стока (т с км² за единицу времени), δ – плотность вещества, Δ – плотность среды, ρ – безразмерный коэффициент учитывающий уклон поверхности, растительный покров, площадь и мощность рыхлых отложений. Модуль твердого стока M_i определяется через расход воды за единицу времени (Q_i), и среднюю концентрацию ВВ в единицу времени (P_i): $M_i = \sum Q_i P_i$.

ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДОТОКОВ

Особенности водотоков и их русел

Большинство водотоков Карельского побережья представляют собой болотно-озерно-речные (ручьевые) системы, питание которых в основном осуществляется атмосферными осадками. Часть малых водотоков (ручьев) пересекают только болотные массивы. Из двенадцати изученных водотоков шесть представляют собой болотно-ручьевые системы (ручьи Оленчик, Лисий Нос, Коровья Варака, ручьи, впадающие в губу Медвежья); остальные водотоки вытекают из озерных котловин (рр. Кереть и Летняя, ручьи Кривой, Лебяжий, Яжевников и Летний). Протяженность русел ручьев изменяется от первых километров (ручьи Кривой, Лебяжий и Коровья Варака) до 10 км, протяженность р. Кереть более 130 км, р. Летняя — около 30 км. Площадь водосборных бассейнов ручьев, впадающих в губу Медвежья, — 8–10 км² каждого, ручьев, впадающих в губу Чупа — от 3 км² (ручей Коровья Варака) до 15 км² (ручей Оленчик). Площадь водосборных бассейнов ручья Яжевников и ручья Летний — около 10 км². Площадь водосбора р. Кереть — около 250 км², р. Летняя — около 65 км².

Русла водотоков извилисты, глубина русел изменяется от 0.02 до 1.5 м, ширина от 0.4 до 4 м (кроме р. Кереть — ширина 30 м в меженный период). Русла выработаны в позднеплейстоцен-голоценовых рыхлых отложениях ледникового и морского генезиса мощностью 5–7 м, водоупорным горизонтом служат гранито-гнейсы Беломорского комплекса (Митяев, Герасимова, 2010; Система ..., 2010).

По характеру уклона русел ручьи относятся к равнинным водотокам с малой скоростью течения. Лишь в устьевых частях водотоков происходит увеличение уклона русла до 5–7 м/км. Средний уклон русел ручьев — 1–2 м/км. В замыкающем створе р. Летняя уклон достигает 10 м/км, р. Кереть — 14 м/км, ручья Кривого — 30 м/км. Наиболее характерен U-образный профиль русла. У ручьев, берущих начало в болотных массивах, в верхнем течении часто наблюдается не одно, а несколько русел. Каждое русло в пределах болотного массива представляет собой цепочку мочажин, на границе леса и болота мочажины формируют небольшую топь, откуда ручьи вытекают одним потоком. Часто в верховье ручья отдельные участки русла перекрыты болотной растительностью, отчего оно приобретает четковидный характер. Ручей Коровья Варака, самый небольшой водоток, представляет собой переходный тип водотоков, от временных (ephemeral stream) к постоянным. Наиболее характерен данный тип водотоков для островов, они часто функционируют

только в теплый период года, но в мягкие зимы могут функционировать круглый год.

Термический режим водотоков

Термический режим водотоков предопределен климатом и разделен на два этапа, примерно равных по продолжительности. Первый — зимний устойчивый ледостав, второй — летний прогрев воды. Зимний продолжается около пяти месяцев (с конца ноября до середины апреля), в это время температура воды в водотоках около 0°C (до 0.5°C). Руслу ручьев нередко промерзают до дна (способствуя донной эрозии) и сток либо прекращается совсем, либо осуществляется по русловым бороздам (нередко формируемым в бортах русел, что усиливает боковую эрозию). Одно из главных явлений зимнего ледостава, влияющего на эрозию водосборов, — весеннее вскрытие льда и сопровождающий его паводок. Продолжительность весеннего паводка не превышает трех недель и сопровождается максимальной скоростью прогрева воды $0.29 \pm 0.02^\circ\text{C}$ в сутки.

В безледный период года, вплоть до начала августа, скорость прогрева воды не превышает 0.15°C в сутки (в июне — $0.12 \pm 0.02^\circ\text{C}$ в сутки, в июле — $0.07 \pm 0.01^\circ\text{C}$ в сутки), а к концу июля температура воды в водотоках поднимается до 16–20°C. Начиная с августа температура воды в водотоках начинает снижаться со средней скоростью $0.12 \pm 0.02^\circ\text{C}$ в сутки (в августе — $0.09 \pm 0.01^\circ\text{C}$ в сутки, в сентябре — $0.10 \pm 0.01^\circ\text{C}$ в сутки, в октябре — $0.12 \pm 0.03^\circ\text{C}$ в сутки, в ноябре — $0.15 \pm 0.02^\circ\text{C}$ в сутки), и к первым заморозкам (начало октября) опускается до 6–8°C, а к концу ноября не превышает 0.5°C . Необходимо отметить, что в июне-июле может фиксироваться снижение температуры воды в водотоках, а в сентябре-октябре повышение (в связи с изменениями температуры воздуха).

Изменения скорости течения воды в водотоках

Скорость течения воды в замыкающих створах водотоков в течение года изменяется в широких пределах, но максимально зафиксированные скорости не превышают 3 м/с, в ручьях среднегодовая скорость течения воды составляет 0.5 ± 0.15 м/с, в реках — 1.6 ± 0.09 м/с.

Самое медленное течение воды в водотоках наблюдается в зимнюю межень — в среднем 0.4 ± 0.06 м/с. В летнюю межень и осенний паводок средние скорости течения воды достоверно не отличаются (летом — 0.95 ± 0.09 м/с, осенью — 1.05 ± 0.12 м/с). Летом постоянно отмечаются кратковременные паводки, вызванные атмосферными осадками, при этом скорость течения воды меняется скачкообразно. Иногда наблюдаются длительные “засухи”, когда часть водотоков пересыхает.

Таблица 1. Сток воды в районе исследований, млн м³ г.⁻¹

Год	<i>n</i>	Речной	Суммарный ручьевой	Ручьев губы Чупа	Ручьев губы Медвежья
2005	15		35.1	19.7	5.8
2006	21		48.0	29.2	7.0
2007	25		56.6	35.8	7.7
2008	18		44.4	25.7	6.9
2009	32	1861	51.4	27.2	9.0
2010	39	545	29.8	15.8	5.1
2011	43	611	25.1	13.9	4.1
2012	45	2306	64.1	31.0	12.4
2013	25	917	29.2	13.8	5.8
2014	33	1421	20.9	12.4	3.1
2015	30	2148	44.5	19.6	8.1
2016	32	1230	39.8	21.9	6.6
2017	24	1947	68.8	42.5	9.7

Максимально высокие скорости течения воды фиксируются в весеннее половодье, в среднем 1.3 ± 0.25 м/с. В это время средняя скорость течения составляет 0.8 ± 0.2 м/с в ручьях и 2.2 ± 0.4 м/с в реках. При этом суточные изменения температур воздуха (заморозки, оттепели со снеготаянием) оказывают сильное влияние на уровень воды в водотоках.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сток воды и его сезонное распределение

Пресный сток в губы Чупа и Медвежья не оказывает влияния на формирование морских поверхностных вод. Объем пресного стока в устьевую (восточную) часть губы Чупа изменяется от 12 до 36 млн м³ г.⁻¹ (в зависимости от водности года, табл. 1), что составляет 2–3% от объема морских вод в данной части губы и почти в 2 раза меньше, чем поступает морской воды в стадию прилива за сутки (Бурдыкина, 1949; Dolotov et al., 2002). В губу Медвежья поступает меньше пресных вод (3–12 млн м³ г.⁻¹), но объем пресного стока составляет 6–11% от объема морских вод и сопоставим с объемом морской воды, поступающим в губу в стадию прилива за сутки.

Иная ситуация наблюдается в губе Кереть (см. табл. 1), здесь пресный сток в среднем составляет 940 ± 50 млн м³ г.⁻¹, что в 50 раз больше, чем емкость губы. В сутки в губу в среднем поступает одинаковое количество пресных и морских вод. Поэтому в верхнем двухметровом слое воды соленость не превышает 7‰, и эти опресненные воды заполняют более 50% емкости губы (Долотов и др., 2005; Примаков и др., 2009; Dolotov et al., 2002). Речные воды оказывают влияние на формиро-

вание поверхностных вод и за пределами губы (в проливе Большой Керетский рейд), на западе пресные воды достигают губы Чупа, на востоке — острова Боршовец (S‰ поверхностных вод не превышает 20‰) (Dolotov et al., 2002).

Таким образом, суммарный сток р. Кереть превышает 95% от общего пресного стока в данной части Карельского побережья, но в губах Чупа и Медвежья пресные воды ручьевого происхождения.

Наименее детально изучена губа Летняя. Здесь годовой пресный сток на порядок больше емкости губы. В прилив соленость поверхностных вод в губе незначительно отличается от солености поверхностных вод в сопредельном проливе Глубокая Салма (около 26‰). Только во внутренней части губы (в месте впадения р. Летняя) распределение поверхностных вод достигает 10–17‰.

Внутригодовое распределение стока воды характеризуется следующими особенностями. Во-первых, во всех водотоках в зимнюю межень сток воды минимальный (не превышает 8% от стока за год, табл. 2), что характерно для речных систем водосбора Белого моря (Система ..., 2010). Во-вторых, на реках нет четко выраженного осеннего паводка, что также характерно для водотоков Белого моря (Система ..., 2010). В-третьих, в ручьях озерного питания (ручьи Кривой, Яжевников) нет четко выраженного летнего меженного периода — весной, летом и осенью происходит равномерный сток воды.

Часть небольших ручьев болотного питания (сток менее одного млн м³ г.⁻¹) на 2–3 зимних месяца перемерзают, а летом пересыхают и не функционируют как водотоки. Летние “засухи” отме-

Таблица 2. Внутригодовой расход воды водотоков Карельского побережья

Водоток	<i>n</i>	Годовой сток, м ³ × 10 ⁶	<i>n</i>	Зима, %	<i>n</i>	Весна, %	<i>n</i>	Лето, %	<i>n</i>	Осень, %
р. Кереть	25	942 ± 49	1	5	3	34–38	13	27–29	8	29–33
р. Летняя	8	68 ± 2	1	5	2	39	3	26–27	2	28–31
Ручьи										
Летний	8	7.21	1	4	2	41	3	23	2	32
Оленчик	50	7.08 ± 0.55	8	2–3	4	45–49	22	15–18	16	33–35
2-й Медвежий	60	2.32 ± 0.03	9	3–4	11	41–43	24	16–17	16	31–33
Кривой	51	1.68 ± 0.10	10	7–8	5	31–35	23	28–30	13	29–33
4-й Медвежий	63	1.18 ± 0.05	9	2–6	11	35–40	23	20–23	20	35–38
Яжевников	8	1.14	1	5	2	34	3	30	2	31
Лисий Нос	41	0.27 ± 0.04	6	5–8	2	29–36	21	24–29	12	31–37
Коровья Варака	46	0.06 ± 0.02	8	0–1	2	46–55	22	17–19	14	27–36
Лебяжий	8	0.12	1	0–1	2	43	3	22	2	34

чаются раз в 4–6 лет (длительностью до 30 сут), а зимнее промерзание — раз в два-три года.

Расход воды в весенне-летний период зависит от масштаба водотока, а в осенне-зимний период не зависит. Так в весеннее половодье в среднем выносятся $40 \pm 2\%$ от объема водной массы, выносимой за год. В крупных (расход воды $1\text{--}50$ млн м³ г.⁻¹), малых и временных ручьях (расход воды <0.1 млн м³ г.⁻¹) этот показатель составляет $47 \pm \pm 2\%$ (см. табл. 2). В ручьях среднего масштаба (расход воды $0.1\text{--}1$ млн м³ г.⁻¹) и реках (расход воды >50 млн м³ г.⁻¹) — $36 \pm 1.5\%$ (см. табл. 2). В летнюю межень в среднем выносятся $23 \pm 1\%$ от объема водной массы, выносимой за год. В крупных, малых и временных ручьях этот показатель составляет $17 \pm 0.5\%$ (см. табл. 2), в ручьях среднего масштаба и реках — $26 \pm 2.5\%$ (см. табл. 2). Расход воды в осенний паводок в среднем составляет $33 \pm 1\%$ (максимально зафиксированный расход воды 38% , минимальный — 27%).

При детальном изучении стока воды 10 водотоков района (2005–2017 гг.) было выявлено, что речной сток не превышает 2.5 км³ в год, а ручьевой — 45 млн м³ в год. Во всех водотоках расход воды в зимнюю межень не превышает 8% от годового стока. Во многих ручьях сток воды зимой осуществляется по бороздам на поверхности льда, в результате образуются наледи, в несколько раз превосходящие ширину русел водотоков, что способствует денудации пойменных и террасовых уровней. Максимальный суточный расход воды приходится на весеннее половодье (>100 м³ в час в ручьях и >100 тыс. м³ в час в реках). Расход воды в весеннее половодье не превышает 55% от годового стока, а $>70\%$ весеннего стока происходит в течение 10–15 дней. Повышение уровня воды осенью происходит плавно и растягивается на

несколько недель. Сток воды в осенний паводок не превышает 40% от годового стока и связан с количеством атмосферных осадков. В летнюю межень суммарный сток воды в среднем составляет $1/4$ от годового стока. Во всех водотоках летом наблюдаются мини-паводки, когда в результате продолжительных дождей и ливней резко повышается уровень и скорость течения воды. Продолжительность таких явлений может достигать нескольких суток. В засушливые годы сток многих малых и даже средних по масштабу ручьев прекращается. Максимальная продолжительность “засухи” составила 24 дня в 2011 г. и 32 дня в 2013 г.

Необходимо отметить, что весной наблюдается большое количество временных водотоков (до 12 на погонный километр береговой линии). Водный сток временных ручьев не превышает 100 м³ сут⁻¹, но в отдельных случаях может достигать 1 тыс. м³ сут⁻¹ (Митяев, Герасимова, 2010).

Среднегодовая и сезонная концентрация взвешенного вещества

В целом для водотоков Карельского побережья характерно низкое содержание взвешенного вещества, редко превышающее 15 мг/л (Долотов и др., 2005; Лисицын и др., 2003; Система ..., 2013; Dolotov et al., 2002), что в 2–6 раз ниже средней концентрации ВВ в крупных реках Арктического побережья (Бурдыкина, 1949; Гордеев, 2012, 1983; Лисицын, Шевченко, 2008; Шевченко и др., 1996). Концентрация ВВ в водотоках, впадающих в губы Чупа, Медвежья, Кереть и Летняя Карельского побережья, сопоставима с концентрацией ВВ в реках других побережий Белого моря, но более чем на порядок выше, чем концентрация ВВ в

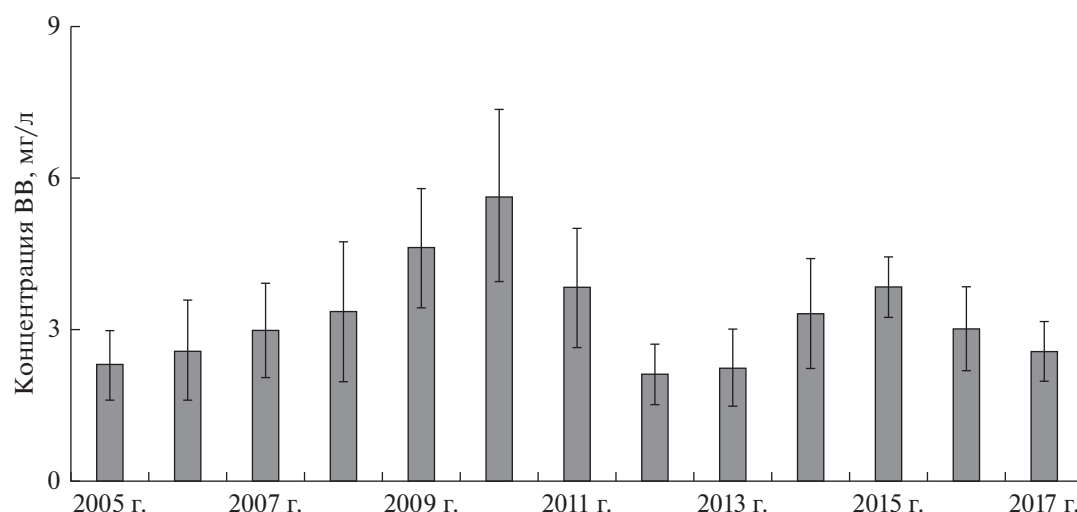


Рис. 2. Среднегодовые концентрации взвешенного вещества по всем изученным водотокам. Линиями показаны доверительные интервалы.

ультрачистых водотоках Мурманского побережья (Долотов и др., 2008, 2005; Лисицын и др., 2003; Лукашин и др., 2002; Митяев и др., 2005; Система ..., 2013; Dolotov et al., 2002; Koukina et al., 2001).

Концентрация взвешенного вещества в водотоках рассматриваемого района Карельского побережья в период 2005–2017 гг. изменялась от 0.12 до 46.82 мг/л, в среднем составляя 3.3 ± 0.95 мг/л (357 наблюдений (n) в 12 водотоках). При этом концентрации ВВ более 10 мг/л фиксировались 28 раз, менее 1 мг/л – 77 раз. Среднегодовые концентрации ВВ в водотоках постоянно изменялись, но никогда не наблюдались достоверные различия (рис. 2). Среднегодовая концентрация ВВ в районе исследования напрямую зависит от концентрации ВВ в ручьях ($r = 0.993$, по 7 водотокам за 13 лет). При этом изменение среднегодовых концентраций ВВ в конкретном водотоке ча-

сто происходит независимо от изменения концентрации ВВ в других водотоках (табл. 3).

Наиболее синхронно изменение среднегодовых концентраций ВВ происходило в ручьях Оленчик, Лисий Нос и Коровья Варака. Еще в двух водотоках (р. Кереть и 2-й Медвежий ручей) выявлена корреляционная связь в изменениях среднегодовых концентраций ВВ (см. табл. 3).

Менее значительны сезонные изменения концентрации ВВ в водотоках. Несмотря на то, что высокие концентрации ВВ могут наблюдаться в любой сезон года, только в весенний паводок они стабильно высокие, а средневесенние концентрации ВВ достоверно отличаются от других сезонов года (табл. 4). Зимой, летом и осенью среднесезонные концентрации ВВ достоверно не отличаются между собой (см. табл. 4). Минимально низкие концентрации ВВ наблюдаются во время дождей (лето–осень), это, вероятно, связано с

Таблица 3. Корреляционная матрица среднегодовых концентраций ВВ

	1	2	3	4	5	6	7	8	k	ρ	$r_{кр}$
1		0.443	0.313	0.973	0.124	0.719	0.583	0.415	10	0.1	0.497
2			−0.044	0.315	0.583	0.118	−0.244	0.712			
3				0.465	−0.384	0.158	0.256	0.001		0.05	0.576
4					0.078	0.576	0.435	0.406			
5						−0.082	−0.156	0.077		0.01	0.708
6							0.726	0.505			
7								−0.057		0.001	0.823
8											

Примечания. k – число степеней свободы; ρ – уровень значимости; $r_{кр}$ – критическое значение коэффициента корреляции Пирсона. 1 – среднегодовая концентрация ВВ в районе, 2–8 – среднегодовые концентрации ВВ в водотоках: 2 – руч. 2-й Медвежий, 3 – руч. 4-й Медвежий, 4 – руч. Оленчик, 5 – руч. Кривой, 6 – руч. Лисий Нос, 7 – руч. Коровья Варака, 8 – р. Кереть.

разбавлением атмосферными осадками поверхностных вод (в основном болотных), что отражает высокий коэффициент корреляции концентрации ВВ с суточным расходом воды. У шести водотоков ранговый коэффициент корреляции Спирмана между концентрацией ВВ и суточным расходом воды отрицательный $r = -0.338 \pm 0.081$ ($k = 149$, $r_{кр} = 0.21$, $\rho = 0.01$), еще у трех водотоков корреляционная связь отсутствует ($r = 0.103 \pm 0.056$, $k = 118$, $r_{кр} = 0.18$, $\rho = 0.05$). У ручья Кривой выявлена достоверная положительная корреляционная связь концентрации ВВ с суточным расходом воды ($r = 0.381$, $k = 47$, $r_{кр} = 0.37$, $\rho = 0.01$). Таким образом, в периоды дождей в водотоках концентрация ВВ снижается, а при длительном отсутствии атмосферных осадков повышается, часто эти изменения резкие. Следовательно, после весеннего паводка концентрация ВВ в водотоках постепенно снижается и, в целом, до следующего весеннего паводка изменяется незначительно, хотя постоянно фиксируются короткопериодические ее изменения, неразрывно связанные с изменением метеословий.

Никакой цикличности в многолетнем изменении среднегодовых концентраций ВВ не наблюдается. Можно констатировать, что в течение 6 лет (2005–2010 гг.) наблюдалось увеличение среднегодовых концентраций ВВ в водотоках (в пределах доверительных интервалов). В 2009–2010 гг. регистрировались максимально высокие среднегодовые концентрации ВВ. Затем в течение двух лет происходило их снижение, и в 2012–2013 гг. отмечались максимально низкие среднегодовые концентрации ВВ, далее в течение двух лет они вновь увеличивались, а затем стали снижаться (см. рис. 2).

В течение года концентрация ВВ в водотоках значительно варьирует (рис. 3). Поэтому для водотоков одного масштаба водного стока для каждого периода года были определены фоновые концентрации ВВ. Для крупного ручья Оленчик летние фоновые концентрации ВВ находятся в диа-

Таблица 4. Среднесезонные концентрации ВВ в водотоках

	<i>n</i> (количество замеров)	Реки	<i>n</i>	Ручьи
Зима	2	2.46 ± 0.81	53	4.72 ± 0.32
Весна	5	3.89 ± 0.52	41	5.74 ± 0.65
Лето	18	2.14 ± 0.19	148	4.49 ± 0.27
Осень	12	2.50 ± 0.33	103	4.23 ± 0.43

пазоне 6.5–20.5 мг/л, в ручьях среднего масштаба водного стока (ручьи губы Медвежья, ручьи Лисий Нос, Летний, Яжевников) – 2.2–7.4 мг/л, в малых ручьях (ручей Коровья Варака, Лебяжий и ручей Кривой) – 0.45–1.85 мг/л. Для рек (рр. Кереть и Летняя) летний фоновый диапазон концентрации ВВ составляет 1.5–2.7 мг/л.

В осенний и зимний периоды во всех водотоках диапазон фоновых значений концентрации ВВ сужается: в ручье Оленчик – до 6.0–18.5 осенью и до 3.5–15.3 мг/л зимой; в ручьях среднего масштаба – до 1.5–6.4 и 1.85–6.65 мг/л; в ручье Кривом – до 0.50–1.05 и 0.55–1.75 мг/л соответственно. В р. Кереть интервал осенних фоновых концентраций составляет 1.5–3.5 мг/л.

Во всех водотоках в весенний паводок наблюдаются резкие изменения концентрации взвешенного вещества (рис. 4), поэтому определить фоновые концентрации для этого периода года невозможно.

Таким образом, по результатам изучения концентрации ВВ в замыкающих створах водотоков района установлено:

1) в крупных ручьях (независимо от сезона года) вероятность обнаружения концентрации ВВ 5–20 мг/л составляет 0.667 ($\rho = 0.01$, $k = 51$). Вероятность обнаружения концентрации ВВ более 27 мг/л – 0.101, менее 2 мг/л – 0.044;

2) в ручьях среднего и малого масштаба водного стока (независимо от сезона года) вероятность обна-

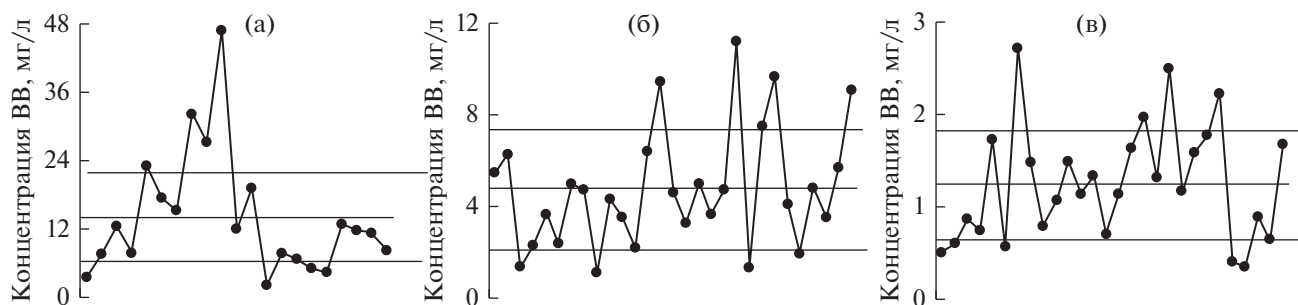


Рис. 3. Летние меженные концентрации взвешенного вещества в крупных (а), средних (б) и малых (в) ручьях. Средней линией обозначена средняя концентрация взвеси в водотоках указанных категорий; верхней и нижней горизонтальными линиями ограничены фоновые концентрации ВВ.

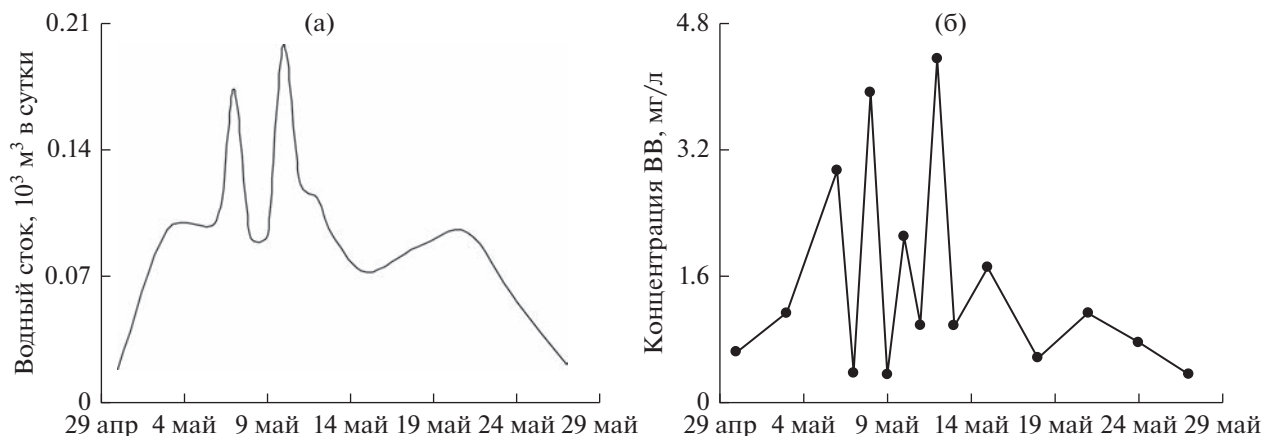


Рис. 4. Весеннее половодье 2012 г., руч. Кривой: (а) водный сток; (б) концентрация взвешенного вещества.

ружения концентрации ВВ 0.4–5.5 мг/л составляет 0.648–0.943 ($p = 0.01$, $k = 245$). Вероятность обнаружения концентрации ВВ более 7 мг/л – 0.043–0.121, более 10 мг/л – 0.019, менее 0.30 мг/л – 0.048–0.061;

3) в рр. Кереть и Летняя (независимо от сезона года) вероятность обнаружения концентрации ВВ 1.5–3.0 мг/л составляет 0.724 ($p = 0.01$, $k = 33$). Вероятность обнаружения концентрации ВВ более 4 мг/л – 0.051, менее 1 мг/л – 0.035.

Следовательно, по мутности водотоки Карельского побережья относятся к водотокам с чистой водной массой, так как концентрация ВВ в них на два порядка ниже, чем средняя концентрация ВВ в реках мира (Гордеев, 2012, 1983) и на порядок ниже, чем в крупных Сибирских реках (Бурдыкина, 1949; Шевченко и др., 1996), при этом она на порядок выше, чем в ультрачистых водотоках Мурманского побережья (Митяев и др., 2005; Митяев, Герасимова, 2018).

ВЫНОС ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА

Сток ВВ в бассейн седиментации определяется двумя показателями: расходом воды и концентрацией ВВ в водном потоке. Несмотря на это, ни суточный, ни годовой сток ВВ не имеет функциональной связи с концентрацией ВВ (коэффициент корреляции по 8 водотокам – 0.143 ± 0.10 ($r_{\text{сут}}$ – суточный) и 0.002 ± 0.21 ($r_{\text{год}}$ – годовой), при $p = 0.01$, $r_{\text{кр}} = 0.40$ и при $p = 0.05$, $r_{\text{кр}} = 0.31$), но у двух водотоков (р. Кереть и ручей 2-й Медвежий) выявляется слабая зависимость стока ВВ от концентрации ВВ в водотоках ($r_{\text{сут}} = 0.592$ ($k = 25$) и 0.478 ($k = 56$) и $r_{\text{год}} = 0.639$ и 0.769 ($k = 12$) соответственно). Таким образом, основное влияние на количество выносимого взвешенного вещества оказывает расход воды ($r_{\text{сут}} = 0.816 \pm 0.07$ и $r_{\text{год}} = 0.834 \pm 0.06$). Аналогичные зависимости были выявлены для водотоков Мурманского побе-

режья (Митяев и др., 2005; Митяев, Герасимова, 2018).

В год ручьи выносят от 100 до 490 т взвешенного вещества, в среднем 245 ± 32 т г.⁻¹. В это же время р. Кереть выносит от 1000 до 6300 т ВВ в год, в среднем 3050 ± 690 т г.⁻¹ (табл. 5), р. Летняя от 110 до 160 т ВВ в год, в среднем 130 ± 10 т г.⁻¹. Следовательно, ручьевой сток ВВ в среднем составляет 10% от общего твердого стока в районе, изменяясь от 5 до 20%.

В целом с 2005 по 2009 г. наблюдалось увеличение годового стока ВВ в ручьях, в 2009 г. был максимальный сток ВВ (493 т), далее происходило снижение твердого стока вплоть до 2014 г., в 2013–2014 гг. был минимальный твердый сток (104–108 т). Таким образом, выявляется некоторая цикличность стока ВВ, с периодом 5–6 лет. Подобная цикличность выявлена и для водотоков Мурманского побережья (Митяев, Герасимова, 2018). В р. Кереть минимальный твердый сток был в 2010–2011 гг. (1100–1150 т), а максимальный – в 2015 г. (6200 т) (см. табл. 5). Здесь также выявляется пятилетний цикл.

Очень четко в водотоках проявлен сезонный сток (табл. 6). В весеннее половодье и осенний паводок происходит сток 3/4 годового объема выносимого ВВ. Сток ВВ в летнюю межень не превышает 25%. Как уже отмечалось, минимальный сток ВВ происходит в зимнюю межень, что принципиально отличает водотоки района от водотоков Мурманского побережья, где зимний сток ВВ достигает 30% (Митяев, Герасимова, 2018).

Таким образом, сток ВВ в весенне-летний период года аналогичен стоку ВВ водотоками Мурманского побережья и северными реками России (Бурдыкина, 1949; Митяев, Герасимова, 2018). Сток ВВ в осенне-зимний период имеет принципиальные отличия.

Таблица 5. Сток ВВ в районе исследований, т г.⁻¹

Год	<i>n</i>	Речной	Суммарный ручьевой	Ручьи губы Чупа	Ручьи губы Медвежья
2005	15		227.6	203.9	5.5
2006	21		245.1	214.6	9.3
2007	25		345.8	290.2	17.9
2008	18		314.6	266.2	16.7
2009	32	3915	492.6	430.0	20.5
2010	39	1141	236.3	203.5	13.7
2011	43	1115	209.8	180.5	7.2
2012	45	4797	183.7	121.6	22.5
2013	25	1658	104.1	77.4	11.0
2014	33	2775	107.9	87.0	7.7
2015	30	6192	252.1	199.7	18.7
2016	32	2752	222.7	179.4	13.6
2017	24	3051	259.6	180.4	17.4

Можно выделить две особенности твердого стока взвешенного вещества в районе исследования:

1) минимальный среднесуточный сток ВВ происходит в зимнюю межень, которая продолжается с середины ноября до начала мая;

2) максимальный среднесуточный сток ВВ приходится на весеннее половодье (май). Во всех водотоках весной выносятся более 40% от годового стока ВВ.

ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные являются объективным показателем модуля твердого стока с водосборных пространств (Гордеев, 2012; Бурдыкина, 1949; Страхов, 1954). Модуль стока ВВ с водосборов изученного района изменяется от 0.05 до 23 т км⁻² г.⁻¹, в среднем составляя $1.98 \pm \pm 0.31$ т км⁻² г.⁻¹ ($n = 217$). На водосборных пространствах рр. Кереть и Летняя модуль стока ВВ в среднем составляет 1.29 ± 0.17 т км⁻² г.⁻¹. На водосборных пространствах крупных ручьев Оленчик и Летний модуль стока ВВ в среднем $6.98 \pm \pm 1.06$ т км⁻² г.⁻¹, при этом у ручья Оленчик отмечается максимальный для всего района модуль твердого стока. На водосборных пространствах ручьев среднего масштаба водного стока модуль твердого стока — 0.7 ± 0.13 т км⁻² г.⁻¹. Минимальный модуль твердого стока фиксируется у малых и временных ручьев, в среднем $0.05 \pm \pm 0.01$ т км⁻² г.⁻¹. Таким образом, у ручьев наблюдается увеличение модуля стока ВВ с увеличением масштаба водотока примерно на порядок (1 : 10 : 100). Модуль твердого стока рр. Кереть и Летняя сопоставим с модулем стока ВВ внутрен-

них водотоков Мурманского побережья (Митяев, Герасимова, 2018).

Модуль твердого стока непосредственно связан со скоростью понижения водосборных пространств. Исходя из полученных данных, скорость понижения водосборов изученного района оценивается в 0.01–12 микрон в год (мкм г.⁻¹), в среднем 1.1 ± 0.17 мкм г.⁻¹. Максимальная скорость наблюдается на водосборах крупных ручьев (до 12 мкм г.⁻¹), минимальная — на водосборах малых и временных ручьев (менее 0.1 мкм г.⁻¹). Скорость понижения водосборов рек (Кереть, Летняя) — 1.55 ± 0.46 мкм г.⁻¹, водосборов ручьев среднего масштаба — 0.47 ± 0.07 мкм г.⁻¹. Такие скорости понижения водосборов района сопоставимы со скоростью понижения водосборов Мурманского побережья (Митяев, Герасимова, 2018).

В целом низкая скорость понижения водосборных пространств исследованного участка Карельского побережья [средняя скорость понижения водосбора Белого моря — 5–6 мкм г.⁻¹ (Гордеев, 2012; Страхов, 1954)] предопределена геолого-геоморфологическим строением территории: компетентные к эрозии коренные горные породы, небольшая мощность и грубообломоч-

Таблица 6. Сезонный сток ВВ водотоков Карельского побережья, %

	<i>n</i>	Реки	<i>n</i>	Ручьи
Зима	2	7 ± 2	53	5 ± 1
Весна	5	41 ± 1	41	46 ± 3
Лето	16	23 ± 1	145	20 ± 1
Осень	10	29 ± 3	97	28 ± 2

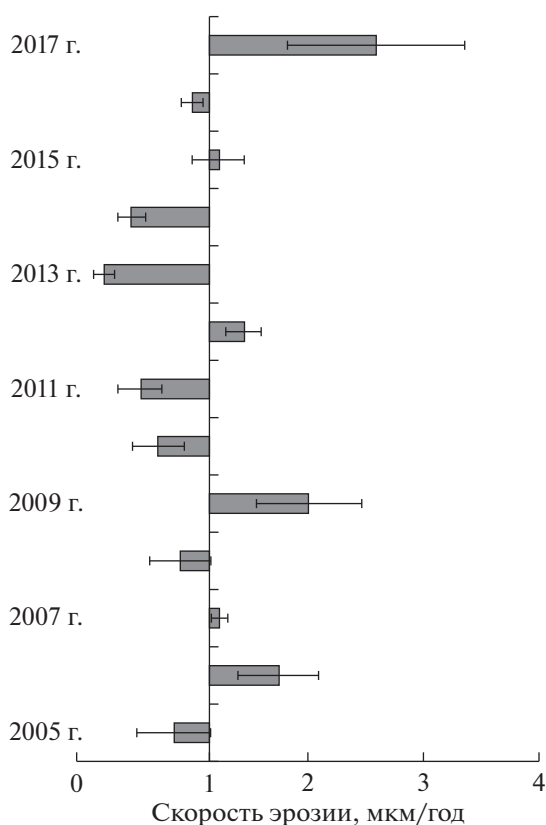


Рис. 5. Среднегодовые скорости эрозии водосбора рек и ручьев Карельского побережья. Линиями показаны доверительные интервалы.

ный состав рыхлых отложений, небольшие уклоны и слабая расчлененность рельефа (Система ..., 2010). Влияет также географическое положение региона, определяющее его климатические особенности [в первую очередь продолжительный зимний период (Климат ..., 2004; Система ..., 2010; Филатов и др., 2012)], когда эрозионная деятельность водотоков резко сокращена.

В изменение среднегодовой скорости понижения водосборных пространств выявляется одна закономерность: каждые три–пять лет фиксируется высокая скорость эрозии, достоверно отличающаяся от соседних годов (рис. 5). Так, высокие скорости понижения водосборов наблюдались четыре раза в 2006, 2009, 2012 и 2017 гг. Если до 2012 г. после усиления эрозионных процессов на водосборах происходило плавное снижение скорости эрозии, то в 2013 г. произошло ее резкое снижение, и наблюдалась минимально низкая за весь период наблюдения средняя скорость понижения водосборов (0.23 ± 0.03 мкм г.⁻¹). В последующий период (2013–2017 гг.) в целом наблюдалось постепенное усиление эрозионных процессов на водосборах, что не фиксировалось до этого.

ВЫВОДЫ

Подводя итог изучения гидрологического режима, концентраций и выноса взвешенного вещества водотоками, а также интенсивности эрозионных процессов на водосборных пространствах губ Чупа, Медвежья, Кереть и Летняя выделим главное:

- суммарный ручьевого сток воды не превышает 45 млн м³ г.⁻¹, речной сток не превышает 2.5 км³ г.⁻¹;
- максимальный сток воды происходит в весенний паводок и достигает 55% от годового стока;
- в крупных ручьях вероятность обнаружения концентрации взвешенного вещества 5–20 мг/л составляет 0.667;
- в средних и малых ручьях вероятность обнаружения концентрации взвешенного вещества 0.4–5.5 мг/л составляет 0.648–0.943;
- в реках вероятность обнаружения концентрации взвешенного вещества 1.5–3.0 мг/л составляет 0.724;
- отмечается высокая частота встречаемости концентрации взвешенного вещества более 27 мг/л (0.101);
- суммарный ручьевого сток взвешенного вещества в районе не превышает 500 т г.⁻¹, речной сток — 6500 т г.⁻¹;
- модуль твердого стока в водотоках не превышает 25 т км⁻² г.⁻¹ и в среднем составляет 2 т км⁻² г.⁻¹;
- скорость понижения водосборов не превышает 12 мкм г.⁻¹ (в среднем около 1 мкм г.⁻¹). Низкая скорость эрозии предопределена геолого-геоморфологическим строением территории и географическим положением региона (в первую очередь продолжительным зимним периодом).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ММБИ РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят зав. ББС “Картеш” к. б. н. А.А. Сухотина, д. б. н. В.Я. Бергера, Е.И. Лихареву за помощь в выполнении работ.

FUNDING

The work was carried out within the framework of the state task of the Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the head of the White Sea Biological Station “Kartesh” Candidate of Biological Sciences A.A. Sukhotin, Doctor of Biological Science V.Ya. Berger, E.I. Likhareva for help in carrying out the work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гордеев В.В. Геохимия системы река–море. М.: И.П. Матушкина И.И., 2012. 452 с.
- Гордеев В.В. Речной сток в океане и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 160 с.
- Бурдыкина А.П. Твердый сток рек Советской Арктики. Л., фонды ААНИИ, 1949. Т. 1. 160 с.
- Долотов Ю.С., Филатов Н.Н., Шевченко В.П., Петров М.П., Толстиков А.В., Здорovenнов Р.Э., Платонов А.В., Филиппов А.С., Бушуев К.Л., Кутчева И.П., Денисенко Н.В., Штайн Р., Заукель К. Комплексные исследования в Онежском заливе Белого моря и эстуарии реки Онега в летний период // Океанология. 2008. Т. 48. № 2. С. 276–289.
- Долотов Ю.С., Филатов Н.Н., Шевченко В.П., Немова Н.Н., Римский-Корсаков Н.А., Денисенко Н.В., Кутчева И.П., Бояринов П.М., Петров М.П., Лифшиц В.Х., Платонов А.В., Демина Л.Л., Кухарев В.И., Коваленко В.Н., Здорovenнов Р.Э., Ратькова Т.Н., Сергеева О.М., Новигатский А.Н., Паутова Л.А., Филиппова К.В. Мониторинг приливоотливных обстановок в эстуариях Карельского побережья Белого моря // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 6. С. 670–688.
- Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы / под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск: Изд. КарНЦ РАН, 2004. 224 с.
- Кукал З. Скорость геологических процессов. М.: Мир, 1987. 246 с.
- Лисицын А.П., Шевченко В.П., Буренков В.И., Копелевич О.В., Васильев Л.Ю. Взвесь и гидрооптика Белого моря – новые закономерности количественного распределения и гранулометрии // Актуальные проблемы океанологии / гл. ред. Н.П. Лавров. М.: Наука, 2003. С. 556–607.
- Лисицын А.П., Шевченко В.П. Проект “Система Белого моря” – четырехмерное изучение морей // Природа. 2008. № 11. С. 81–82.
- Лукашин В.Н., Шевченко В.П., Ключиткин А.А., Новигатский А.Н., Прего Р. Взвеси и потоки вещества в Кандалакшском заливе Белого моря // Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения: Материалы междунар. конф. Архангельск: Ин-т экол. проблем Севера УрО РАН, 2002. Т. 2. С. 453–457.
- Митяев М.В., Герасимова М.В., Дружков Н.В. Перенос взвешенного вещества в водотоках Мурманского побережья // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 3. С. 301–306.
- Митяев М.В., Герасимова М.В. Современные экзогенные процессы. Карельский берег Кандалакшского залива Белого моря. Апатиты: Изд. Кольского науч. центра РАН, 2010. 102 с.
- Митяев М.В., Герасимова М.В. Сток воды, взвешенных веществ и интенсивность эрозии на Мурманском побережье // Изв. РАН. Сер. геогр. 2018. № 1. С. 111–128.
- Примаков И.М., Иванова Н.А., Ласовецкая О.А., Чернова Е.П. Исследования морского зоопланктона в Керетской губе // Вестн. СПб. ун-та. 2009. Сер. 3. Вып. 3. С. 135–145.
- Система Белого моря (природная среда водосбора Белого моря). М.: Научный мир, 2010. Т. I. 480 с.
- Система Белого моря (рассеянный осадочный материал, потоки вещества, микробные процессы и загрязнения атмосферы). М.: Научный мир, 2013. Т. III. 784 с.
- Страхов Н.М. Основные черты питания современных внутриконтинентальных водоемов осадочным материалом // Образование осадков в современных водоемах. М.: АН СССР, 1954. С. 35–80.
- Филатов Н.Н., Назарова Л.Е., Георгиев А.П., Семенов А.В., Анциферова А.Р., Ожигина В.Н., Богдан М.И. Изменения и изменчивость климата европейского Севера России и их влияние на водные объекты // Арктика. 2012. № 2 (6). С. 80–94.
- Шевченко В.П., Северина О.В., Майорова Н.Г., Иванов Г.И. Количественное распределение и состав взвеси в эстуариях Оби и Енисея // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1996. № 3. С. 81–86.
- Dolotov Yu.S., Kovalenko V.N., Lifshits V.Kh., Petrov M.P., Platonov A.V., Prego P., Rat'kova M.P., Filatov N.N., Shevchenko V.P. On the dynamics of water and suspension in the Keret' River estuary (the Karelian coast of the White Sea) // Oceanology. 2002. Vol. 42. № 5. P. 731–740.
- Koukina S.E., Calafat-Frau A., Hummel H., Palerud R. Trace metals in suspended particulate matter and sediments from the Severnaya Dvina estuary, Russian Arctic // Polar Record. 2001. № 37 (202). P. 249–256.

Flow Waters, Suspended Matter and Speed of Erosion of Karelian Coast

M. V. Mityaev¹, * and M. V. Gerasimova¹

¹Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia

*e-mail: mityaev@mmbi.info

To determine the rate of decline in the drainage areas of the Karelian Coast, in the 2005–2017 period year-round observations of watercourses flowing into the Chupa, Medvezhya, Keret and Letnaya bays of the White Sea were carried out. In rivers and streams, seasonal and annual changes in water discharge and suspended matter concentrations were studied. It was revealed that the river water runoff does not exceed 2.5 km³, and

the stream runoff does not exceed 45 mln m³ per year. The annual water runoff is distributed as follows: on average, 40 ± 2% is carried out during the spring flood, 33 ± 1% during the autumn flood, and 23 ± 1% during the summer low water. Despite the length of the winter period, the winter water runoff never exceeds 8% of the annual runoff. According to the suspended matter concentration, the watercourses of the Karelian Coast are classified as watercourses with a pure water mass, since the long-term average concentration of suspended matter in them is 3.30 ± 0.95 mg/L. It was revealed that the total river runoff of suspended matter is 6.5 thous. t per year; streams carry out less than 500 t of suspended matter per year. Based on the data obtained, an assessment was made of the module of suspended matter runoff and the rate of erosion of watersheds. The mean long-term modulus of suspended matter runoff averages 1.98 ± 0.31 t km⁻² per year, the erosion rate is 1.1 ± 0.17 μm per year ($n = 382$). The low runoff modulus and the slow rate of decline in the catchment areas are due to the geographical location and geological and geomorphologic structure of the Karelian Coast.

Keywords: Karelian Coast, suspended matter, module suspended matter yield, speed of erosion

REFERENCES

- Burdykina A.P. *Tverdyi stok rek Sovetskoi Arktiki* [Solid Runoff of the Soviet Arctic Rivers]. Leningrad: Funds of AANII, 1949, vol. 1. 160 p.
- Dolotov Yu.S., Filatov N.N., Shevchenko V.P., Petrov M.P., Tolstikov A.V., Zdorovenov R.E.H., Platonov A.V., Filippov A.S., Bushuev K.L., Kutcheva I.P., Denisenko N.V., Shtajn R., Zaukel' K. Comprehensive studies in the Onega Bay of the White Sea and the estuary of the Onega River in the summer. *Okeanologiya*, 2008, vol. 48, no. 2, pp. 276–289. (In Russ.).
- Dolotov Yu.S., Filatov N.N., Shevchenko V.P., Nemova N.N., Rimskij-Korsakov N.A., Denisenko N.V., Kutcheva I.P., Boyarinov P.M., Petrov M.P., Lifshits V.Kh., Platonov A.V., Demina L.L., Kukharev V.I., Kovalenko V.N., Zdorovenov R.E., Rat'kova T.N., Sergeeva O.M., Novigatskii A.N., Pautova L.A., Filipieva K.V., Nothig E.-M., Lorozzen C. Monitoring Tidal Conditions in Estuaries of the Karelian Coast of the White Sea. *Water Resour.*, 2005, vol. 32, no. 6, pp. 611–628.
- Dolotov Yu. S., Kovalenko V.N., Lifshits V.Kh., Petrov M.P., Platonov A.V., Prego P., Rat'kova M.P., Filatov N.N., Shevchenko V.P. On the dynamics of water and suspension in the Keret' River estuary (the Karelian Coast of the White Sea). *Okeanologiya*, 2002, vol. 42, no. 5, pp. 731–740. (In Russ.).
- Gordeev V.V. *Geokhimiya sistemy reka-more* [Geochemistry of the River-Sea System]. Moscow: MATUSHKINA I.I. Publ., 2012. 452 p.
- Gordeev V.V. *Rechnoi stok v okeane i cherty ego geokhimii* [River Runoff in the Ocean and Features of Its Geochemistry]. Moscow: Nauka Publ., 1983. 160 p.
- Filatov N.N., Nazarova L.E., Georgiev A.P., Semenov A.V., Anciferova A.R., Ozhigina V.N., Bogdan M.I. Changes and variability of the climate of the European North of Russia and their impact on water bodies. *Arktika*, 2012, no. 2 (6), pp. 80–94. (In Russ.).
- Klimat Karelii: izmenchivost' i vliyanie na vodnye ob'ekty i vodosbory* [Climate of Karelia: Variability and Impact on Water Bodies and Watersheds]. Filatov N.N., Ed. Petrozavodsk: KarSC RAS Publ., 2004. 224 p.
- Koukina S.E., Calafat-Frau A., Hummel H., and Palerud R. Trace metals in suspended particulate matter and sediments from the Severnaya Dvina estuary, Russian Arctic. *Polar Record*, 2001, no. 37 (202), pp. 249–256.
- Kukal Z. *Skorost' geologicheskikh protsessov* [Speed of Geological Processes]. Moscow: World Publ., 1987. 246 p.
- Lisitsyn A.P. Suspended matter and hydrooptics of the White Sea — new patterns of quantitative distribution and granulometry. In *Aktual'nye problemy okeanologii: Vzves' i gidrooptika Belogo morya — novye zakonomernosti kolichestvennogo raspredeleniya i granulometrii* [Actual Problems of Oceanology]. Shevchenko V.P., Burenkov V.I., Kopelevich O.V., Vasil'ev L.Yu., Laverov N.P., Eds. Moscow: Nauka Publ., 2003, pp. 556–607. (In Russ.).
- Lisitsyn A.P., Shevchenko V.P. Project “White Sea System” — four-dimensional study of the seas. *Priroda*, 2008, no. 11, pp. 81–82. (In Russ.).
- Lukashin V.N. Suspended matter and fluxes in the Kandalaksha Bay of the White Sea. In *Ekologiya severnykh territorii Rossii. Problemy, prognoz situatsii, puti razvitiya, resheniya: Vzvesi i potoki veshchestva v Kandalakshskom zalive Belogo morya* [Ecology of the Northern Territories of Russia Problems, Forecast of the Situation, Ways of Development, Solutions]. Shevchenko V.P., Klyuvitkin A.A., Novigatskii A.N., Prego R., Eds. Arkhangelsk: Institute of Ecological Problems of the North, UB RAS Publ., 2002, vol. 2, pp. 453–457. (In Russ.).
- Mityaev M.V., Gerasimova M.V., Druzhkov N.V. Transport of Suspended Material in Streams of the Murmansk Coastal Area. *Water Resour.*, 2005, vol. 32, no. 3, pp. 270–275.
- Mityaev M.V., Gerasimova M.V. *Sovremennye ekzogennye protsessy. Karel'skii bereg Kandalakshskogo zaliva Belogo morya* [Modern Exogenous Processes. Karelian Coast of the Kandalaksha Bay of the White Sea]. Apatity: KSC RAS Publ., 2010. 102 p.
- Mityaev M.V., Gerasimova M.V. Runoff of water, suspended solids and erosion intensity on the Murmansk coast. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2018, no. 1, pp. 111–128. (In Russ.).
- Primakov I.M., Ivanova N.A., Lasoveckaya O.A. Chernova E.P. Research of marine zooplankton in the Keret Bay. *Vestn. St. Petersburg. Univ. Ser. 3*, 2009, ed. 3, pp. 135–145. (In Russ.).
- Sistema Belogo morya (prirodnaya sreda vodosbora Belogo morya)* [White Sea System (Natural Environment of the White Sea Watershed)]. Moscow: Nauchnyi Mir Publ., 2010, vol. I. 480 p.

- Sistema Belogo morya (rasseyannyy osadochnyy material, potoki veshchestva, mikrobye protsessy i zagryazneniya atmosfery)* [The White Sea System (Dispersed Sedimentary Material, Matter Flows, Microbial Processes and Atmospheric Pollution)]. Moscow: Nauchnyi Mir Publ., 2013, vol. III. 784 p.
- Strakhov N.M. The main features of the nutrition of modern inland water bodies with sedimentary material. In *Obrazovanie osadkov v sovremennykh vodoemakh: Os-
novnye cherty pitaniya sovremennykh vnutrikontinental'nykh vodoemov osadochnym materialom* [Precipitation Formation in Modern Reservoirs]. Moscow: Akad Nauk SSSR, 1954, pp. 35–80. (In Russ.).
- Shevchenko V.P., Severina O.V., Majorova N.G., Ivanov G.I. Quantitative Distribution and Composition of Suspended Matter in the Ob and Yenisei Estuaries. *Vestn. Mosk. Gos. Univ., Geol., Ser. 4*, 1996, no. 3, pp. 81–86. (In Russ.).

РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ В ЗАДАЧАХ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА СУШИ

© 2023 г. С. В. Харченко^{a, b, *}

^aМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^bИнститут географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: har4enkkoff@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.04.2022 г.

После доработки 31.10.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

В статье рассмотрено современное состояние методов распознавания образов для автоматического и полуавтоматического составления геоморфологических карт. В настоящее время среди специалистов в области морфометрии и математического моделирования рельефа широко распространено мнение, что экспертные знания и правила, используемые для создания таких карт, могут быть описаны количественно и представлены алгоритмически. Основные нерешенные пока удовлетворительно проблемы автоматизации картографирования рельефа: распознавание морфологически идентичных форм разного генезиса, выработка критериев перехода от морфологических к возрастным и генетическим характеристикам поверхностей, превентивный подбор оптимальной детальности данных дистанционного зондирования (не всегда наиболее детальные данные оказываются эффективнее всего в модели), выбор и обоснование весовых коэффициентов количественных переменных. Приведены примеры использования нескольких методов распознавания образов в геоморфологии вообще и геоморфологическом картографировании: обобщенных линейных моделей, классификаций деревьев решений, искусственных нейронных сетей и некоторых других методов, включая “компьютерное зрение”. Показано, что точность различных моделей в отношении распознавания форм рельефа (равно как и геологических структур) составляет порядка 50–70%, реже больше. В то же время распознавание конкретных форм, в зависимости от исходных данных и степени выраженности на них признаков данных форм рельефа, может иногда быть даже абсолютной (100%), но чаще всего точность при тестировании находится в пределах 90%.

Ключевые слова: распознавание образов, геоморфологическое картографирование, классификация с обучением, анализ изображений

DOI: 10.31857/S2587556623010089, **EDN:** LGMRCF

ВВЕДЕНИЕ

Составление геоморфологических карт, общих и частных, как правило, базируется на использовании информации геологических изысканий, т.е. изучения субстрата (данные бурения, разведка геофизическими методами, геохимический анализ проб), анализа топографического устройства территории и истории развития рельефа и ландшафтов (в том числе с привлечением методов датирования). Создание геоморфологических карт в обычно используемой хроно-морфо-генетической легенде (Спиридонов, 1974) — сложный процесс, иногда, с большой долей неопределенности в проведении итоговых границ разными специалистами. Элемент творчества в картографировании рельефа можно рассматривать и как его сильную сторону, и как недостаток экспертно-мануального подхода в изучении земной поверхности. Ярким примером однозначного

отношения к элементу творчества можно считать работы А.Н. Ласточкина (1987; Lastochkin, 2018), посвященные его концепции морфодинамического анализа. В своих трудах этот исследователь призывает формализовать членение земной поверхности на элементы и вести геоморфологический (или, скорее, морфологический) анализ в их границах, а также акцентировать внимание на пространственную сопряженность элементов (точек, линий и граней) разных типов. С острым одобрением о попытках таких формализаций высказывался Д.А. Тимофеев (1984), в том числе в заметке к (Лобанов, 1988).

Многие другие специалисты, изучающие рельеф, понимая неоднозначность традиционного геоморфологического картографирования (далее — ГК), тем не менее, кажется, не видят возможности воспроизводить карты рельефа, составленные в традиционных легендах, автоматическими или

полуавтоматическими методами. Действительно, многообразие форм земной поверхности, созданных одним и тем же процессом, но претерпевших последующую переработку [явления геоморфологической конвергенции и гомологии (Гаврилов, 2016; Лопатин, 2007; Тимофеев, 2006)], заставляет убедиться в невозможности даже частичной автоматизации создания геоморфологических карт.

В то же время активно развивается автоматизированное частное геоморфологическое картографирование, в первую очередь, морфометрическое. За рубежом сформировалось относительно новое научное направление – “геоморфометрия”, в России развиваемое преимущественно П.А. Шарым (MacMillan and Shary, 2009; Shary et al., 2002), И.В. Флоринским (Florinsky, 2016; Florinsky et al., 2002) и др. Разные исследователи продолжают предпринимать попытки все более тонкого и осмысленного выделения элементов рельефа, отдельных форм и даже генетических типов. Все эти работы базируются на использовании методов распознавания образов. Здесь и далее под распознаванием образов понимается выделение качественных группировок объектов (кластеров, классов, типов) по входным количественным или качественным переменным. Ряд авторов (например, (Anders et al., 2011)) высказывают мнение, что “экспертные знания” о принципах проведения геоморфологических границ можно преобразовать в последовательности математических правил, которые позволят любому конечному пользователю получать цифровые карты поверхности Земли в автоматическом или полуавтоматическом режиме.

В данной статье автор пытается показать современное состояние автоматического и полуавтоматического картографирования рельефа, проблемы их дальнейшего развития и перспективы. Среди всех методов распознавания образов акцент в статье сделан на наиболее перспективной, на наш взгляд, группе методов – классификации с обучением. Именно методы этой группы позволяют формализовать, пусть даже в неявном виде, экспертные правила проведения геоморфологических границ.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ В ГЕОМОРФОЛОГИИ

Применимость методов автоматизированного картографирования рельефа ограничивается доступными исходными данными. Если в перечне доступных исходных данных – только, например, цифровые модели рельефа, то из них принципиально невозможно извлечь иную информацию о рельефе и отложениях, которая не отражается в морфологии земной поверхности. А вот что именно отражается в морфологии поверхности – остается открытым вопросом. Существуют работы, в том

числе далеко не последних лет, с суждениями по морфологическим индикаторам о возрасте, например, ледниковой и водно-ледниковой морфоскульптуры. Подобное осуществлено Л.Р. Серебрянным и И.Н. Чукленковой (1973), где первичную и вторичную моренные равнины северо-запада тогдашнего СССР авторы пытаются разделить по параметру плотности замкнутых озерных понижений, не соединенных эрозионной сетью. Нужно понимать, что морфологическими индикаторами являются не только стандартные морфометрические параметры, но и морфографические характеристики (которые, несмотря на традиционное понимание их как “качественных”, все же формализуемы и количественно), параметры текстуры расчленения, спектра поля высот, разнорядковых базисных и вершинных поверхностей и многие другие. Обычно все индикаторы сводятся в единую таблицу, где один из столбцов – распознаваемый класс объекта, а все прочие – заполнены количественными или качественными значениями независимых переменных.

Учет других данных (космических снимков в различных диапазонах съемки, аэрофотосъемки, моделей смещения отметок поверхности за разные временные срезы, терморазведки и т.д.) и использование новых методов (например, методов компьютерного зрения, которые “распознают” образы в буквальном смысле, пытаясь уподобить результат визуальному восприятию человеком окружающих его объектов) и гибридных ансамблей методов – позволяет существенно усилить эффективность создаваемых математических моделей.

Число проблем в области автоматизированного ГК с годами не уменьшается – по мере того как решение находят одни проблемы, появляются новые. Тем не менее, предсказательный потенциал описываемых в статьях моделей распознавания геоморфологических границ (а, следовательно, и элементов, и форм, и типов рельефа, разделяемых этими границами) неуклонно растет.

Одна из ключевых проблем, не находящая пока своего решения – геоморфологическая конвергенция (морфологически подобные формы рельефа разного генезиса) и гомология (формы рельефа с многообразием визуальных очертаний, создаваемые одним и тем же процессом). В (Харченко, 2020) мы называем среди возможных подходов к разделению конвергентных форм учет парагенезиса (геоморфологического окружения) самой формы, в частности катенарные пространственные отношения. Отдельный подход – рассмотрение осложняющих ту или иную форму рельефа более мелких форм, наличие которых может быть классификационным признаком.

Иначе ставит вопрос известный британский геоморфолог Я. Эванс (Evans, 2012). Он рассужда-

ет о том, каково сейчас содержание категории “форма рельефа”, если поверхности с идентичной морфологией можно называть различными формами. Эванс полагает, что сейчас наблюдаются тенденции 1) на упрощение легенд геоморфологических карт с некоторым отказом от параметров рельефа, не находящихся отражение в морфологии и 2) на сдвиг интереса исследователей от дискретного подхода с картографированием отдельных геоморфологических единиц к континуальному подходу, при котором характеризуется непрерывное поле высот. Так или иначе, указывается на постепенно снижающееся внимание к характеристикам рельефа, не извлекаемым из морфометрических данных.

Очевидно, отказ от картографирования генетических и возрастных характеристик рельефа не может быть оправдан, однако, возможно, следует сконцентрировать внимание на разработке сложных морфометрических параметров, коррелирующих с этими характеристиками. Простой пример такого перехода от морфологии к возрасту — работы В.П. Солоненко (1977) по морфологическим характеристикам сейсмостектонических рвов, образовавших вертикальные уступы в породах с различными прочностными свойствами, и тенденциям изменения их профиля в зависимости от времени землетрясения.

Один из аспектов проблемы поиска репрезентативных морфометрических характеристик состоит в сравнительной оценке важности переменных (т.е. определения их весов). Очень показательна в этом отношении работа И. Денга с соавторами (Deng et al., 2006), осуществившими нечеткую *k-means* кластеризацию типов почв в зависимости от характеристик рельефа, назначая входным переменным разные комбинации весов (всего 102 разных сочетаний весов), и показавшими, что наилучшей надежности результаты кластеризации достигаются именно при тонкой настройке весовых коэффициентов. Было продемонстрировано, например, что прогноз типа почв достигает максимальной эффективности при придании параметрам крутизны склона и топографического индекса увлажнения повышенных весов (3–5) на фоне прочих характеристик. По сути, примененный подход — некий гибрид кластеризации и классификации с обучением, ведь использованная техника подразумевает подгонку весов при условии максимизации качества предсказания — а для этого требуется обучающая выборка.

Другая проблема — поиск оптимальных характеристик (в частности разрешающей способности) данных дистанционного зондирования для выделения по ним геоморфологических границ разного ранга. С. Каватци с соавторами (Cavazzi et al., 2013), исследуя потенциал ЦМР различного

разрешения для предсказания физико-механических свойств почв (морфометрические характеристики рельефа — часто используемые ковариаты свойств почвы) провели следующий эксперимент. С использованием двух распространенных методов классификации с обучением — искусственных нейронных сетей и случайного леса — оценена эффективность прогноза типа почв на трех ключевых участках в Ирландии по морфометрическим данным с разной подробностью. Исходная модель высот разрешением 20 м сглаживалась скользящим окном размерами 3×3 , 5×5 , ..., 21×21 ячеек. Затем каждая из результирующих моделей была передискретизована до разрешений 30, 40, ..., 260 м. В результате авторы имели 143 модели поля высот, с разной подробностью характеризующих реальный рельеф. По ним были рассчитаны 11 морфометрических характеристик поверхности, имеющих связь с характером почвенного покрова: от уклона и экспозиции до глубины долин и относительных позиций конкретных точек на фасетках склонов (верхняя—средняя—нижняя часть склона). Эффективность классификации типов почвы по различным исходным данным упомянутыми двумя методами менялась от 35 до 60%. Всего в эксперименте были задействованы три ключевые участка — наилучшие результаты по ним были получены, как ни странно, не при максимальной детальности и минимальном сглаживании ЦМР, а, например, при размерах ячейки 260 м и сглаживании окном 19×19 ячеек. Проблема предварительного определения оптимальных параметров исходных данных остается открытой.

Но сам факт, что по 11 базовым морфометрическим характеристикам рельефа (без привлечения космических снимков, сложных метрик текстуры рельефа, методов анализа изображений) удастся достичь 60% точности воспроизводства экспертно установленных почвенных границ — очень показателен. Думается, применение методов классификации с обучением в геоморфологии и смежных областях имеет большие перспективы.

Активно предпринимаются попытки адаптации сверточных сетей для более сложной задачи картографирования литологических разностей, т.е., по сути, составления готовых геологических карт. Так, в (Brandmeier and Chen, 2019) по свободно распространяемым снимкам *Aster* и *Sentinel-2A* с применением открытой технологии *U-Net* построена геологическая карта участка размерами 20×50 км на северо-востоке провинции Южная Австралия. Итоговая точность воспроизводства литологических границ на дневной поверхности, установленных по данным полевых геологических съемок, составила 75%. В геоморфологическом картографировании сверточные нейронные сети применялись до сих пор лишь для выделения отдельных более или менее однообразных форм

рельефа — кратеры, вулканические конусы, меандрирующие русла и т.д. (Li and Hsu, 2020).

Сегодня передовые технологии распознавания образов решают задачу не только классификации, но еще и обнаружения (*detection*) и проведения границ (*segmentation*). Классификация в ГК призвана ответить на вопрос: форма(ы) рельефа какого(их) типов вероятно встречае(ю)тся на территории? Детектирование или обнаружение нацелено на определение позиций (центроид и некая очерчивающая геометрия, чаще всего — прямоугольник) для форм рельефа, модель распознавания которых используется. Сегментация — наиболее трудоемкая и наименее разработанная технология, особенно в приложении к составлению карт — позволяет разделить изображение на части, посредством делимитации границ различных форм. Здесь под изображением понимаются крупномасштабные цифровые модели рельефа, мультиспектральные аэро- и космические снимки и т.д., а также комбинированные стеки (пакеты) этих данных.

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ В ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОМ КАРТОГРАФИРОВАНИИ

Одной из первых и наиболее известных работ по автоматизированным классификациям форм рельефа является отчет Р. МакМиллана (MacMillan and Pettapiece, 2000) по рельефу десяти разных генетических типов на 26 ключевых участках в провинции Альберта (Канада). Назначение данной классификации было сугубо прикладное — последующая разработка систем точного земледелия для различных типов рельефа. Авторами используется разработанная им же так называемая *landform segmentation model (LSM)* (MacMillan et al., 2000), представляющая собой усовершенствованную классификацию Д. Пеннока (Pennock et al., 1987). Все эти классификации, по существу, представляют собой классификации без обучения или кластеризации (на основе правил нечеткой логики — (метод *fuzzy k-means*), когда по ряду входных морфометрических переменных устанавливаются их характерные комбинации, соответствующие той или иной форме рельефа или элементу сложных форм. К сожалению, наиболее распространенные методы кластеризации не в состоянии воспроизвести нечеткие границы классов, а потому в задачах геоморфологического картографирования могут не быть эффективны (в зависимости от того, насколько удачно подобран набор переменных).

Более мощными являются методы с применением обучения, т.е. “априорного” экспертного знания о принадлежности той или иной поверхности различным формам рельефа. Даже если характерные интервалы входных переменных у объ-

ектов разных классов (скажем, глубина расчленения в низко- и среднегорьях) пересекаются, методы классификации с обучением позволяют установить наиболее надежный класс для каждой конкретной величины входной переменной или комбинации нескольких из них (непараметрические методы) или даже оценить вероятность отнесения к каждому из возможных классов (параметрические методы, основанные на допущениях о характере статистических распределений входных переменных).

Рассмотрим основные методы классификации с обучением, применяемые в геоморфологии [по (Marmion et al., 2008; Miska and Jan, 2005; и др.)].

Обобщенные линейные модели (ОЛМ/GLM) являются расширением классической линейной регрессии, когда устанавливается характер зависимости между независимой количественной переменной (предиктором) и зависимым количественным же “откликом”. Канонические примеры линейной связи — падение температуры воздуха с подъемом, увеличение степени окатанности галек с ростом их размера (Крамбейн, 1969). Обобщенные линейные модели, во-первых, схожи с множественной линейной регрессией, так как могут принимать в качестве входных данных целый набор предикторов, во-вторых, могут опираться как на количественные, так и на качественные переменные, в-третьих, могут иметь качественный биномиальный отклик (да/нет, опасно/безопасно). Наиболее известным методом в группе ОЛМ является так называемая логистическая регрессия, когда в зависимости от некоего набора переменных предсказывается отношение шансов позитивного и негативного исходов (допустим, отношение шансов, что участок потенциально оползневой, а не безопасный (Atkinson et al., 1998; Ayalew and Yamagishi, 2005); что наносы накапливались в глубоководных фациальных условиях, а не в мелководных (Link, 1964)).

Деревья классификации (частный случай деревьев решений) является альтернативой методам регрессии. Этот непараметрический метод основан на последовательном бинарном разбиении данных (на каждом этапе построения дерева по какой-то одной переменной и конкретной ее пороговой величине), которое наилучшим образом сепарирует объекты в классы. Построение деревьев решений напоминает использование справочников-определителей растений, когда требуется последовательно отвечать на поставленные вопросы “да” или “нет” и в качестве результата получать вид или род искомого растения. При успешном использовании дерева иногда удается строго разделить классы объектов (формы рельефа по морфометрическим индикаторам) в различные ветви этого дерева. Но, во-первых, не всегда классы оказываются разделимы, а, во-вто-

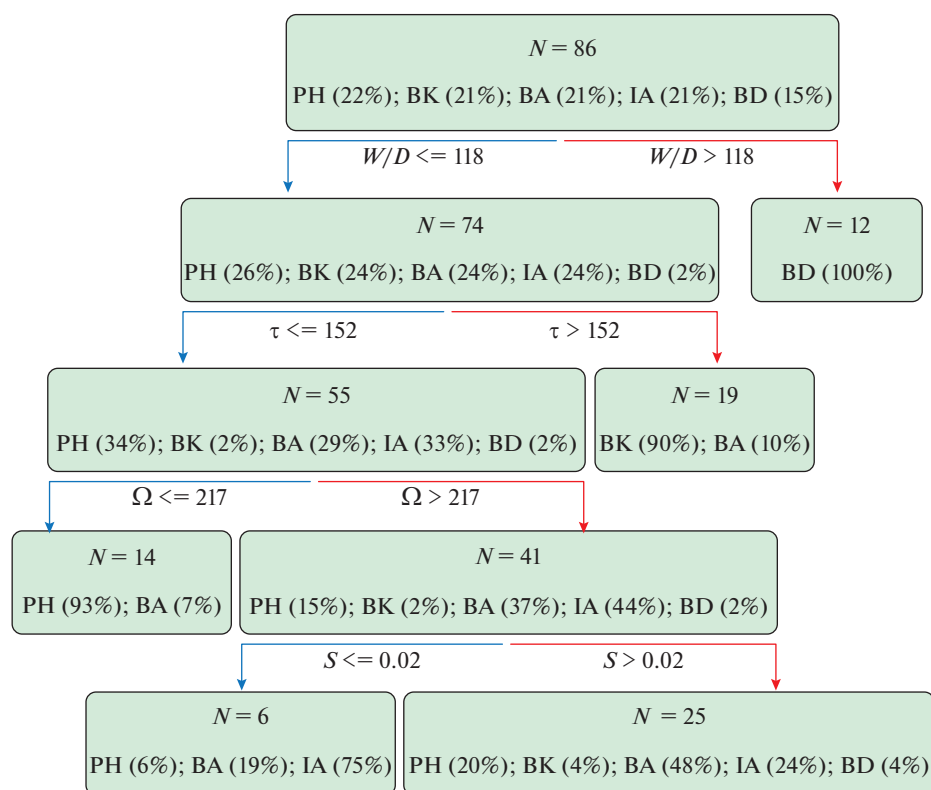


Рис. 1. Дерево классификации русел временных водотоков в пустынях штата Аризона, США.

Примечание: В процентах показаны частоты встречаемости русел разных типов (БК — bedrock/врезанные в коренные породы без аллювиального заполнения; БА — bedrock with alluvium/врезанные в коренные породы с аллювиальным заполнением вреза; IA — incised alluvium/врезанные в переуглубления долин, выполненные древним аллювием; BD — braided/многорукавные; PH — piedmont headwater/предгорные маловодные истоки рек) в том или ином “узле” дерева, с присущими этому узлу гидравлическими параметрами). Гидравлические параметры: W/D — отношение ширины к глубине русла, S — уклон русла, Ω — энергия потока, τ — напряжение сдвига.

Составлено по (Sutfin et al., 2014), упрощено автором.

рых, слишком сложные деревья совершенно не интерпретируемы исследователем, трудно сказать, какие переменные в итоге являются репрезентативными для автоматического распознавания тех или иных форм рельефа. Сейчас разработаны специальные критерии нахождения оптимума сложности и информативности дерева.

Интересный пример использования деревьев классификации представлен в (Sutfin et al., 2014), где авторы обучают статистическую модель распознавать пять различных типов русел временных водотоков в пустынях штата Аризона. Среди входных параметров: отношение ширины к глубине (W/D), уклон русла (S), напряжение сдвига для пород, выстилающих русло (τ), энергия потока (Q) и удельная энергия потока на единицу длины водотока (q). Созданная модель схематично показана на рис. 1. Наилучшим из возможных разделителей (т.е. таким, который сразу же с минимальной ошибкой позволяет отделить русла хотя бы одного типа от остальных) на первой итерации модели оказывается отношение ширины русла к глубине, при значении этого параметра

$W/D > 118$ все русла в выборке гарантированно многорукавные — BD, что не удивительно. На второй итерации оставшиеся объекты наилучшим образом сепарируются по различиям напряжения сдвига τ , зависящего от гидравлического радиуса, уклона русла и размерности преобладающей фракции обломочного материала. На этом этапе в отдельную группу обособляются преимущественно врезанные в коренные породы русла как без выстилания аллювием — BK, так и, в гораздо меньшей степени, с ним — BA. В оставшуюся часть дерева попадают остальные типы русел. Параметр для сепарации и его пороговое значение выбираются на каждом этапе таким образом, чтобы в ветвях дерева ниже момента разделения — объекты каждого класса были разделены с как можно меньшей дисперсией, в идеальном случае, 100% объектов каждого класса в своей ветви. Построение дерева классификации, основанного на гидравлических характеристиках эфемерных водотоков, позволяет авторам решать обратную задачу — от дешифрирования морфологического

типа пересохшего русла к динамическими характеристикам потока, который это русло создал.

Метод случайного леса (RF) основан на множественном применении деревьев решений к одним и тем же данным (Breiman, 2001). Для построения модели случайного леса из исходного выборки для обучения многократно извлекаются подвыборки, по каждой из которых строится дерево классификации. Затем отдельные деревья, обученные на различных подвыборках, получают веса в зависимости от их эффективности. При приложении созданного случайного леса к новым данным происходит следующее: эти данные классифицируются по каждому из сотен или тысяч входящих в модель деревьев, итоговый класс объекта определяется “голосованием” деревьев, либо простым большинством, либо с учетом весов деревьев, в разных модификациях данного метода. Дерево обновляется из каждого доступного варианта обучения. По состоянию десятилетней давности случайный лес в решении геоморфологических задач вообще не применялся (Marmion, 2008), но уже сейчас случайный лес, как один из наиболее эффективных методов классификации, становится стандартом в том числе и в геоморфологии.

Так, в (Veronesi and Hurni, 2014) по Швейцарским Альпам случайный лес использовался для автоматической классификации коренных склонов, осыпных шлейфов, пролювиальных конусов и днищ долин по данным *Swisstopo* (ЦМР и аэрофотоснимки). Veronesi и Hurni обучали и калибровали модель на участке к северо-востоку от города Сьон, а применяли ее для классификации на другом участке — к югу от города Альдорф на расстоянии более 100 км от первого участка. Итоговая степень сходства с ранее созданными геоморфологическими картами составила более 70%.

Однако метод случайного леса способен изыскивать в данных и более тонкие закономерности (при значительном размере выборки), нежели различение по фототону аэроснимков и морфометрическим характеристикам ЦМР таких разнородных объектов как склоны, днища долин и разного рода аккумулятивные тела — непосредственно у подножия склона (шлейфы) или же у устьевых точек локальных микроводосборов (конусы). Например, нами была предпринята попытка обучения модели случайного леса для распознавания границ 13 различных типов рельефа Кольского полуострова, выделенных на геоморфологической карте, составленной М.К. Граве (Геоморфологический ..., 1971) (рис. 2).

При подобной мультиномиальной классификации точность “нулевой модели” (референса) составляет в первом приближении $1/n$, где n — число выделяемых классов. Примерно такая точность может быть достигнута при случайном

выделении на карте границ типов рельефа. При том, что часть выделяемых типов морфологически схожи — например, цокольные возвышенные равнины с разным рисунком расчленения — требуется учет “узких”, специфических черт морфологического рисунка рельефа территории. Для обучения модели случайного леса использовались морфометрические характеристики рельефа только около 1.3% территории, при этом взаимная пространственная позиция наблюдений (отдельных точек местности), принадлежащих к разным типам рельефа, никак не учитывалась. Таким образом, точки с неизвестной принадлежностью к типу рельефу не могли быть классифицированы по географической близости к точкам с известной принадлежностью (чтобы классификация не превращалась в простую интерполяцию). В пределе, при использовании неудачной модели классификации игнорирование пространственной позиции точек наблюдений может привести к полностью хаотичной “картине” распределения классов, а не к выделению сколько-нибудь обширных, территориально единых группировок. Общая точность полученной модели составила почти 82%, что выше точности референса в 10.7 раз. При этом по отдельным типам рельефа частные точности достигают 90–95%, а по ряду наименее удачно распознаваемых типов — лишь 60–65% (табл. 1).

Протестирована эффективность классических локальных морфометрических переменных, рассчитываемых средствами ГИС SAGA, а также в сравнении фокальных текстурных характеристик, отвечающих тем или иным чертам (“текстуре”) рисунка расчленения в некоторой окрестности точки, но относимых непосредственно к ней самой. В качестве фокальных величин были рассчитаны так называемые спектральные характеристики рельефа (Харченко, 2017), извлекаемые из двумерного ряда Фурье, в который разлагается цифровая модель рельефа. Спектральные характеристики рельефа отвечают особенностям периодичности поля высот, его рисунка. Установлено, что точность классификации могла бы составить 65.3% при использовании стандартных морфометрических характеристик, 75.1% при действовании исключительно спектральных характеристик рельефа и 78.1% при использовании их же с добавлением параметра абсолютной высоты. Таким образом, почти все стандартные морфометрические характеристики, чаще всего локальные, “рассчитываемые в точке”, дают прирост точности менее чем в 4% (от 78.1 до 82%).

Именно с применением случайного леса (неотъемлемый элемент которого — оценка репрезентативности переменных по тому, насколько хорошо справляются с классификацией отдельные деревья с разным набором входных параметров) была установлена неочевидная закономерность: результаты разложения ЦМР в ряды Фурье

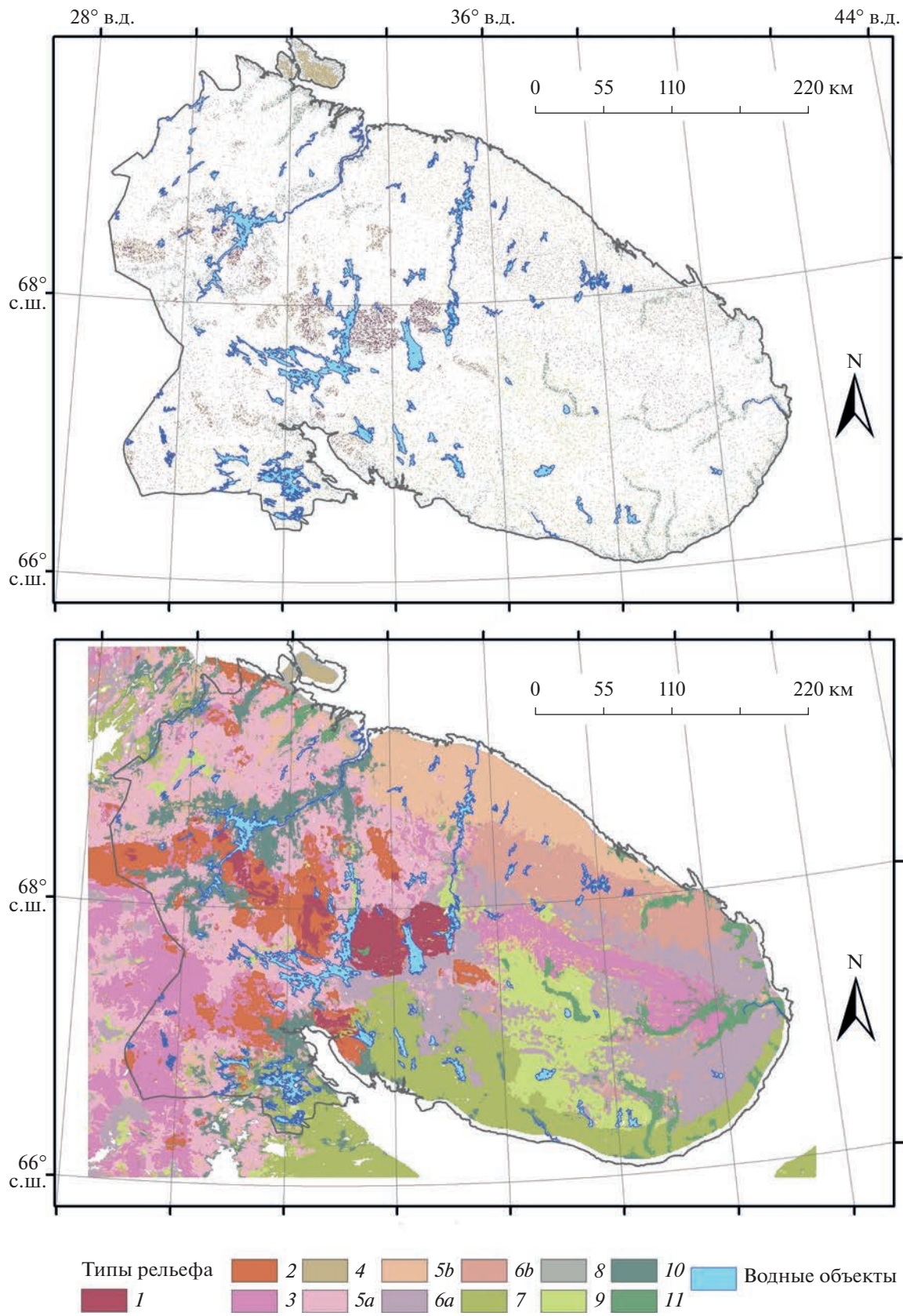


Рис. 2. Обучающая выборка (цветные точки) для классификации рельефа Кольского п-ова по морфометрическим индикаторам (а), результат классификации рельефа (качественный фон) (б). Надтипы (типы) рельефа: 1–3 – денудационно-тектонический (средневысотные глыбовые горы, низкие глыбовые горы, грядово-холмистый рельеф), 4 – структурный (пластовые возвышенные равнины), 5–8 – денудационный (цокольные равнины с древовидным расчленением, увалистые цокольные равнины, плоские цокольные равнины с экзарационной обработкой, плоские цокольные равнины с абразионной обработкой), 9–10 – водно-аккумулятивный (озерные и морские аккумулятивные равнины), 11 – долины крупных рек.

являются более показательными для автоматизированной геоморфологической классификации земной поверхности в морфогенетических легендах, нежели другие, более распространенные морфометрические параметры рельефа. Сама подобная оценка (сравнить переменные по показателю/эффективности) – ценный результат, однако гораздо более важным преимуществом метода кажется то, что он не требует ни предварительного выбора “правильных” переменных, ни придания им каких-либо весов.

Классические искусственные нейронные сети (ANN), применяемые в решении задач распознавания образов в геоморфологии и картографии еще с конца 1990-х годов (Leverington, 1997), активно стали внедряться в практику ГК лишь последние несколько лет. Нейронные сети как метод нацелен на воспроизводство связей между входными и выходной переменными при условии, что эти связи неизвестны заранее (даже сама их форма, линейная ли или какая угодно из нелинейных). Нейронная сеть содержит три различных типа слоев: входной слой (в который вводятся переменные среды), скрытые слои и выходной слой. Каждый промежуточный слой содержит так называемые нейроны (числовые комбинации входных переменных с различными весами); первоначально веса назначаются случайно, а затем подгоняются к оптимуму при условии минимизации ошибки прогноза. В (Luoto and Hjort, 2005) была оценена надежность искусственных нейронных сетей для геоморфологического картографирования. Л. Эрмини с соавторами (Ermini et al., 2005) применили нейронные сети для оценки устойчивости склонов, а И. Жу с коллегами (Zhu, 2007) сделали оценку потенциальных объемов взвешенных наносов по водотокам бассейна верхней

Янцзы, Браун искал границы последнего ледникового максимума на территории штата Мичиган по ЦМР (Brown, 1998). Как видно из приведенного перечня примеров, спектр применения нейронных сетей в геоморфологии широк, они используются в решении задач как пространственной классификации, так и прогнозирования динамических параметров геоморфологических процессов и явлений. Зачастую с их помощью решаются комбинированные задачи – к классу таковых относится, например, оценка “оползневой восприимчивости” (*landslide susceptibility*) территории. Подобная классификация позволяет ответить на вопрос – является ли данный фрагмент территории потенциально опасным в отношении возможных проявлений оползней, по аналогии с объектами в обучающей выборке (т.е. подход и пространственный, и кинематический одновременно).

Для территории пос. Красная Поляна, курорта Роза-Хутор и их окрестностей (Краснодарский край, Россия) с использованием обучаемых самоорганизующихся сетей Кохонена (в первоначальной форме это метод классификации без обучения – кластеризации) нами была спрогнозирована оползневая опасность (рис. 3). В качестве данных для обучения использована неопубликованная геоморфологическая карта территории горного кластера зимней Олимпиады-2014, составленная С.В. Шваревым (не опубликована). С нее взяты контуры стенок оползней мелкого заложения, различимые на местности при проведении полевых маршрутов. Независимой переменной здесь выступает биномиальная величина – участок оползневой (да/1) или участок (пока) не оползневой (нет/0). В качестве зависимых переменных – морфометрические параметры, рассчитанные как в *SAGA GIS*, так и с помощью ав-

Таблица 1. Фрагмент матрицы неточностей (confusion matrix) классификации рельефа Кольского полуострова методом случайного леса на базе (Kharchenko, 2021)

Факт. тип рельефа	Предсказание						Ошибка
	1	2	4	5a	8	9	
1	3383	4	136	5	1	0	0.05
2	19	2302	82	30	0	131	0.21
4	180	61	3067	66	0	1	0.13
5a	77	98	402	2163	104	3	0.39
8	0	4	0	36	3206	3	0.09
9	20	220	72	37	1	2706	0.21

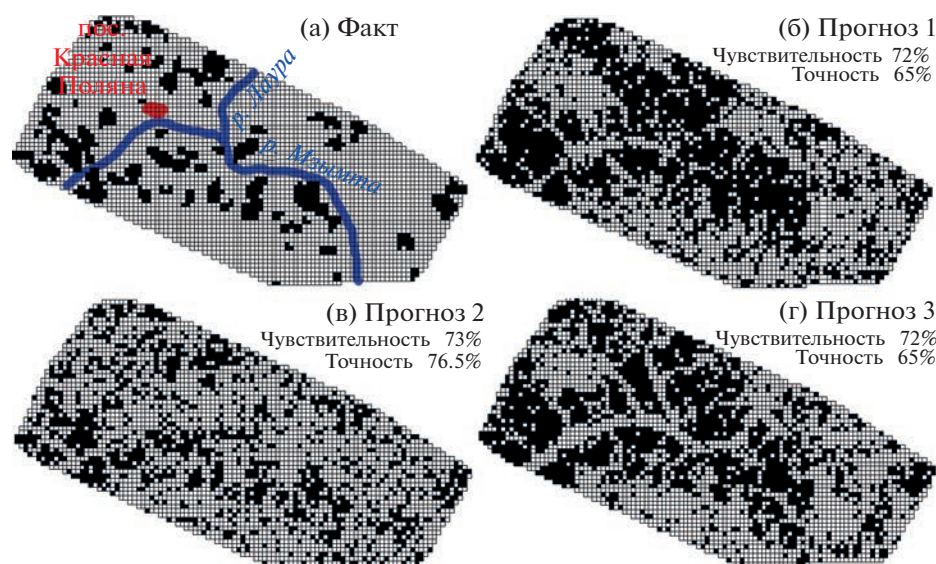


Рис. 3. Прогнозирование оползневой опасности для территории пос. Красная Поляна, курорта Роза-Хутор и их окрестностей (Краснодарский край, Россия) с использованием обучаемых самоорганизующихся сетей Кохонена: (а) положение реальных оползневых участков; прогноз потенциально оползневых участков с тремя наборами переменных: (б) стандартные морфометрические переменные, рассчитываемые в современных ГИС, (в) спектральные морфометрические переменные, (г) все переменные.

торского алгоритма расчета спектральных характеристик.

Поскольку эта классификация нацелена на “узнавание” как фактически, так и потенциально оползневых участков, использование метрики “точность” как критерия качества модели не целесообразно. Процесс обучения будет заключаться в подгонке весов входных переменных для максимально эффективной сепарации фактически оползневых и фактически не оползневых участков, однако последние включают и потенциально оползневые участки, из-за чего реальное качество модели будет переоценено. Более корректной метрикой качества здесь будет выступать “чувствительность” (*sensitivity*) — отношение верно предсказанных оползневых позиций к общему числу фактически оползневых ячеек; в результате модель не обучается распознавать как “безопасные” те ячейки сетки, где условия в принципе удовлетворяют протеканию оползневой процесса, но он там пока не происходит или не замечен в ходе полевого обследования. Такой подход — прогнозирование принадлежности территории по потенциальной динамике рельефа — отличает применение методов классификации, например, к космическим снимкам (где требуется автоматически классифицировать уже наблюдаемое явление — тип с/х культуры, объекты инфраструктуры или др.) и к цифровым моделям рельефа.

Все перечисленные методы — обобщенные линейные модели, деревья классификации, случайный лес и нейронные сети — решают задачи классификации (строго говоря, ОЛМ — регрессион-

ный метод, который может быть адаптирован для классификации) без учета пространственного контекста, т.е. на вход они принимают табличные данные, а не картографические изображения. Единственный способ учета в таких моделях конкретных черт топографического рисунка — это использование фокальных морфометрических характеристик, так или иначе характеризующих окрестность точки, например, спектральных характеристик рельефа (Харченко, 2017). Однако упомянутые уже выше сверточные нейронные сети или методы объектно-ориентированного анализа изображений способны распознавать характер “текстуры рельефа”.

В некоторых работах можно встретить *гибридные подходы* к автоматизации ГК на основе классификаций с обучением и методов анализа изображений. Так, И. Рашид (Rashid et al., 2016) для бассейна р. Фероцпора (приток р. Джелам в системе Инда) использовал две независимые классификации рельефа: 1) на основе ЦМР по индексу топографической позиции (*TPI*) (Weiss, 2001), 2) на основе снимков *LandSat 8* методами анализа изображений (*On-Screen Image Interpretation*). В то время как каждая классификация в отдельности дала точность соответственно 45.6 и 77.8%, сочетание двух результатов позволило добиться сходства с геоморфологической картой 91.5%. Строго говоря, тот перечень объектов, которые были выбраны для классификации в данной работе, не является какой-либо генетической классификацией форм рельефа и излишне упрощен, а сами объекты выделены по разным классификацион-

Таблица 2. Оценка точности классификации методами TPI, OSII и гибридным для геоморфологического картографирования в (Rashid et al., 2016)

Картографируемая единица	Контроль- ные точки	Метод			Точность классификации		
		TPI	OSII	Гибрид	TPI	OSII	Гибрид
Узкие U-образные речные долины	40	23	25	36	57.50	62.50	90.00
Ледовая поверхность	3	0	3	3	0.00	100.0	100.0
Холмы	18	9	13	17	50.00	72.22	94.44
Озерно-ледниковые равнины	31	0	28	28	0.00	90.32	90.32
Среднегорные структурные долины	4	3	0	3	75.00	0.00	75.00
Среднегорные вершинные поверхности	16	12	9	14	75.00	56.25	87.50
Речные террасы	25	0	22	22	0.00	88.00	88.00
Педименты	11	7	9	10	63.63	81.81	90.91
Аллювиальные равнины	40	35	36	39	87.50	90.00	97.50
Пологие склоны	28	24	19	26	85.71	67.86	92.86
Водно-болотные угодья	12	0	11	11	0.00	91.66	91.66
ИТОГО	228	113	175	209	45.56	77.82	91.53

Примечание. Жирным шрифтом выделены максимальные значения точности для каждой картографируемой единицы.

ным признакам (табл. 2). Тем не менее нужно признать, что автоматизация разграничения подобных объектов не так давно казалось мало реальной.

Пожалуй, даже более эффективно срабатывают методы объектноориентированного анализа изображений в специальном ГК, т.е. при поиске конкретных специфичных форм рельефа. Показательны здесь работы (Clark et al., 2009; d'Oleire-Oltmanns et al., 2013) с распознаванием контуров отдельных друмлинов. Результаты их автоматизированного выделения по ЦМР в работе К. Кларка показаны на рис. 4.

Несмотря на то, что автоматизированное распознавание конкретных форм рельефа с типовыми морфологическими чертами в целом проще и эффективнее планарного подхода — сегментации территории на формы рельефа — думается, типологическое и общее геоморфологическое картографирование на основе автоматических алгоритмов не противоречат друг другу.

ВЫВОДЫ

В настоящее время идет активное развитие методов распознавания образов, в том числе в связи с их приложением к задачам автоматизации геоморфологического картографирования по дистанционным данным. Для дальнейшего продвижения в данном направлении требуют обсуждения и, по возможности, решения такие проблемы как распознавание морфологически идентичных форм разного генезиса (нужна выработка критериев и требований к исходным данным для разделения хотя бы стандартных примеров конвергентных

форм рельефа), переход от морфологических к возрастным и генетическим характеристикам поверхностей, предварительный подбор оптимальной детальности дистанционного зондирования (не всегда наиболее детальные данные — эффективнее всего в модели, что рядом исследователей проверено экспериментально), выбор и обоснование весовых коэффициентов количественных переменных.

Важная проблема создания эффективных моделей автоматизированной классификации рельефа с обучением — выбор метрики качества модели. Зачастую наиболее стандартная метрика — точность (*accuracy*) не отвечает задаче исследователя, поэтому требуется обоснование выбора конкретной метрики. Так, в задачах классификации территории по вероятности протекания тех или иных экзогенных процессов (в частности, оползневых, селевых и т.д.) более разумно использовать вместо точности чувствительность модели, а именно шансы на успешное выявление положительного “отклика” — т.е. того, что участок подвержен протеканию рассматриваемого процесса.

Спектр методов, применяемых в попытках автоматизации составления геоморфологических карт, чрезвычайно разнообразен, хотя явное предпочтение пока еще отдается классификации с обучением. Чаще других применяются обобщенные линейные модели (так, для предсказания бинарного отклика используется логистическая регрессия — например, при моделировании оползневой опасности), различные виды дискриминантного анализа. Но со временем все большую популярность приобретают непараметрические методы, не опирающиеся на априорные допущения о характере связи

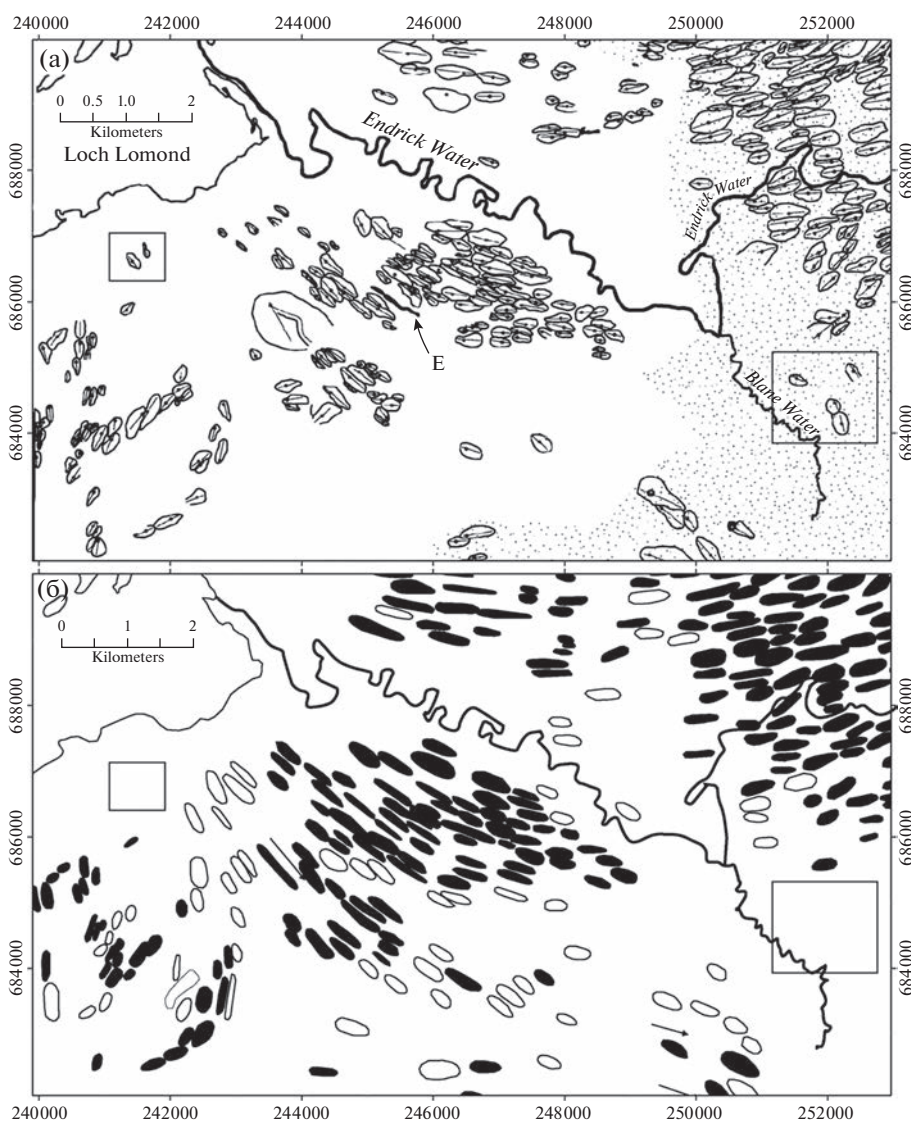


Рис. 4. Сравнение результатов полевого и автоматического по ЦМР картографирования друмлинов на водосборе озера Лох-Ломонд, Шотландия: (а) результаты полевой съемки Дж. Роуза (Smith and Clark, 2005); (б) результаты полуавтоматического выделения друмлинов по модели высот NEXTMap DEM.

Примечание. Черной заливкой показаны друмлины, имеющиеся на карте Дж. Роуза, белой — отсутствующие на ней формы.

По (Clark et al., 2009).

(линейной или иной другой) исходных переменных и качественной зависимой переменной, например, “класса” форм рельефа.

Апробация различных методов и моделей автоматизированной классификации рельефа по морфологическим индикаторам при условии, что прогнозируемые классы (отдельные формы или генетические типы рельефа) несут генетическую или возрастную информацию, показывает, что наиболее информативными оказываются морфометрические переменные, отражающие текстуру расчленения рельефа, в частности спектральные

характеристики. При их включении в модель в качестве предикторов, рост точности классификации относительно использования стандартных морфометрических переменных и индексов, рассчитываемых в распространенных ГИС (например, *SAGA GIS*, но также и другие) достигает порядка 10%.

В последние годы появляются примеры использования методов компьютерного зрения, которые оказываются, как правило, точнее, чем методы классификации с обучением, не учитывающие взаимное расположение объектов (географический

контекст), а только лишь их параметры, сведенные в таблицу. Еще более высокую точность прогноза дают гибридные модели: стандартные методы, подкрепленные методами компьютерного зрения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-77-10036).

FUNDING

The study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 19-77-10036).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гаврилов А.А.* О природе явлений геоморфологической конвергенции и гомологии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2016. № 4. С. 3–12.
- Геоморфологическая карта Мурманской области / сост. М.К. Граве, Л.М. Граве / Атлас Мурманской области. М.: ГУГК, 1971. С. 8.
- Крамбейн У., Грейбилл Ф.* Статистические модели в геологии. М.: Мир, 1969. 400 с.
- Ласточкин А.Н.* Морфодинамический анализ. Ленинград: Недра, 1987. 256 с.
- Лобанов В.В.* Еще раз об “элементарной морфологической единице”, ее содержании и методике установления // Геоморфология. 1988. № 4. С. 29–34.
- Лопатин Д.В.* О полиморфизме в геоморфологии // Геоморфология. 2007. № 3. С. 22–23.
- Серебрянный Л.Р., Чукленкова И.Н.* Густота озер как показатель возраста гляцигенной морфоскульптуры (опыт применения морфометрического анализа в северо-западных районах Русской равнины) // Геоморфология. 1973. № 4. С. 79–85.
- Солоненко В.П.* Сейсмогенные деформации и палеосейсмогеологический метод // Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы. Новосибирск: Наука, 1977. С. 5–47.
- Спиридонов А.И.* Геоморфологическое картографирование. М.: Недра, 1974. 184 с.
- Тимофеев Д.А.* О полиморфизме как общем свойстве земной поверхности // Геоморфология. 2006. № 2. С. 3–6.
- Тимофеев Д.А.* Элементарные морфологические единицы как объект геоморфологического анализа // Геоморфология. 1984. № 1. С. 19–29.
- Харченко С.В.* К вопросу о применении гармонического анализа при количественной характеристике рельефа // Геоморфология. 2017. № 2. С. 14–24.
- Харченко С.В.* Новые задачи морфометрии рельефа и автоматизированные морфологические классификации в геоморфологии // Геоморфология. 2020. № 1. С. 3–21.
- Anders N.S., Seijmonsbergen A.C., Bouten W.* Segmentation optimization and stratified object-based analysis for semi-automated geomorphological mapping // Rem. Sens. of Environ. 2011. Vol. 115. № 12. P. 2976–2985. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.007>
- Atkinson J., Jiskoot H., Massari R., Murray T.* Generalized linear modelling in geomorphology // Earth Surface Proc. and Landforms. 1998. № 23. P. 1185–1195. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199812\)23:13%3C1185::AID-ESP928%3E3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199812)23:13%3C1185::AID-ESP928%3E3.0.CO;2-W)
- Ayalew L., Yamagishi H.* The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan // Geomorphology. 2005. Vol. 65. № 1–2. P. 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>
- Brandmeier M., Chen Y.* Lithological classification using multi-sensor data and convolutional neural networks // Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sens. & Spatial Inform. Sci. 2019. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W16-55-2019>
- Breiman L.* Random Forests // Machine Learning. 2001. № 45. P. 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Brown D.G., Lusch D.P., Duda K.A.* Supervised classification of types of glaciated landscapes using digital elevation data // Geomorphology. 1998. Vol. 21. № 3–4. P. 233–250. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00063-9](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00063-9)
- Cavazzi S., Corstanje R., Mayr T., Hannam J., Fealy R.* Are fine resolution digital elevation models always the best choice in digital soil mapping? // Geoderma. 2013. Vol. 195. P. 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.020>
- Clark C.D., Hughes A.L., Greenwood S.L., Spagnolo M., Ng F.S.* Size and shape characteristics of drumlins, derived from a large sample, and associated scaling laws // Quat. Sci. Rev. 2009. Vol. 28. № 7–8. P. 677–692. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.08.035>
- Deng Y., Wilson J., Sheng J.* Effects of variable attribute weights on landform classification // Earth Surface Proc. and Landforms. 2006. № 31. P. 1452–1462. <https://doi.org/10.1002/esp.1401>
- d'Oleire-Oltmanns S., Eisank C., Drägut L., Blaschke T.* An object-based workflow to extract landforms at multiple scales from two distinct data types // IEEE Geosci. and Rem. Sens. Lett. 2013. Vol. 10. № 4. P. 947–951. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2254465>
- Ermini L., Catani F., Casagli N.* Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment // Geomorphology. 2005. Vol. 66. P. 327–343. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.025>
- Evans I.S.* Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? // Geomorphology. 2012. Vol. 137. P. 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.029>
- Florinsky I.V., Eilers R.G., Manning G.R., Fuller L.G.* Prediction of soil properties by digital terrain modeling // Environ. Modelling & Software. 2002. № 17 (3). P. 295–311. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00067-6)
- Florinsky I.V.* Digital terrain analysis in soil science and geology. Academic Press, 2016. 506 p.
- Kharchenko S.* Automated recognition of the landforms origin for the Kola Peninsula based on morphometric

- variables / EGU General Assembly 2021 (19–30 April 2021) EGU21-15564.
<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-15564>
- Lastochkin A.N., Zhiron A.I., Boltramovich S.F.* System-morphological approach: Another look at morphology research and geomorphological mapping // *Geomorphology*. 2018. Vol. 303. P. 486–503.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.10.022>
- Leverington D., Duguay C.* A neural network method to determine the presence or absence of permafrost near Mayo, Yukon Territory, Canada // *Permafrost and Periglacial Proc.* 1997. № 8. P. 205–215.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1530\(199732\)8:23.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1530(199732)8:23.0.CO;2-5)
- Li W., Hsu C.Y.* Automated terrain feature identification from remote sensing imagery: a deep learning approach // *Int. J. Geographical Inform. Sci.* 2020. № 34 (4). P. 637–660.
<https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1542697>
- Link A.J.* A physic-chemical and textural study of carbonate sedimentation in a lagoonal environment. Evanston, IL: Northwestern Univ., 1964.
- Luoto M., Hjort J.* Evaluation of current statistical approaches for predictive geomorphological mapping // *Geomorphology*. 2005. № 67. P. 299–315.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.10.006>
- MacMillan R.A., Pettapiece W.W., Nolan S.C., Goddard T.W.* A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic // *Fuzzy Sets and Systems*. 2000. № 113. P. 81–109.
[https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(99\)00014-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(99)00014-7)
- MacMillan R.A., Shary P.A.* Landforms and landform elements in geomorphometry // *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in soil science* – 33 / T. Hengl, H.I. Reuter (Eds.). 2009. Vol. 33. P. 227–254.
[https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00009-3)
- MacMillan R.A., Pettapiece W.W.* Alberta Landforms: Quantitative morphometric descriptions and classification of typical Alberta landforms / Technical Bul. № 2000-2E. Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, Semiarid Prairie. Agricultural Research Centre, Swift Current, SK, 2000. 118 p.
- Marmion M., Hjort J., Thuiller W., Luoto M.* A comparison of predictive methods in modelling the distribution of periglacial landforms in Finnish Lapland // *Earth Surface Proc. and Landforms*. 2008. № 33. P. 2241–2254.
<https://doi.org/10.1002/esp.1695>
- Miska L., Jan H.* Evaluation of current statistical approaches for predictive geomorphological mapping // *Geomorphology*. 2005. Vol. 67. № 3–4. P. 299–315.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.10.006>
- Pennock D.J., Zebarth B.J., De Jong E.* Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada // *Geoderma*. 1987. Vol. 40. № 3–4. P. 297–315.
[https://doi.org/10.1016/0016-7061\(87\)90040-1](https://doi.org/10.1016/0016-7061(87)90040-1)
- Rashid I., Romshoo S.A., Hajam J.A., Abdullah T.* A semi-automated approach for mapping geomorphology in mountainous terrain, Ferozpora watershed (Kashmir Himalaya) // *J. Geological Soc. of India*. 2016. Vol. 88. № 2. P. 206–212.
<https://doi.org/10.1007/s12594-016-0479-5>
- Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V.* Fundamental quantitative methods of land surface analysis // *Geoderma*. 2002. Vol. 107. № 1–2. P. 1–32.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00136-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00136-7)
- Smith M.J., Clark C.D.* Methods for the visualization of digital elevation models for landform mapping // *Earth Surface Proc. and Landforms*. 2005. Vol. 30. № 7. P. 885–900.
<https://doi.org/10.1002/esp.1210>
- Sutfin N.A., Shaw J.R., Wohl E.E., Cooper D.J.* A geomorphic classification of ephemeral channels in a mountainous, arid region, southwestern Arizona, USA // *Geomorphology*. 2014. № 221. P. 164–175.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.06.005>
- Veronesi F., Hurni L.* Random Forest with semantic tie points for classifying landforms and creating rigorous shaded relief representations // *Geomorphology*. 2014. Vol. 224. P. 152–160.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.020>
- Weiss A.D.* Topographic positions and landforms analysis (Conference Poster). ESRI Int. User Conference. San Diego, CA July 9–13 2001.
- Zhu Y.M., Lu X.X., Zhou Y.* Suspended sediment flux modeling with artificial neural network: An example of the Longchuanjiang River in the Upper Yangtze Catchment, China // *Geomorphology*. 2007. № 84. P. 111–125.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.07.010>

Pattern Recognition in the Tasks of Landform Mapping

S. V. Kharchenko^{1, 2, *}

¹Moscow State University, Moscow, Russia

²Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: xar4enkkoff@yandex.ru

The article aims to show the modern state of pattern recognition techniques for automatic and semi-automatic geomorphological mapping. There is opinion among the geomorphometrists about the expert rules for traditional landform mapping can be quantitated. The general unsolved tasks of automatic landform mapping are: recognition of origin for morphologically similar Earth's surface forms; criteria development for transfer from morphological to genetic and age landform's characteristics; preventive choosing the optimal resolution of the remote sensing data; the choosing and rationale of predictor's weights in statistical modeling procedures. Some cases of the pattern recognition techniques using in geomorphology and landform mapping are

given: generalized linear models; classification trees; random forest; artificial neural networks; and computer vision methods. The overall accuracy of the different models according to planar continuous landform recognition (and recognition of lithology types too) is about 50–70% and more. At the same time, specific landform type's (craters, volcanic cones and others) recognition can reach 90–100%.

Keywords: pattern recognition, geomorphological mapping, supervised classification, image analysis

REFERENCES

- Anders N.S., Seijmonsbergen A.C., Bouten W. Segmentation optimization and stratified object-based analysis for semi-automated geomorphological mapping. *Remote Sensing Environ.*, 2011, vol. 115, no. 12, pp. 2976–2985.
- Atkinson J., Jiskoot H., Massari R., and Murray T. Generalized linear modelling in geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, no. 23, pp. 1185–1195.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199812\)23:13%3C1185::AID-ESP928%3E3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199812)23:13%3C1185::AID-ESP928%3E3.0.CO;2-W)
- Ayalew L., Yamagishi H. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 2005, vol. 65, no. 1–2, pp. 15–31.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>
- Brandmeier M., Chen Y. Lithological classification using multi-sensor data and convolutional neural networks, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2019.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W16-55-2019>
- Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*, 2001, no. 45, pp. 5–32.
<https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Brown D. G., Lusch D. P., Duda K. A. Supervised classification of types of glaciated landscapes using digital elevation data. *Geomorphology*, 1998, vol. 21, no. 3–4, pp. 233–250.
[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00063-9](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00063-9)
- Cavazzi S., Corstanje R., Mayr T., Hannam J., Fealy R. Are fine resolution digital elevation models always the best choice in digital soil mapping? *Geoderma*, 2013, vol. 195, pp. 111–121.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.020>
- Clark C.D., Hughes A.L., Greenwood S.L., Spagnolo M., Ng F.S. Size and shape characteristics of drumlins, derived from a large sample, and associated scaling laws. *Quaternary Sci. Rev.*, 2009, vol. 28, no. 7–8, pp. 677–692.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.08.035>
- Deng Y., Wilson J., and Sheng J. Effects of variable attribute weights on landform classification. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, no. 31, pp. 1452–1462.
<https://doi.org/10.1002/esp.1401>
- d'Oleire-Oltmanns S., Eisank C., Drägut L., Blaschke T. An object-based workflow to extract landforms at multiple scales from two distinct data types. *IEEE Geoscience Remote Sensing Lett.*, 2013, vol. 10, no. 4, pp. 947–951.
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2254465>
- Ermini L., Catani F., and Casagli N. Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*, 2005, vol. 66, pp. 327–343.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.025>
- Evans I.S. Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? *Geomorphology*, 2012, vol. 137, pp. 94–106.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.029>
- Florinsky I.V., Eilers R.G., Manning G.R., Fuller L.G. Prediction of soil properties by digital terrain modeling. *Environ. Modelling & Software*, 2002, no. 17 (3), pp. 295–311.
[https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00067-6)
- Florinsky I.V. *Digital terrain analysis in soil science and geology*. Academic Press, 2016. 506 p.
- Gavrilov A.A. About the nature of geomorphologic convergence and homology phenomena. *Vestn. Mosk. Univ. Ser. 5: Geogr.*, 2016, no. 4, pp. 3–12. (In Russ.).
- Geomorfologicheskaya karta Murmanskoi oblasti* [Geomorphological Map of the Murmansk oblast (Russia)], by M.K. Grave and L.M. Grave, ¹ⁿ *Murmansk region atlas*. Moscow: GUGK Publ., 1971. 8 p.
- Kharchenko S.V. Application of harmonic analysis for the quantitative description of Earth surface topography. *Geomorfologiya*, 2017, no. 2, pp. 14–24. (In Russ.).
- Kharchenko S.V. New challenges of geomorphometry and automatic morphological classification in geomorphology. *Geomorfologiya*, 2020, no. 1, pp. 3–21. (In Russ.).
- Kharchenko S. Automated recognition of the landforms origin for the Kola Peninsula based on morphometric variables. *EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-15564*.
<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-15564>
- Krumbein W.C., Graybill F.A. *Statisticheskie modeli v geologii* [Statistical Models in Geology]. Moscow: Mir Publ., 1969. 400 p.
- Lastochkin A.N., Zhirov A.I., Boltramovich S.F. System-morphological approach: Another look at morphology research and geomorphological mapping. *Geomorphology*, 2018, vol. 303, pp. 486–503.
<https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2017.10.022>
- Lastochkin A.N. *Morfodinamicheskii analiz* [Morphodynamical Analysis]. Leningrad: Nedra Publ., 1987. 256 p.
- Leverington D., Duguay C. A neural network method to determine the presence or absence of permafrost near Mayo, Yukon Territory, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1997, no. 8, pp. 205–215.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1530\(199732\)8:23.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1530(199732)8:23.0.CO;2-5)
- Li W., Hsu C.Y. Automated terrain feature identification from remote sensing imagery: a deep learning approach. *Int. J. Geogr. Information Sci.*, 2020, no. 34 (4), pp. 637–660.
<https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1542697>

- Link A.J. *A physic-chemical and textural study of carbonate sedimentation in a lagoonal environment*. Evanston, IL: Northwestern University, 1964.
- Lobanov V.V. Once more on the “elementary morphological unit,” its content and methods of its identification. *Geomorfologiya*, 1988, no. 4, pp. 29–34. (In Russ.).
- Lopatin D.V. Polymorphism in geomorphology. *Geomorfologiya*, 2007, no. 3, pp. 22–23. (In Russ.).
- Luoto M., Hjort J. Evaluation of current statistical approaches for predictive geomorphological mapping. *Geomorphology*, 2005, no. 67, pp. 299–315. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.10.006>
- MacMillan R.A., Pettapiece W.W., Nolan S.C., and Goddard T.W. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets. Systems*, 2000, no. 113, pp. 81–109. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(99\)00014-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(99)00014-7)
- MacMillan R.A., Shary P.A. Landforms and landform elements in geomorphometry. In *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in soil science – 33*. Hengl T., Reuter H.I., Eds. 2009, pp. 227–254. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00009-3)
- MacMillan R.A., Pettapiece W.W. *Alberta Landforms: Quantitative morphometric descriptions and classification of typical Alberta landforms*. Technical Bulletin No. 2000-2E. Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, Semiarid Prairie. Agricultural Research Centre, Swift Current, SK, 2000.
- Marmion M., Hjort J., Thuiller W., Luoto M. A comparison of predictive methods in modelling the distribution of periglacial landforms in Finnish Lapland. *Earth Surface Processes, Landforms*, 2008, no. 33, pp. 2241–2254. <https://doi.org/10.1002/esp.1695>
- Miska L. and Jan H. Evaluation of current statistical approaches for predictive geomorphological mapping. *Geomorphology*, 2005, vol. 67, no. 3–4, pp. 299–315. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.10.006>
- Pennock D.J., Zebarth B.J., De Jong E. Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada. *Geoderma*, 1987, vol. 40, no. 3–4, pp. 297–315. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(87\)90040-1](https://doi.org/10.1016/0016-7061(87)90040-1)
- Rashid I., Romshoo S.A., Hajam J.A., Abdullah T. A semi-automated approach for mapping geomorphology in mountainous terrain, Ferozpora watershed (Kashmir Himalaya). *J. Geological Society India*, 2016, vol. 88, no. 2, pp. 206–212. <https://doi.org/10.1007/s12594-016-0479-5>
- Shary P.A., Sharaya L.S., and Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 2002, vol. 107, no. 1–2, pp. 1–32. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00136-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00136-7)
- Smith M.J. and Clark C.D. Methods for the visualization of digital elevation models for landform mapping. *Earth Surface Processes, Landforms*, 2005, vol. 30, no. 7, pp. 885–900. <https://doi.org/10.1002/esp.1210>
- Sutfin N.A., Shaw J.R., Wohl E.E., and Cooper D.J. A geomorphic classification of ephemeral channels in a mountainous, arid region, southwestern Arizona, USA. *Geomorphology*, 2014, no. 221, pp. 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.06.005>
- Serebryanny L.R., Chuklenkova I.N. Density of lakes as an age indicator of glaciogenic morphosculpture: an application of morphometrical analysis in the north-west areas of the Russian Plain. *Geomorfologiya*, 1973, no. 4, pp. 79–85. (In Russ.).
- Solonenko V.P. Seismogenetic deformations and palaeoseismic method. In *Seismicheskoe raionirovanie Vostochnoi Sibiri i ego geologo-geofizicheskie osnovy* [Seismic Zoning of the East Siberia and its Geological and Geophysical Basics]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1977, pp. 5–47. (In Russ.).
- Spiridonov A.I. *Geomorfologicheskoe kartografirovaniye* [Geomorphological Mapping]. Moscow: Nedra Publ., 1974. 184 p.
- Timofeyev D.A. Polymorphism as general attribute of land surface. *Geomorfologiya*, 2006, no. 2, pp. 3–6. (In Russ.).
- Timofeev D.A. Elementary morphological units as an object of geomorphological analysis. *Geomorfologiya*, 1984, no. 1, pp. 19–29. (In Russ.).
- Veronesi F. and Hurni L. Random Forest with semantic tie points for classifying landforms and creating rigorous shaded relief representations. *Geomorphology*, 2014, vol. 224, pp. 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.020>
- Weiss A.D. *Topographic positions and landforms analysis* (Conference Poster). ESRI International User Conference. San Diego, CA July 9–13, 2001.
- Zhu Y.M., Lu X.X., Zhou Y. Suspended sediment flux modeling with artificial neural network: An example of the Longchuanjiang River in the Upper Yangtze Catchment, China. *Geomorphology*, 2007, no. 84, pp. 111–125. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.07.010>

УДК 338.1;910.3

УСПЕШНАЯ НЕУСТОЙЧИВАЯ ИНДУСТРИАЛИЗАЦИЯ МИРА: 1880–1913 – УРОКИ ДЛЯ СОВРЕМЕННОСТИ (РАЗМЫШЛЕНИЯ НАД КНИГОЙ Л.М. ГРИГОРЬЕВА И А.К. МОРОЗКИНОЙ)

© 2023 г. В. А. Шупер^{a, b, *}

^aИнститут географии РАН, Москва, Россия

^bУниверситет Бернардо О’Хиггинса, Сантьяго, Чили

*e-mail: Vshuper@igras.ru

Поступила в редакцию 10.02.2022 г.

После доработки 08.08.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

Книга Л.М. Григорьева и А.К. Морозкиной исключительно актуальна, поскольку сейчас, как и в 1880–1913 гг., наблюдается быстрый рост неравенства. Важен вывод о том, что даже тогда революционный взрыв не был неизбежен и не произошел бы, не будь мировой войны. Темпы роста ограничивались недостаточной широтой внутренних рынков и медленным ростом производительности труда в силу нехватки человеческого капитала. Марксизм, по мнению авторов, отразил характер общества середины XIX в., но примерно с 1870-х годов неравенство и абсолютная бедность начали становиться разными проблемами. Индустриализация за счет крестьянства, происходившая в России, развивавшейся вопреки теориям, не должна трактоваться как однозначное зло, тем более что сходные явления наблюдались и в других странах. На основании экономического анализа (“сталь не врет”) ставятся под сомнения господствующие представления о мотивах Германии при развязывании Первой мировой войны. Она была крайне обеспокоена изменением соотношения сил в пользу США и России. Авторы пришли к выводу об отсутствии конвергенции в развитии рассматриваемых стран в 1880–1913 гг. По их мнению, успешное догоняющее развитие – довольно редкая удача. При этом рецепт успеха всегда оказывался индивидуальным и малоприспособленным для тиражирования. Отрыв колоний от бывших метрополий за последнее столетие несколько не сократился. Размышления над книгой приводят к выводу о том, что у России в XXI в. есть возможность дольше других стран сохранять динамизм развития в перешедшем к стационарности мире благодаря освоению Сибири.

Ключевые слова: индустриализация, социальное неравенство, догоняющее развитие, прогрессивный национализм, альтернативная география

DOI: 10.31857/S2587556623010168, **EDN:** LUWDMJ

Дух науки – это дух сомнения, когда из нее уходит дискуссионность, остаются ее достижения, большие и малые, но они подобны величественным городам минувших цивилизаций. Живая наука – семинар, а не библиотека. Именно поэтому попытка бесстрашно переосмыслить один из самых важных и драматичных исторических периодов – индустриализацию мира, сформировавшую первую глобализацию, войдя при этом в противоречие со многими устоявшимися представлениями, заслуживает самого пристального внимания. Тем более, что она оказалась исключительно интересной и полезной читателю не только своими выводами, но и ценным фактическим материалом – в книге Л.М. Григорьева и А.К. Морозкиной 34 таблицы, в том числе 7 таблиц в приложениях, текст иллюстрируют 18 графиков и 3 диаграммы. Для России в приложении приводятся некоторые важнейшие в экономиче-

ском отношении законодательные акты. Список литературы насчитывает 130 источников.

“СТАЛЬ НЕ ВРЕТ”: ПЕРЕОСМЫСЛЕНИЕ ДОГОНЯЮЩЕГО РАЗВИТИЯ

Авторы указывают, что “в процессе анализа были затронуты вопросы, связанные с двумя крупными проблемами той эпохи: во-первых, социальным неравенством и угрозой социально-политической неустойчивости; во-вторых, конкуренцией великих держав и объективными параметрами их подготовки к будущей войне, насколько это возможно средствами социально-экономического (не политического) анализа. В известном смысле наш подход к исследованию процессов развития в данный период близок (хотя не буквально) к концепции устойчивого развития... Разумеется, нельзя судить акторов конца

XIX — начала XX в. по принципам Устойчивого развития ООН 2015 г. Но в ряде случаев наш подход будет охватывать актуальные сегодня темы и проблемы в приложении к периоду 1880–1913 гг., который оказался необыкновенно важным для формирования современной мировой системы» (Григорьев, Морозкина, 2021, с. 6–7).

Глубокая трансформация рассматривается как на глобальном уровне, так и — наиболее детально — на примере пяти стран: Великобритании, Германии, России, США и Франции, хотя для анализа привлекаются и другие страны, по которым есть статистика — Австро-Венгрия, Швеция, Аргентина и др. «Для экономистов “сталь не врет” — и без анализа политических стратегий и интриг видна активная индустриализация “сверху” в бисмарковской Германии — двадцать лет при Железном канцлере и четверть века после него. Ретроспективно видно, как именно Германия пыталась успеть нарастить мускулы до того, как США и Россия выйдут на более высокий уровень (каждая по-своему)» (Григорьев, Морозкина, 2021 с. 12).

На последнем положении следует остановиться особо: “С учетом быстро росших США и Российской империи ситуация оказалась способствующей принятию безрассудного решения о войне в Германии. Скачок государственных расходов в 1913 г. был замечен, и, хотя военные расходы не выглядели большими, с трудом верится в столь гигантский рост невоенных статей бюджета за год до войны. А ощущение превосходства в центре Европы, прусская военная традиция и несколько побед над соседями фактически создали ощущение, что военное решение геополитических проблем является допустимым вариантом” (Григорьев, Морозкина, 2021, с. 81). Здесь авторы фактически вступают в полемику с Г. Киссинджером (и далеко не с ним одним), считающим верхом глупости развязывание войны кайзером Вильгельмом II (1859–1941), поскольку соотношение сил и так быстро менялось в пользу Германии, которой следовало просто ждать, чтобы воспользоваться плодами этих изменений (Киссинджер, 1997). Можно, разумеется, попенять авторам на экономический детерминизм, но некоторые экономисты считают преувеличенным и гитлеровский авантюризм — военная машина Третьего рейха создавалась в значительной мере на заемные средства, долги постоянно росли, соответственно единственной возможностью избежать дефолта было завоевание стран-кредиторов, в первую очередь Франции и Голландии (Брюне, Гишар, 2012).

Отрешившись от зацементированных в сознании стереотипов, мы увидим, что динамизм тогдашнего экономического развития был вовсе не того размаха, что японское “экономическое чудо” или подъем Китая в первые десятилетия ре-

форм. Он не совсем дотягивает даже до “славного тридцатилетия” во Франции в силу причин, осознание которых приходит лишь сейчас. «В темпах экономического роста в период быстрой индустриализации лидировали США (среднегодовой рост 3.9%), однако и все ведущие державы Европы показывали значительные успехи, хотя и по разным параметрам. Условная “периферия” мира того времени — это не колонизированная Индия и зависимый Китай, но Аргентина, Бразилия и Россия, которые находились на разных этапах индустриализации, а в части организации производства и технологий — на догоняющем этапе. В страновом плане это период соперничества Великобритании и Германии, показавшей первый — видимо, классический — пример догоняющего развития на базе научно-технического прогресса и государственной политики... Не менее важно — социальные науки стали понимать это намного позже — было характерное для фазы индустриализации неравенство, которое ограничивало широту внутренних рынков и производительность труда в силу нехватки человеческого капитала» (Григорьев, Морозкина, 2021, с. 14).

Разные исследователи на разных данных делают выводы о наличии или отсутствии конвергенции уровней развития стран в рассматриваемый период. Авторы пришли к заключению о ее отсутствии. Успешное догоняющее развитие — довольно редкая птица. При этом рецепт успеха всегда оказывался индивидуальным и малоприменимым для тиражирования. “Так, в Швеции после 1890 г. фактором роста стала эволюция от производства и экспорта древесины к древесной массе и бумаге” (Григорьев, Морозкина, 2021, с. 19–20). С бывшими колониями же дело обстоит совсем скверно. Как отмечают авторы, за последнее столетие их отрыв от бывших метрополий несколько не сократился (Григорьев, Морозкина, с. 26–27).

РОСТ НЕРАВЕНСТВА: ГЛОБАЛЬНЫЙ И НАЦИОНАЛЬНЫЙ УРОВНИ

Не везет не только бывшим колониям: “С 1960-го по 2014 г. только 16 из 182 стран смогли перешагнуть порог в 50 процентов от американского ВВП на душу населения. Исключая ресурсные экономики, государства, достигшие этого уровня в 1970-е, и страны, вступившие в ЕС, остаются только четыре страны — Гонконг, Сингапур, Южная Корея и Тайвань (а по сути, только две последние, если исключить государства-города). Возможно, вскоре к ним добавится и Китай, но пока это лишь предположение” (Зотин, 2021). Опираясь на недавнее исследование экономистов МВФ, А.Н. Зотин приходит к далеко не оптимистичному заключению: “экономический рост — это не что иное, как результат сочетания промышленной/экспортной политики и большого

набора самых разных, часто случайных внешних и внутренних факторов, могущих препятствовать развитию той или иной экономики (природные катастрофы, войны, этнические и классовые конфликты, негативная конъюнктура сырьевых рынков и тому подобное). Промышленная и экспортная политика, таким образом, могут усиливать или наоборот нивелировать последствия простого везения или невезения. Так как случайных негативных внешних и внутренних факторов много, и они часто независимы друг от друга, вполне возможен вариант провала экономики, несмотря на правильную политику. Это важно и не совсем тривиально. Нужно понимать, что в такой ситуации довольно сложно делать различия между эффектами плохой экономической политики и случайными негативными факторами, каждый из которых может обесценить и хорошую политику” (Зотин, 2021).

Главная задача предпринятого исследования – вырваться из под власти ретрознания, которое довлеет над нами, настойчиво побуждая считать произошедшие события неизбежными. Именно такой подход, основанный на историческом детерминизме, будь то исторический материализм или либеральный глобализм с его “концом истории”, усваивался из поколения в поколение еще на студенческой скамье и заставлял считать случившиеся социальные потрясения неизбежным следствием роста неравенства. Но были ли они в действительности таковыми? «Работа с новыми технологиями позволила развивать человеческий капитал и увеличивать производительность труда. Безусловно, основная масса рабочих оставалась бедняками, а уровень неравенства был огромным, но экономический рост все же пошел (два–три процента в год – это уже заметно), и какая-то его часть стала доставаться низам общества. Марксизм отразил характер того общества, но примерно с 1870-х годов неравенство и абсолютная бедность начали становиться “разными” проблемами» (Григорьев, Морозкина, 2021, с. 28–29).

Осознание этого исторического опыта в высшей степени полезно сейчас, когда быстрый рост неравенства снова стал подрывать устойчивость социальных систем. Он помогает нам составить хоть некоторое представление о пределах этой устойчивости. Альтернативная история перестает быть чисто академическим упражнением, когда направлена на извлечение уроков, в высшей степени поучительных для ныне живущих поколений. Если следовать классическому положению Э. Реклю (1830–1905) о том, что география – это история в пространстве, а история – это география во времени, то разработка альтернативной географии становится важнейшей задачей географов и даже их долгом перед обществом. Альтернативная история показывает, как могли развиваться события, альтернативная география долж-

на показывать, как они смогут развиваться в будущем, какие могут возникать варианты пространственной организации и с какими последствиями. Ниже будет показано, что переселенческий проект П.А. Столыпина (1862–1911) мог бы стать выдающимся достижением в области альтернативной географии при более благоприятных исторических обстоятельствах.

Речь не может идти о возложении на науку несвойственных ей функций. Известный французский географ-урбанист Ги Бюржель справедливо критикует политическое руководство за трусость, выражающуюся в настойчивых поползновениях подменять ответственные политические решения градостроительными мерами (Бюржель, 2014). Географам следует, напротив, доносить до властей предержащих знания об объективных закономерностях, кладущих предел волюнтаризму, будь то эволюция расселения, на различных стадиях которой преобладают процессы концентрации или деконцентрации¹, закономерности эволюции транспортных сетей и проч. При этом социальные катаклизмы в некоторых случаях могут повернуть вспять эволюцию пространственной организации. Так, по всем советским переписям – с 1926 по 1989 г. – доля Москвы в населении РСФСР неуклонно снижалась, но в постсоветский период ее доля в населении РФ постоянно росла, причем данные последней переписи не указывают на перелом тенденции, хотя и свидетельствуют о ее угасании. Возможно, перелом уже начинается – в 2021 и 2022 гг. население Москвы сокращалось.

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ФОРМЫ СОЦИАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Для нас главный вопрос – не только о влиянии социальных процессов на территориальную организацию общества и о территориальной самоорганизации, ставящей внешние ограничения управленческим воздействиям, но и о полиморфизме форм пространственной организации, возникающих в результате социальных процессов. Сдвиг населения в районы с более благоприятными природно-климатическими условиями – мировая тенденция, исход из Архангельской губернии начался еще в 40-е годы XIX в., но П.А. Столыпин с его переселенческим проектом, возможно, будет сочтен предтечей альтернативной географии. Благодаря его усилиям в 1906–1916 гг. в Сибирь переселились примерно 3.1 млн

¹ Политика ограничения роста крупных городов и стимулирования малых и средних, которую пытались проводить в 1970-е и 1980-е годы, была заведомо обречена на провал в силу некорректного использования зарубежного опыта: в СССР расселение в целом находилось на более низкой стадии эволюции, нежели в США и Западной Европе, той, на которой преобладают процессы концентрации.

крестьян, из которых, правда, 17% вернулись. Этого было явно недостаточно для решения аграрного вопроса. В условиях быстрого роста населения требовалось переселить порядка 25 млн.

В главе IV — Российская империя: рост “вопреки всем теориям” — авторы подробно рассматривают аграрный кризис в различных его аспектах (один из ее разделов озаглавлен «Политэкономия “Вишневого сада” и аграрный вопрос»). Они пишут: «сдвиги происходили, и нам представляется, что изменения были вопросом времени — это необходимость знаменитых “20 лет покоя” Столыпина» (Григорьев, Морозкина, 2021, с. 91). Однако не хватило либо 20 лет, либо 22 млн переселенцев в Сибирь. Переселение таких масс тоже требовало немалого времени, но могло идти существенно быстрее, если бы лучше финансировалось и не встречало резкого сопротивления помещиков-землевладельцев, обоснованно боявшихся конкуренции со стороны эффективных крестьянских хозяйств (надо учесть, что распашка целинных и залежных земель дает высокие урожаи в первые годы, но далее урожайность падает). Как и указал Э. Реклю, пространство и время во многом симметричны, соответственно выигрыш в пространстве может дать выигрыш и во времени.

Критически относясь к укоренившимся представлениям, авторы пишут: “Мы бы осторожно отнеслись к мнению А. Гершенкрона, цитируемому Е.Т. Гайдаром, о том, что индустриализация за счет крестьянства была угрозой политике индустриализации. Разумеется, в процессе обеднения в деревне и отрыва крестьян от земли в города и т.п. есть очевидные риски. Но переход из отходников в рабочие вел к росту дохода после адаптации к городу, помощи трудовых мигрантов родственникам, расширению трудовой мобильности и возможностей. Главное, что необходимо помнить — все это относится не только к России, а ко всему миру того периода. Это был этап, который проходили фактически все страны” (Григорьев, Морозкина, 2021, с. 95). Сравнивая развитие России и США, авторы указывают: “Строго говоря, при переходе от обсуждения институциональных различий к экономическим результатам за период наблюдатель (особенно российский читатель) скорее удивляется значительным результатам России, чем ее отставанию” (Григорьев, Морозкина, 2021, с. 124). Увы, «в российской истории наблюдается “повторяющаяся драма”: по мере развития, выхода на новую стадию благосостояния, технологического уровня и мощи Россия так или иначе втягивалась в тяжелейшие внешние конфликты, которые отбрасывали ее далеко назад и вынуждали ее “начинать все сначала”» (Григорьев, Морозкина, 2021, с. 113). Впрочем, крах СССР явно не вписывается в эту закономерность.

Венчающая книгу глава V — Социальные параметры большой индустриализации — содержит раздел с характерным названием: “Совсем иное неравенство”. «Концентрация благосостояния в Европе в период перед Первой мировой войной — читаем мы в этом разделе — была настолько велика, что еще рано было говорить о массовом среднем классе в современном понимании. Доля верхнего дециля в благосостоянии была близка к 90% (или даже выше, как в Великобритании), так что средние 40% держателей богатства были практически так же бедны, как и нижние 50% (доля обеих групп находилась на уровне 5% или меньше). Ясно, что высокое англосаксонское неравенство стало фактом уже тогда, а его значения в континентальных странах, особенно в Скандинавии, были ниже. Так что “европейский антикоммунистический социализм — это не только реакция на появление СССР”» (Григорьев, Морозкина, 2021, с. 134–135).

Разбираясь с социальным неравенством, авторы приходят к выводу: «Относительно высокие темпы роста в течение двух поколений, некоторое улучшение положения масс не дают основания считать обострение классовых конфликтов неизбежным, в частности, с учетом эмиграции активных элементов трудящихся [для России “последним клапаном”, по В.И. Ленину, могла стать Сибирь, но не хватило ни времени, ни политической воли — В.Ш.]. Во всяком случае, история показывает, что пролетарские движения до мировой войны так и не вырвались в острую массовую фазу, называемую революцией» (Григорьев, Морозкина, 2021, с. 137). И это при том, что “начало XX в. при технологиях того периода — это пик веса рабочего класса в обществе при еще очень низких относительных доходах” (Григорьев, Морозкина, 2021, с. 138)!

Осмысливая исследуемый период, авторы пишут: «это был период “неустойчивого” развития, который надо было пройти задолго до осознания того, что это некий “переходный” период и впереди человечество ждет огромный рост производительности труда и доступности социальных благ» (Григорьев, Морозкина, 2021, с. 146). Содержащийся в книге анализ может быть в высшей степени полезен именно потому, что нам опять надо пройти переходный период между второй глобализацией и тем, что придет ей на смену, причем будущее опять стало опасно непредсказуемым. При этом только смелость, прежде всего интеллектуальная, может позволить успешно пройти этот трудный и опасный участок нашего пути в будущее. Ее катастрофически не хватило элитам в начале XX в., а нынешние еще и ниже на голову. Нам надо хорошо осознавать, что мейнстрим не совместим со смелостью и талантом. Талантливые и смелые тоже могут ошибаться, в неустойчивом мире на переломе траектории не

ошибиться вообще очень трудно, но посредственности ошибаются всегда.

МИФ ОБ УСТОЙЧИВОМ РАЗВИТИИ

Еще раз отдавая должное интеллектуальной смелости авторов, приходится все же отметить некоторую ее недостаточность. Она бросается в глаза уже в лишенном всякой иронии отношении к принципам Устойчивого развития ООН 2015 г. Очевидно, что уровень ООНовских документов никак не может быть выше уровня решений съездов КПСС, о которых считалось неприличным говорить в частном порядке без сарказма, уже хотя бы в силу необходимости мириады согласований. Реализуемость решений съездов также была ниже всякой критики, но у ООН нет и малой доли той власти, которой обладала КПСС. Увядание марксистско-ленинской идеологии в позднесоветский период и полное отсутствие какой-либо собственной идеологии в постсоветский — возможно, она начинает кристаллизоваться сейчас — привели к монополии Запада на целеполагание для всего мира. Сейчас нам необходимо разрушать эту монополию, а не ссылаться на то, что нам не следует противопоставлять себя всему человечеству. Если мы предложим другой путь, как это было сделано после Октябрьской революции, то часть человечества, безусловно, пойдет за нами.

Два французских профессора-вольнодумца предприняли интересный и поучительный анализ концепции устойчивого развития (Брюне, Гишар, 2012). Три десятилетия после Второй мировой войны ознаменовались достаточно высокими темпами экономического роста, составлявшими 4–5% в год, как для стран Западной Европы, так и для США (во Франции это “Славное тридцатилетие”). С середины 1970-х годов темпы стали снижаться, опустившись до 2–2.5% и даже ниже, что было связано в первую очередь с вывозом промышленности в страны третьего мира. Именно тогда резко возросло внимание к проблемам качества окружающей среды, а в 1987 г. с подачи Г.Х. Брундтланд появилась концепция устойчивого развития, такого развития, которое сохраняет качество окружающей среды для настоящего и будущих поколений. Между тем выход на первый план экологических проблем стал возможен именно в силу того, что промышленные группы во все возрастающей степени выносили “грязные” производства за пределы высокоразвитых стран.

В том же направлении действовала и другая тенденция — рост благосостояния среднего класса, представители которого приобретали вторые и третьи жилища, предъявляя при этом высокие требования к качеству среды. Таким образом, появился спрос на идеологию, утверждающую необходимость трансформации количественного

роста в качественный, избирателей убеждали в том, что они выигрывают в качестве жизни, а не в материальном потреблении. Между тем очевидным следствием такого развития стал продолжающийся рост безработицы, формирование устойчивых групп населения, исключенных из общественного производства, и потому имеющих совсем иные представления о качестве жизни (там же).

Отечественными исследователями также было показано, что устойчивое развитие, понимаемое как неистощительное природопользование, невозможно даже теоретически (Бабурин, 2011). Можно, например, поддерживать плодородие почв, но для этого надо вносить удобрения, применять щадящие методы обработки, проводить дорогостоящие противоэрозионные мероприятия и проч. Все это требует привнесения вещества и энергии. Земля же — открытая система только по энергии, вещество не может быть получено извне (за исключением метеоритов). Следовательно, это вещество в виде удобрений, металлов для машин, расходуемых ими горюче-смазочных материалов и т.п. должно быть получено из других стран. Высокоразвитые страны могут улучшать состояние воздушного бассейна своих городов, внедряя электромобили, но металлы для аккумуляторов выплавляются в совсем других странах, а эти производства — из самых экологически опасных. Поэтому экспорт загрязнения — не метафора, а устоявшееся научное понятие. Кстати, переход на электромобили ведет к росту потребления энергии, как и отказ от кокса в черной металлургии, и многое другое.

“Зеленый шум”, к сожалению, заглушает многие трезвые голоса. Почти совсем перестали упоминаться исключительно важные в мировоззренческом отношении результаты Д.И. Люри (1962–2017), убедительно показавшего на обширном эмпирическом материале, что высокая цена на ресурс исключает возможность его рационального использования (Анатомия ..., 1999). Это объективное обстоятельство не зависит ни от социально-экономической формации, ни от добрых намерений властей, ни, тем более, от общественных настроений, теряющих в последнее время всякую связь с объективной реальностью. Весьма характерно предложение А.Б. Чубайса, сделанное за год до отставки и отъезда из России, считать устойчивое развитие новой религией XXI в.² Можно не соглашаться с авторами в очень важных вопросах, но спорить с ними следует, как со своими, поскольку и для них, и для нас “сталь не врет”.

Именно потому, что “сталь не врет”, исключительно важен вопрос о том, откуда она берется.

² Чубайс назвал новую религию XXI века // РИА НОВОСТИ. 10.02.2021. <https://ria.ru/20210210/chubays-1596877471.html> (дата обращения 16.01.2022).

Авторы, будучи экономистами, вовсе не обязаны его рассматривать, но он крайне важен в плане осмысления исторического опыта. Ведь именно Пруссия, затем Германия показала “первый — видимо, классический — пример догоняющего развития на базе научно-технического прогресса и государственной политики”. Здесь необходимо вспомнить опального советского философа М.К. Петрова (1923—1987), разработавшего представление о второй научной революции (Петров, 2004). Величие первой научной революции, в ходе которой люди, ранее не имевшие представлений об опытном естествознании, создали науку Нового времени, во многом заслоняет значение второй научной революции, ничуть не менее важной для общественного развития. Ведь до нее наука была благородным занятием любознательных одиночек, имевших малое отношение к практике, а академии наук служили, подобно дворцам и паркам, в первую очередь укреплению престижа монархии. Соответственно первая промышленная революция научно-технической отнюдь не была, поскольку все основные изобретения — ткацкий станок, паровая машина, пароход, паровоз, электрический телеграф — были сделаны практиками-самоучками. Наука в те времена объективно не могла вести за собой практику, поскольку сама от нее отставала.

Вторая научная революция, она же первая научно-техническая, была в чистом виде революцией сверху. Король Пруссии Фридрих Вильгельм III (1770—1840), потерявший в наполеоновских войнах половину территории и половину подданных, приобрел похвальную склонность к реформам в области образования. Ему принадлежит фраза: “Государство должно заместить духовной силой то, что оно потеряло в физической”. В осуществление этой прекрасной идеи его министр по делам вероисповеданий и просвещения В. фон Гумбольдт (1767—1835), старший брат великого естествоиспытателя, основал в 1809 г. Берлинский университет как первый университет нового типа, во многом взамен утраченного университета в Галле. В этом университете впервые была реализована поточная система обучения, пришедшая на смену тьюторской (работа преподавателя с малой группой студентов на протяжении всего срока обучения), появился институт профессоров и приват-доцентов, центр тяжести был перенесен на естественнонаучные и технические дисциплины.

Поставив на поток производство специалистов, удалось создать условия для последующего научно-технического рывка. Оформление “великой триады”, по М.К. Петрову (фундаментальная наука—прикладная наука—подготовка кадров), было завершено в 1826 г. созданием Ю. Либихом (1803—1873) лаборатории в Гисене, ставшей прообразом современных НИИ. В ней велись как

фундаментальные, так и прикладные исследования, в частности были разработаны первые минеральные удобрения (азотные). Была в ней и структура, соответствующая современной аспирантуре. Очевидно, что Франко-прусская война была проиграна Францией, имевшей на порядок меньше инженеров и химиков, нежели Пруссия, еще до ее начала.

Самый грустный для нас урок прусского успеха — даже не в совершенно недостаточном для прорыва финансировании образования и науки, а в полном отсутствии фигур калибра Фридриха Вильгельма III и В. фон Гумбольдта, способных выдвигать и осуществлять принципиально новые идеи, плоды осуществления которых достанутся лишь потомкам. У наших же реформаторов всегда много новых идей, но при этом ни одной собственной, очень короткий горизонт планирования, что также характерно для современного Запада. Разгром Академии наук, великого детища Петра I (1672—1725), в 2013 г. — самое яркое, но далеко не единственное свидетельство абсолютной негодности проводимой политики для решения масштабных задач развития страны.

“ПРОГРЕССИВНЫЙ НАЦИОНАЛИЗМ” КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ

Другой внеэкономический фактор, который обязательно должен быть учтен, это прогрессивный национализм А. Ливена: “За исключением коммунизма в течение его непродолжительного революционного периода, ничто в современной истории не может сравниться с национализмом в качестве источника коллективных действий, добровольных жертв и, конечно, государственного строительства. Другие элементы личной идентичности могут быть важны для каждого человека в отдельности, но они не создают крупных и долговечных институтов... В России именно возрождение национализма спасло страну от полного краха в 1990-е годы. После того, как в Китае была официально принята новая государственная экономическая стратегия, которую можно охарактеризовать как авторитарный социально-ориентированный рыночный капитализм, именно национализм пришел на смену коммунизму в качестве идеологии, придающей легитимность государству... Можно уверенно сказать, что реформы прошли успешно лишь в тех странах, где государство смогло мобилизовать сильные националистические чувства, чтобы оправдать необходимые жертвы. В некоторых случаях карта национализма разыгрывалась с большим убеждением и энтузиазмом, дабы укрепить страну перед угрозой иностранного вторжения или господства” (Ливен, 2020).

Рассматривая индустриализацию как важнейший аспект модернизации, авторы обоснованно

придают огромное значение проблеме неравенства как главной угрозе социальной стабильности. Столь же обоснованно они делают вывод об отсутствии неизбежности социального взрыва в начале XX в. Однако избежать его удалось лишь в социальных империях, по А. Ливену: “Планы социальных империалистов выходили далеко за пределы социального страхования, охватывая градостроительство, общественное здравоохранение и реформу образования. Во всех западноевропейских странах успех различных программ социального империализма, осуществленных до 1914 г., находил отражение в необычайной стойкости и самопожертвовании их армий. В то время как неспособность российского империалистического государства обеспечить минимальное социальное благополучие своих граждан во многом способствовала краху сначала армии, а затем государства в 1917 г.” (там же).

Неоднократно подчеркивая, что реформы прошли успешно лишь в тех странах, где государство смогло мобилизовать сильные националистические чувства, чтобы оправдать необходимые жертвы, А. Ливен справедливо указывает: «Ошибка современных либеральных реформаторов заключалась в непонимании того, что единственный способ, с помощью которого их предшественники XIX в. сумели убедить массы согласиться с их правлением и программой, была апелляция к национализму. Эта ошибка была особенно катастрофична в России, если говорить о многих российских либералах 1990-х годов, которые выступили не только как авторы ужасно болезненной программы экономических реформ, но и как апологеты гегемонии США над Россией — не слишком привлекательная предвыборная платформа для большинства российских избирателей. Находясь в России в 1990-е годы, я устал слышать от западных аналитиков и некоторых российских либералов, что российские “западники” XIX в. были предтечами и образцом для современных российских прозападных реформаторов, веривших, что Россия должна стать услужливым союзником Соединенных Штатов. Западники XIX в., конечно, верили в либеральные реформы, но по другим причинам. Подобно своим собратьям в Китае и Японии, они считали, что эти реформы необходимы для усиления Российской империи, конкурировавшей с западноевропейскими соперниками. Однако у них не возникало мысли проводить реформы ради того, чтобы Россия стала вассалом Британской империи» (там же).

А.В. Фененко, предлагая использовать опыт прусской стратегии реализуемого превосходства для решения военно-политических задач, стоящих перед Россией, также отмечает исключительную роль национализма: «Как утверждал Х. фон Мольтке, для использования реализуемого превосходства необходимо особое качество по-

литических элит, готовых воспользоваться данной стратегией... Мольтке нашел весьма оригинальный рецепт подготовки подобной элиты. “Побольше детям Древней Греции!” — гласил его остроумный ответ. За этим стоял глубокий смысл. История Древней Греции — это способность маленьких стран наносить поражение намного превосходящим их по размерам и ресурсной базе империям. Уверенность эллинов в своем превосходстве над “варварами” и их огромными ресурсами также импонировала Мольтке. Поэтому пример эллинов вдохновлял прусских стратегов XIX в. находить нестандартные решения по разгрому превосходящих по совокупности ресурсов противников» (Фененко, 2018).

По мнению А.В. Фененко, «сейчас перед Россией возник непростой вызов — строить военную (шире — внешнюю) политику не по Кутузову, а по Клаузевицу и Мольтке. Только такой вариант даст нам шанс на победу в начинающейся новой “холодной войне”» (там же). Это положение исключительно важно в контексте обсуждаемой книги, поскольку две главные ее задачи — проанализировать социальное неравенство как источник социально-политической неустойчивости, а также связь экономического развития и социальной политики с “конкуренцией великих держав и объективными параметрами их подготовки к будущей войне”, которая фактически уже стала настоящей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возвращаясь в заключение к проблемам развития, которое, увы, может быть только неустойчивым, следует отметить, что тут весьма вероятны самые глубокие изменения, связанные с очень существенным замедлением экономического роста, которые скажутся и на характере соперничества государств. В соответствии с феноменологической теорией роста численности человечества С.П. Капицы (1928–2012), к концу столетия население Земли должно достигнуть максимальной величины в 10–11 млрд жит., после чего начнет очень медленно сокращаться. Уже к середине столетия численность человечества должна практически выйти на плато (Капица, 2012). А.Г. Вишневский (1935–2021), тесно сотрудничавший с С.П. Капицей и консультировавший его по демографическим вопросам, сформулировал представление о быстром росте населения с конца XVIII до второй половины XXI в. как о коротком переходном периоде (не более трех столетий) между двумя равновесными состояниями — тысячелетиями крайне медленного роста и предположительно сопоставимым по продолжительности столь же медленным сокращением населения планеты (Вишневский, 2019). Результаты С.П. Капицы и А.Г. Вишневского отличаются от теории демогра-

фического перехода в том, что последняя предполагает стабилизацию численности человечества, а не ее постепенное сокращение.

Необходимо отметить, что все бурное экономическое развитие, начало которому положила первая промышленная революция, полностью укладывается в этот не столь продолжительный по историческим меркам переходный период. Важнейший вопрос — возможны ли высокие темпы роста экономики в условиях стабилизации и последующего очень медленного сокращения населения планеты? На первый взгляд, да, ведь и эпоха Великих географических открытий пришлась на период очень вялого демографического роста. Однако тогда население было молодым. Сейчас оно быстро стареет.

Исключительное мировоззренческое значение теории С.П. Капицы даже не в предсказаниях, основанных на ретроспективной проверке модели, — сходные прогнозы были сделаны и с использованием более традиционных методов, а в использовании концептуального и математического аппарата нелинейной динамики, предполагающего финалистское (телеологическое) объяснение вместо каузального. В теории это имеет форму принципа демографического императива: рост населения на планетарном уровне (для отдельных его частей теория не работает) никогда не подчинялся внешним ограничениям в виде доступных ресурсов, а всегда соответствовал внутренней закономерности, формулируемой математически. Если демографическая мысль уже во многом освободилась от безраздельного господства редукционизма, то экономическая, по-видимому, только начинает двигаться этим путем (Гринберг, Рубинштейн, 2021). Экономический рост, как и демографический, тоже может подчиняться каким-то глубинным закономерностям неизвестной нам природы. Никогда не следует отказываться от ньютоновского самоощущения мальчика, играющего галькой на берегу океана неведомого.

Между тем значение собственно экономических факторов неизбежно будет сокращаться в мире очень низких (даже по нынешним меркам) темпов экономического роста. Глобальные элиты стали готовиться к предстоящему переходу заходя, начиная с первых докладов Римского клуба. То, что те прогнозы совершенно не оправдались, несколько не смутило заказчиков, коим эти доклады были нужны в качестве идеологических документов, как и “устойчивое развитие” в дальнейшем. Разумеется, для Запада, вырвавшегося вперед, весьма желательно остановить забег, зафиксировав свою победу. Однако это с очевидно-

стью противоречит интересам других стран, будь то Китай, Индия или Россия. Они явно не склонны отказаться от попыток догоняющего развития.

Для России тут открываются сразу две взаимосвязанные возможности. Во-первых, стать лидером незападных стран при переходе к интенсивному развитию, замене количественных показателей качественными (Шупер, 2019). Переход к интенсивному развитию уже идет в экономике наиболее развитых стран, и именно он порождает разговоры о необходимости каким-то образом разбраться со становящимся избыточным населением. Однако в большинстве остальных сфер общественной жизни, будь то образование, наука, социальное обеспечение, рациональное природопользование (чтобы не прибегать к крайне идеологически нагруженному термину “охрана природы”) царит вопиющая экстенсивность. Засилье библиометрии, грубо деформирующее современную науку, — наиболее близкий нам пример и, вероятно, один из наиболее ярких (Шупер, 2020). Воспользовавшись идеями прогрессивного национализма, мы сможем восстановить суверенное целеполагание и подготовиться к совсем иной игре — той, которая начнется через 15–20 лет в мире очень медленного экономического роста. Для этого нам надо хорошо усвоить “пруссские уроки”, творчески развивать образование и науку и запастись терпением — в нынешней игре Россия, в отличие от Китая, выиграть все равно не сможет, а потому неизбежно будет выступать — и уже выступает — в качестве глобального ревизиониста.

Другая возможность подарена нам нашей историей и географией. Страна может еще долго сохранять относительно высокие темпы экономического роста в перешедшем к стационарности мире благодаря освоению Сибири и Дальнего Востока, последнего фронта, по А.Н. Пилясову. Разумеется, постиндустриальное освоение принципиально отличается от индустриального, оно значительно более наукоемко, менее трудозатратно, требует развития не только крупных промышленных и транспортных предприятий, но также малых и средних инновационных фирм, способствует внедрению новых социальных технологий и полиморфизму транспортных систем (Пилясов, 2009). Здесь открывается огромный простор для развития альтернативной географии и географам надо смело на него выходить. Речь не о “месте географии”, по Р. Каплану, а о ее реванше, о том, что снижение роли собственно экономических факторов повышает значение факторов геополитических и геоэкономических. Географам надо не ждать “социального заказа”, а смело

приступать к планированию будущего в форме вариантных самосбывающихся прогнозов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья подготовлена в рамках темы госзадания Института географии РАН № АААА-А19-119022190170-1 (FMGE-2019-0008).

FUNDING

The article was prepared within the framework of the state assignment no. АААА-А19-119022190168-8 (FMGE-2019-0008) of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анатомия кризисов. М.: Наука, 1999. 237 с.
- Бабури В.Л. Легенды и реалии устойчивого развития сквозь призму географии // Изв. РАН. Сер. геогр. 2011. № 4. С. 97–106.
- Брюне А., Гишар Ж.-П. Геополитика меркантилизма: новый взгляд на мировую экономику и международные отношения. М.: Новый хронограф, 2012. 232 с.
- Бюржель Ги. Умирает ли Париж? М.: Изд. дом “Дело” РАНХиГС, 2014. 176 с.
- Вишневский А.Г. Демографический переход и проблемы демографического саморегулирования. Ответ А.Б. Синельникову // Социол. журн. 2019. Т. 25. № 4. С. 93–104.
- Григорьев Л.М., Морозкина А.К. Успешная неустойчивая модернизация мира: 1880–1913. М.—СПб.: Нестор-История, 2021. 176 с.
- Гринберг Р.С., Рубинштейн А.Я. Индивидуум & Государство: экономическая дилемма. 2-е изд., испр. М.: Изд-во “Весь Мир”, 2015. 480 с.
- Зотин А. Где искать эффективную промышленную политику и зачем России Африка? // Международный дискуссионный клуб Валдай. 29.12.2021. <https://ru.valdaiclub.com/a/highlights/gde-iskat-efektivnuyu-promyshlennuyu-politiku/> (дата обращения 02.02.2022).
- Капица С.П. Парадоксы роста. Законы глобального развития человечества. М.: Альпина нон-фикшн, 2012. 201 с.
- Киссинджер Г. Дипломатия. М.: Науч.-изд. центр “Ладомир”, 1997. 847 с.
- Ливен А. Прогрессивный национализм // Россия в глобальной политике. 2020. № 5. <https://globalaffairs.ru/articles/progressivnyj-naczionalizm/> (дата обращения 08.02.2022).
- Петров М.К. История европейской культурной традиции и ее проблемы. М.: РОССПЭН, 2004. 773 с.
- Пилясов А.Н. И последние станут первыми: северная периферия на пути к экономике знания. М.: УРСС, 2009. 542 с.
- Фененко А. “Прусские уроки” для России / Российский совет по международным делам. 11 мая 2018. <https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/analytics/prusskie-uroki-dlya-rossii/> (дата обращения 08.02.2022).
- Шупер В. Переход к интенсивному развитию: проект для России на XXI в. / Российский совет по международным делам. 6 мая 2019. <https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/analytics/perekhod-k-intensivnomu-razvitiyu-proekt-dlya-rossii-na-xxi-v/> (дата обращения 06.02.2022).
- Шупер В.А. Севший голос науки. Взгляд из Отечества // Управление наукой: теория и практика. 2020. Т. 2. № 1. С. 40–53. <https://www.science-practice.ru/index.php/science/article/view/44/56> (дата обращения 09.02.2022).

Successful Unstable Industrialization of the World: 1880–1913—Lessons for Modernity (Reflections on the Book by Leonid Grigoriev and Alexandra Morozkina)

V. A. Shuper^{1, 2, *}

¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Bernardo O’Higgins University, Santiago, Chile

*e-mail: Vshuper@igras.ru

Leonid Grigoriev and Alexandra Morozkina book is extremely relevant, because now, as in 1880–1913, there is a rapid increase in inequality. An important conclusion is that a revolutionary explosion was not inevitable and would not have occurred if there had not been a world war. Growth rates were limited by the insufficient breadth of domestic markets and slow growth in labor productivity due to a lack of human capital. Marxism, according to the authors, reflected the nature of society in the middle of the 19th century, but from about the 1870s, inequality and absolute poverty began to become different problems. Industrialization at the expense of the peasantry, which took place in Russia, which developed contrary to theories, should not be interpreted as an unequivocal evil, especially since similar phenomena were observed in other countries. The prevailing ideas about Germany’s motives in unleashing the First World War are called into question on the base of economic analysis (“steel doesn’t lie”). The Germany was extremely concerned about the change in the balance of power in favor of the United States and Russia. The authors concluded that there was no convergence in the development of the countries under consideration in 1880–1913. In their opinion, successful catch-up de-

velopment is a rather rare success. At the same time, the recipe for success has always turned out to be individual and unsuitable for replication. The separation of the colonies from the former mother countries has not diminished in the last century. Reflections on the book lead to the conclusion that Russia in the 21st century has an opportunity for longer than other countries to maintain the dynamism of development in a world that has passed to stationarity thanks to the development of Siberia.

Keywords: industrialization, social inequality, catch-up development, progressive nationalism, alternative geography

REFERENCES

- Anatomiya krizisov* [Anatomy of Crises]. Moscow: Nauka Publ., 1999. 237 p.
- Baburin V.L. Legends and realities of sustainable development through the prism of geography. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2011, no. 4, pp. 97–106. (In Russ.).
- Brunet A., Guichard J.-P. La visé hégémonique de la Chine. L'impérialisme économique. Paris: L'Harmattan, 2011. 208 p.
- Burgel G. Paris meurt-il? Paris, Perrin, 2008. 183 p.
- Fenenko A. "Prussian Lessons" for Russia. Russian International Affairs Council (RIAC), May, 11, 2018. Available at: <https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/analytics/prusskie-uroki-dlya-rossii/> (accessed: 08.10.2022). (In Russ.).
- Grigoryev L.M., Makarkina A.K. *Uspeshnaya neustoichivaya modernizatsiya mira: 1880–1913* [Successful Unsustainable Modernization of the World: 1880–1913]. Moscow–St. Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2021. 176 p.
- Grinberg R.S., Rubinshtein A.Ya. *Individuum i Gosudarstvo: ekonomicheskaya dilemma* [Individual and State: An Economic Dilemma]. Moscow: Ves' Mir Publ., 2015. 480 p.
- Kapitza S.P. *Paradoksy rosta. Zakony global'nogo razvitiya chelovechestva* [Paradoxes of Growth: Laws of Global Development of Mankind]. Moscow: Alpina Nonfiction Publ., 2012. 204 p.
- Kissinger H. Diplomacy. New York: Simon & Schuster, 1994. 912 p.
- Lieven A. Progressive nationalism. *Rossiia v Globalnoi Politike*, 2020, no. 5. Available at: <https://globalaffairs.ru/articles/progressivnyj-naczionalizm/> (accessed: 03.10.2022). (In Russ.).
- Petrov M.K. *Istoriya evropeiskoi kul'turnoi traditsii i eyo problemy* [History of the European Cultural Tradition and its Problems]. Moscow: ROSSPEN Publ., 2004. 773 p.
- Pilyasov A.N. *I poslednie stanut pervymi: severnaya periferiya na puti k ekonomike znaniya* [And the Last will be the First: Northern Periphery on the Way to the Knowledge Economy]. Moscow: URSS Publ., 2009. 542 p.
- Shuper V. Transition to Intensive Development: Project for Russia in the 21st Century. Russian International Affairs Council (RIAC), May, 6, 2019. Available at: <https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/analytics/perekhod-k-intensivnomu-razvitiyu-proekt-dlya-rossii-na-xxi-v/> (accessed: 03.10.2022). (In Russ.).
- Shuper V. The Shrunk Voice of Science. View from the Fatherland. *Upravlenie Naukoi: Teoriya i Praktika*, 2020, vol. 2, no. 1, pp. 40–53. Available at: <https://www.science-practice.ru/index.php/science/article/view/44/56> (accessed: 03.10.2022). (In Russ.).
- Vishnevskii A.G. Demographic transition and problems of demographic self-regulation. Answer A.B. Sinelnikov. *Sotsiol. Zh.*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 93–104. (In Russ.).
- Zotin A. Where to Look for an Effective Industrial Policy, and Why Russia Needs Africa. Valdai Discussion Club, 29.12.2021. Available at: <https://valdaiclub.com/a/highlights/where-to-look-for-an-effective-industrial-policy/> (accessed: 03.10.2022). (In Russ.).