

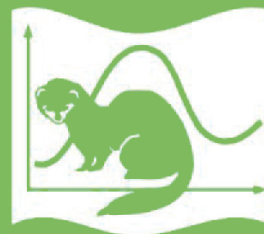
ISSN 0367-0597

Номер 5

Сентябрь - Октябрь 2024



ЭКОЛОГИЯ



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 5, 2024

80 лет Институту экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук: путь уральского Института биологии в современную экологию <i>Н.Г. Смирнов</i>	327
Коэффициенты перехода ^{90}Sr у древесных растений в зоне влияния ядерного предприятия <i>Л.Н. Михайловская, В.Н. Позолотина, З.Б. Михайловская</i>	342
Тритий от молекулы до биосферы. 2. Подходы к дозиметрии <i>Е. В. Антонова</i>	354
Динамика численности генераций чира (<i>Coregonus nasus</i> (Pallas, 1776)) Нижней Оби в период 1981–2023 гг. <i>В.Д. Богданов, А.Р. Копориков, И.П. Мельниченко, И.А. Кшнясев, О.А. Госькова, Я.А. Кижеватов</i>	379
Радиальный прирост <i>Pinus sylvestris</i> L. в островных борах Северного Казахстана в контексте климата и геоморфологических условий <i>М.А. Гурская, Л.И. Агафонов, В.В. Кукарских, А.Ю. Сурков, Фенг Чен</i>	390

Content

No 5, 2024

80 Years of Institute of Plant and Animal Ecology of Ural Branch Russian Academy of Sciences: the way of the Ural Institute of biology to modern ecology	
<i>N. G. Smirnov</i>	327
Aggregated transfer factors of ^{90}Sr in woody plants in the zone of influence of a nuclear enterprise	
<i>L. N. Mikhailovskaya, V. N. Pozolotina, Z. B. Mikhailovskaya</i>	342
Tritium from molecule to biosphere. 2. Approaches to dosimetry	
<i>E. V. Antonova</i>	354
Abundance dynamics of broad whitefish (<i>Coregonus nasus</i> (Pallas, 1776)) generations in the Lower Ob during 1981–2023	
<i>V. D. Bogdanov, A. R. Koporikov, I. P. Melnichenko, I. A. Kshnyasev, O. A. Goskova, Y. A. Kizhevatov</i>	379
Radial growth of <i>Pinus sylvestris</i> L. in island bores of Northern Kazakhstan in the context of climate and geomorphological conditions	
<i>M. A. Gurskaya, L. I. Agafonov, V. V. Kukarskih, A. Y. Surkov, Feng Chen</i>	390

УДК 574(09)(470.54-25)

80 ЛЕТ ИНСТИТУТУ ЭКОЛОГИИ РАСТЕНИЙ И ЖИВОТНЫХ УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК: ПУТЬ УРАЛЬСКОГО ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ В СОВРЕМЕННУЮ ЭКОЛОГИЮ

© 2024 г. Н. Г. Смирнов

Институт экологии растений и животных УрО РАН, Россия 620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202

e-mail: nsmirnov@ipae.uran.ru

Поступила в редакцию 23.04.2024 г.

После доработки 05.07.2024 г.

Принята к печати 08.07.2024 г.

В статье приводятся основные события из истории Института экологии растений и животных УрО РАН, которому в 2024 г. исполняется 80 лет. Основное внимание уделяется изменениям в тематике исследований. В 1940-е и 1950-е годы она была тесно связана с задачами, которые ставились перед институтом в связи с требованиями народного хозяйства в послевоенном строительстве. С 1955 г. в связи с приходом к руководству институтом С.С. Шварца и обновлением кадрового состава начался этап перестройки тематики, который привел к преобразованию Института биологии в Институт экологии растений и животных. С этого же года начинаются исследования по радиобиологии и популяционной тематике. Новый период истории наступает после прихода к руководству В.Н. Большакова в 1976 г. В институте появляется несколько филиалов, растет численность сотрудников и расширяется научная тематика. В последние десятилетия происходит массовый приход молодых сотрудников, организация новых лабораторий и рост числа публикаций в престижных международных журналах.

Ключевые слова: Институт экологии растений и животных, экология, ботаника, зоология, экотоксикология, радиэкология, ихтиология, дендрохронология, микология, четвертичная палеоэкология

DOI: 10.31857/S0367059724050013 **EDN:** WCIREY

Каждого, кто входит в главный корпус Института экологии растений и животных УрО РАН в г. Екатеринбурге, встречают портреты трех выдающихся биологов, выгравированные на мемориальных досках. Они когда-то работали здесь: знаменитый генетик и биофизик Н.В. Тимофеев-Ресовский, ботаник академик РАН П.Л. Горчаковский и академик РАН С.С. Шварц, эколог, возглавлявший институт с 1955 г. по 1976 г. На другом здании, расположенном в Ботаническом саду, есть мемориальная доска в честь выдающегося лесоведа члена-корреспондента РАН Б.П. Колесникова. Живым памятником еще одному выдающемуся ботанику и экологу — члену-корреспонденту РАН С.А. Мамаеву — является Ботанический сад УрО РАН, который он вырастил из лаборатории института в самостоятельное учреждение в составе УрО РАН.

Череду самых ярких фигур первой трети истории института по праву нужно было бы начать с В.И. Патрушева, который сформировал первый штат сотрудников и возглавлял коллектив до 1948 г.

Его увольнение как последователя вейсманизма-морганизма было одним из шагов по внедрению мичуринской биологии после печально знаменитой сессии ВАСХНИЛ.

За каждым из этих лидеров следовала школа учеников. Неумолимое время поглотило не только упомянутых классиков, но и некоторых представителей второго и третьего поколений исследователей, которым довелось начать работать в науке под руководством С.С. Шварца и других упомянутых лидеров. В 2024 г. исполняется 80 лет институту и 90 лет со дня рождения академика В.Н. Большакова. Он работает в институте с 1959 г. по настоящее время и занимал пост директора 37 лет. В 2013 г. он передал руководство члену-корреспонденту В.Д. Богданову, а тот в 2018 г. — д.б.н. М.Г. Головатину. Становление и развитие школы экологов в институте происходило без каких-либо резких перемен или драматических событий. К 60-летию юбилею был издан сборник статей «Уральская экологическая школа...» [1]. Публикация этого сборника освобождает от необходимости

повторять к 80-летию института то, что было изложено в связи с 60-й годовщиной. Не менее ценными источниками оригинальных сведений о выдающихся исследователях, работавших в институте, служат монографии, сборники воспоминаний и биобиблиографические справочники. Особенно значимыми источниками о прошлых временах биологии на Урале и жизни ушедших поколений являются статьи и книги мемуарного плана, изданные ветеранами нашей науки — С.А. Мамаевым и С.Г. Шиятовым [2, 3]. Наличие таких изданий позволяет ограничить задачу данной статьи изложением событий в институте и их анализом главным образом в пределах последних 15–20 лет. На более ранние этапы жизни института будет обращено внимание только в тех случаях, если они ранее были незаслуженно забыты.

Институт биологии Уральского филиала АН СССР от первых лет существования до превращения в первый в СССР Институт экологии растений и животных

Истоки биологических наук в Уральском регионе уходят к экспедициям петровских и екатерининских времен. Выдающиеся естествоиспытатели руководили описаниями уральских земель с их растительностью, животным миром, недрами и коренными народами [4]. К концу XIX в. большая часть территории Урала была пройдена экспедициями Академии наук и Географического общества. Первые местные деятели науки, жители городов Екатеринбурга и Перми, объединялись в любительские научные общества, наиболее значимым из которых было УОЛЕ [5]. Следующим этапом развития наук на Урале является открытие университета в г. Перми в 1916 г. В первые два десятилетия советской власти в г. Свердловске бурно начинают развиваться образование и наука. Отметим открытые учреждения, где была представлена биология: Лесотехнический, Медицинский, Сельскохозяйственный, Горный институты и ряд отраслевых НИИ (ВНИОЗ, ВНИОРХ, УралНИСХОЗ), Ботанический сад, Лесная опытная станция зеленого строительства, Свердловская научно-исследовательская лесная станция.

При открытии первых учреждений Академии наук несколько раз поднимался вопрос о создании биологического подразделения, но из-за отсутствия необходимой кадровой базы такое решение всякий раз откладывалось. Так продолжалось до 1944 г. [6]. Город Свердловск, как и другие города Урала, во время войны стал местом эвакуации не только заводов и оборонных предприятий. Здесь были размещены многие научные учреждения из

Москвы и Ленинграда. Особенно важно для будущего института, что здесь оказались такие видные ботаники, как член-корр. АН СССР В.Н. Сукачев, профессор-лесовод М.Е. Ткаченко, фитопатолог С.В. Ванин, охотовед Г.Г. Доппельмайер и другие работники Ленинградской лесотехнической академии. Этот кадровый костяк специалистов высокой квалификации был дополнен работниками местных прикладных учреждений сельскохозяйственного, медицинского, ихтиологического и лесного профиля. Из таких разнородных отраслей были набраны сотрудники первого поколения Института биологии.

Первый его директор — к.б.н. В.А. Мовчан — был специалистом по рыборазведению, но через два месяца его сменил на директорском посту физиолог животных д.б.н. В.И. Патрушев. Этот молодой энергичный и высокообразованный ученик Н.И. Вавилова приступил к новой работе, еще не уволившись из рядов Советской армии с должности начальника медицинской клинической лаборатории Окружного военного госпиталя в г. Свердловске. Жизнь Василия Ивановича и его научная деятельность подробно описаны в документальной повести Е.Н. Колосовой «Василий Иванович Патрушев: известный и неизвестный» [7]. В первые годы существования института (1945–1948 гг.) В.И. Патрушев продолжал набор сотрудников из прикладных лабораторий и вузов г. Свердловска. Одновременно многие эвакуированные специалисты возвращались в Москву и Ленинград. В состав института вливались не только отдельные новые сотрудники, но и целые учреждения, например Ботанический сад, Станция по борьбе с домовыми грибами. Руководитель последней фитопатолог З.А. Демидова создала в институте сильное направление, заслуженно получившее всеобщее признание и государственные награды [8]. В конце 1940-х — начале 1950-х годов институт формировался молодыми сотрудниками, прошедшими войну и закончившими обучение в разных вузах страны. Среди них были выпускники из Ленинграда (С.С. Шварц, 1946 г.), Перми (В.С. Смирнов, 1951 г.), Томска (Л.А. Добринская, 1956; И.Н. Брусницина, 1958 г.). Л.М. Сюзюмова, выпускница Свердловского сельскохозяйственного института, пришла работать в институт в 1949 г. и проработала здесь всю жизнь, став доктором наук и руководителем одной из ведущих лабораторий.

Особо следует отметить группу молодых специалистов, получивших разностороннюю биологическую подготовку на разных факультетах и кафедрах Московского пушно-мехового института (МППИ).

Первым среди выпускников-охотоведов, пришедших в институт, был В.Н. Павлинин. В 1950-х годах, отработав по распределению приемщиками пушнины на полярных факториях, охотоведами, каракулеводами и другими специалистами согласно дипломам, пришли на работу в институт такие сотрудники, как Л.Н. Добринский, О.А. Пястолова, Н.С. Гашев, В.Л. Михайлов, Ф.И. Бойкова, В.Н. Бойков, А.З. Амстиславский, В.Ф. Сосин. Образование, которое получали студенты МПМИ, существенно отличалось от университетского, но имело немало положительных сторон [9]. Преподавателями и руководителями кафедр и факультетов там были самые лучшие в стране профессора, которые преподавали на биофаке МГУ. Лаборатории были оснащены первоклассным оборудованием, а расположение МПМИ в подмосковных лесах на берегах р. Пехры в районе г. Балашихи создавало идеальные условия для круглогодичных полевых практик и наблюдений над природными явлениями. Учебный процесс был организован так, что, кроме аудиторных занятий, студенты получали богатый опыт практических работ от Якутии и Чукотки до гор Средней Азии. К великому сожалению этот замечательный вуз был ликвидирован, а его остатки в урезанном виде переведены в г. Иркутск. Все же более десяти выпускников МПМИполнили Институт биологии УФАН в 1940–1950-е годы, проработав в нем много лет и создав костяк школы уральских экологов.

В первое поколение сотрудников института в середине 1950-х и начале 1960-х годов начали вливаться выпускники биофака УрГУ, созданного в 1944 г. Так, фронтовики и выпускники биофака УрГУ А.В. Покровский и В.Г. Оленев начали работать в институте в 1955 г. А.В. Покровский смог обратиться к научной работе только после нескольких лет отработки по распределению зоологом на противочумной станции в Казахстане [10].

В 1946 г. после защиты кандидатской диссертации в институте начал работать молодой зоолог С.С. Шварц — выпускник Ленинградского университета и фронтовик. Он был учеником профессора и выдающегося герпетолога П.В. Терентьева. В первое десятилетие научной деятельности С.С. Шварца в институте работа проходила в обстановке, плохо способствовавшей достижениям в фундаментальных исследованиях, так как структура института, его планы и отчеты были нацелены главным образом на практические достижения в сельском и лесном хозяйстве на основе доктрины Т.Д. Лысенко о мичуринской биологии. Глубоко понять и оценить устремления С.С. Шварца помо-

гут воспоминания его ученика В.Г. Ищенко, который воспроизводил фразу учителя на юбилейном вечере: «Если возникнет необходимость, я готов грузить камни ради того, чтобы мне разрешили заниматься зоологией» [11]. Сама постановка вопроса о том, что кто-то должен разрешать заниматься наукой, говорит об обстановке, в которой происходили события. Молодость и отсутствие опыта не помешали С.С. Шварцу стать руководителем лаборатории зоологии. На первых порах в ней было всего три человека, но, несмотря на все трудности, именно в те годы были заложены основы нескольких крупных идей, разработка которых позволила С.С. Шварцу вскоре создать коллектив единомышленников, позднее сформировавшийся в Уральскую экологическую школу.

Сотрудники института первого поколения занимались не только фундаментальными исследованиями, но уделяли внимание работам прикладного плана и популяризации науки. В 1950-е годы С.С. Шварц в соавторстве с териологом В.Н. Павлининым и орнитологом, работавшим в те годы в УрГУ, Н.Н. Даниловым опубликовали несколько научно-популярных книг о животном мире Урала. Эти книги реально помогали юннатам и школьным учителям осваивать основы биологической науки в природе. Одна из таких книг объемом 236 стр. была выпущена в центральном издательстве «Учпедгиз» и продавалась по всей стране [12]. В духе времени были работы В.Н. Павлинина и С.С. Шварца «Борьба с грызунами в парниках и теплицах» [13], «Звероводство в колхозе им. С.М. Кирова Пышминского района Свердловской области» [14].

Одним из важнейших достижений института в начале 1960-х годов был выход монографии В.Н. Павлинина «Тобольский соболь: Ареал, очерк морфологии, проблема межвидовой гибридизации» [15]. В 1966 г. она была переведена на немецкий язык и вышла в Германии в серии «Новая библиотека Брема» [16]. Эта книга подвела итог большой работы по сбору и обобщению полевых материалов о соболе и кунице на Урале и в Западной Сибири. Брошюра В.Н. Павлинина по новым способам ловли крота, как важного промыслового вида, вышла из печати в 1949 г. в издательстве «Заготиздат» [17]. В.Н. Павлинин был не только специалистом по промысловым млекопитающим, но и хорошим администратором. Ряд лет он занимал должность заместителя директора по науке.

Разумеется, монографии обобщающего плана, выходившие из печати в первые годы существования института, были написаны ранее. В первую

очередь это относится к капитальной коллективной монографии «Леса Урала» [18], изданной в трудах Института биологии совместно со Свердловским областным научно-техническим обществом работников лесной промышленности и лесного хозяйства (ОблНИТОЛЕС) в 1948 г. В предисловии к монографии отдается должное одному из авторов, не дожившему до выхода книги из печати — Н.Н. Глушкову (1869–1946), который внес решающий вклад в ее создание. Он отдал работам на благо уральских лесов всю свою жизнь, с юных лет начав трудиться простым углежогом и закончив кандидатом наук, крупным знатоком теории и практики лесного дела. Редактором книги был профессор Михаил Елевферьевич Ткаченко. Он стал профессором еще в 1919 г. и занимал многие ведущие посты в лесной науке и образовании в стране, являясь руководителем и создателем лесной политики в СССР. По его учебнику «Общее лесоводство» осваивали науку несколько поколений студентов не только нашей страны, так как он был переведен на ряд иностранных языков. Как уже отмечалось, М.Е. Ткаченко, как и ряд других сотрудников Ленинградской лесотехнической академии, работал в г. Свердловске в эвакуации. Следует обратить внимание на то, что книга была подписана к печати 20 июля 1948 г., т.е. почти за месяц до печально знаменитой сессии ВАСХНИЛ, которая развернула необратимые процессы разрушения советской биологии.

Период с конца войны по 1955 г. для биологов всей страны был отмечен работами, нацеленными на мобилизацию всех возможных ресурсов для обеспечения населения продуктами питания, на подъем сельскохозяйственного производства, внедрение в лесное хозяйство приемов скорейшего восстановления лесов после массовых рубок для нужд военного времени. Научно обоснованные планы работ над этими насущными задачами были перечеркнуты и на государственном уровне заменены в 1948 г. нереальными обещаниями немедленных успешных результатов за счет перевода биологии и смежных отраслей знаний на рельсы так называемой мичуринской биологии. В рамках этой системы была уничтожена генетика как идеологически чуждая и классово вредная наука. Практически для созданного Института биологии это означало неоднократную смену руководства, структуры, направлений исследований с усилением прикладной тематики. При этом начатые работы, даже если они имели перспективы принести результат, из-за организационной нестабильности были обречены на неуспех. Так продолжалось до 1955 г., когда в очередной раз работы института подверглись резкой или, точнее сказать, издева-

тельской критике на страницах газеты «Уральский рабочий» — органа Свердловского обкома КПСС. В сентябре там был опубликован фельетон «Пустоцвет». Президиум Уральского филиала АН СССР отреагировал на критику, и директор института биологии д.б.н., профессор В.В. Никольский был уволен.

1955 — год перелома

Сотрудники института, пережившие эти события, вспоминали, что радикальные приверженцы лысенковской линии надеялись занять руководящие должности в институте, так как В.В. Никольский по их мнению недостаточно продвигал в жизнь мичуринскую биологию. Каково же было их разочарование, когда им самим вскоре пришлось покинуть институт вслед за умеренным «лысенковцем» В.В. Никольским, так как назначение на директорский пост досталось человеку, принадлежавшему к совершенно противоположному научному лагерю. Такое назначение повлекло цепь событий с далеко идущими последствиями.

Так 1955 г. становится переломным в истории Института биологии УФАИ СССР. Следующие события привели его к этому перелому:

1. По постановлению Президиума АН СССР от 29 июля 1955 г. директором Института биологии становится молодой д.б.н. С.С. Шварц.
2. В состав института влилась лаборатория биофизики во главе с Н.В. Тимофеевым-Ресовским. Этот коллектив ранее работал в составе предприятия 0215, лаборатория «Б», на оз. Сунгуль (ныне закрытый город Снежинск Челябинской области с предприятием РОСАТОМа).
3. В 1956 г. из г. Владивостока в г. Свердловск переезжает крупный специалист в области лесоведения д.б.н. Б.П. Колесников и возглавляет лабораторию лесоведения в институте.
4. В 1955 г. в институт поступили на работу А.В. Покровский, Г.В. Оленев — фронтовики и выпускники биофака УрГУ, а также Л.Н. Добринский, окончивший МПМИ, и ряд других молодых сотрудников, составивших впоследствии ядро школы академика С.С. Шварца.
5. Новое руководство института провело реорганизацию структуры и состава лабораторий в соответствии с новыми задачами. Ряд лабораторий сельскохозяйственного профиля переведены в другие учреждения.

Если к перечисленным событиям добавить приход в институт в 1958 г. в качестве заведующего лабораторией ботаники д.б.н. П.Л. Горчаковского, то можно с уверенностью отметить, что в таком обновленном виде в институте сформировался костяк кадров высшей квалификации, который был готов к решению самых современных сложных задач. Это касалось общебиологических проблем, микроэволюции и адаптации, экологии и биоценологии, популяционной экологии, радиобиологии наземных и водных экосистем, лесоведения. По каждому из этих разделов фундаментальной науки институт всего за первые десять лет достиг выдающихся результатов и из заурядного провинциального учреждения превратился в первый в СССР Институт экологии растений и животных. Новое наименование было присвоено ему в 1964 г.

Именно в это десятилетие, до отъезда в Обнинск в 1963 г., под руководством Н.В. Тимофеева-Ресовского исключительно продуктивно работала большая группа радиобиологов. Как указывают А.В. Трапезников и П.И. Юшков [19], именно в эти годы защитили кандидатские диссертации И.П. Трегубенко, Д.И. Семенов, Е.И. Преображенская, Н.В. Лучник, Н.А. Порядкова, Е.А. Тимофеева-Ресовская, Н.В. Куликов, Л.С. Царапкин, А.А. Титлянова, В.Г. Куликова, Н.А. Тимофеева. Серьезные трудности возникли с защитой докторской диссертации у Н.В. Тимофеева-Ресовского из-за отсутствия у него документа о высшем образовании. По ходатайству руководства института и Уральского филиала АН СССР ВАК пошел навстречу и сделал исключение, разрешив защиту, которая прошла успешно на Ученом совете при институте в 1964 г. Н.В. Лучник, имевший к тому времени десятки печатных работ в научных изданиях, также не имел вузовского диплома и вынужден был заочно проходить обучение на биофаке УрГУ. Одновременно с пребыванием там в качестве студента он еще и работал преподавателем, обучая студентов вариационной статистике.

К научным достижениям Н.В. Лучника относятся такие выдающиеся на мировом уровне результаты, как исследование хромосомных aberrаций в зависимости от времени после облучения. Он открыл явление репарации повреждений хромосом у высших организмов после облучения: облученные клетки не всегда погибают и с течением времени могут восстанавливаться. Основопологающим для возникновения и развития лучевой терапии стало открытие Н.В. Лучника, занесенное в Государственный реестр под № 277.

Н.В. Лучник впервые в мире открыл возможность снижения смертности млекопитающих посредством воздействия на них определенных веществ после облучения. Обнаружил и исследовал множество противолучевых средств и создал их классификацию. Анализировал закономерности вымирания облученных животных во времени и открыл пики смертности, соответствующие разным конечным причинам гибели. Его математический талант проявился особенно ярко в работах по расшифровке генетического кода. Многогранные таланты Н.В. Лучника отмечены не только в математике, биофизике и генетике, но и в разных гуманитарных областях. Он писал стихи и художественную прозу. Из-под его пера вышли и были изданы крупными тиражами две научно-популярные книги — о генетике «Почему я похож на папу» и радиобиологии «Невидимый современник». За годы работы в нашем институте Н.В. Лучник опубликовал более 50 научных статей. Уехав в г. Обнинск по приглашению директора создаваемого института медицинской радиологии, он сформировал и возглавил там отдел радиационной генетики, где проработал до последних лет жизни.

В этот же институт несколько позже уехала группа сотрудников во главе с Н.В. Тимофеевым-Ресовским. Особо важный итог работы данной группы выразился в издании в трудах института монографии Е.А. Тимофеевой-Ресовской «Распределение радиоизотопов по основным компонентам пресноводных водоемов» [20]. Эта книга была переведена на английский язык и издана в США. Оставшаяся часть коллектива продолжила развивать радиационную биоценологию.

Одним из важнейших направлений работы коллектива под руководством Н.В. Тимофеева-Ресовского в период работы в Институте биологии были летние полевые на стационаре у оз. Б. Миассово в Ильменском заповеднике. Кроме экспериментальных работ по радиоэкологии здесь были организованы лекции и семинары по разнообразной тематике. На эти семинары приезжали специалисты и студенты из Москвы, Новосибирска, Свердловска и других городов [21]: это были биологи, почвоведы, физики, математики — все интересующиеся достижениями современной генетики, эволюционной теории, биоценологии и другими науками. О Миассовских семинарах с восторгами вспоминают все участники как о необычайном научном явлении, повлиявшем на всю их дальнейшую жизнь. Разумеется, лидером и главой всего этого интеллектуального праздника был Н.В. Тимофеев-Ресовский.

В настоящее время в институте работает **лаборатория общей радиоэкологии**, которой много лет руководил А.В. Трапезников. Коллективом этой лаборатории показана специфичность барьерной роли рек, озер, водохранилищ при рассеянии радионуклидов в окружающей среде. Выявлены особенности поведения радионуклидов в природно-территориальных комплексах в пределах Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС), в пойме р. Теча, 30-км зоне Белоярской АЭС.

Другая часть коллектива, работающая под руководством д.б.н. В.Н. Позолотиной в **лаборатории популяционной радиобиологии**, в последние годы достигла выдающихся результатов в исследовании ценопопуляций растений в градиенте радиоактивного загрязнения в зоне ВУРСа. Совокупность данных свидетельствует о высокой нестабильности генома растений в условиях хронического облучения. Выявлены общие закономерности аллозимного полиморфизма у хронически облучаемых популяций растений, которые проявляются в смене доминирования аллелей, увеличении вклада редких аллелей, элиминации некоторых из них, а также в появлении нетипичных форм ферментов. В.Н. Позолотина уверенно ведет современное поколение сотрудников лаборатории по пути, проложенному Н.В. Тимофеевым-Ресовским и его учениками старшего поколения. Желая узнать о жизни и научных делах самых видных из этой плеяды работавших в институте могут прочитать соответствующие мемуары [21, 22].

О научной составляющей и жизни Н.В. Тимофеева-Ресовского и его школы широко известно, а работы другой группы, которой руководил Д.И. Семенов, современные биологи института знают обидно мало. Это легко объяснимо тем, что коллектив Д.И. Семенова исследовал далекие от экологии проблемы: они занимались разработками механизмов действия комплексонов и радиопротекторов на организм млекопитающих.

Уровень, которого достигли исследователи, прибывшие из ликвидированной лаборатории «Б» атомного объекта 0215 на берегу оз. Сунгуль, можно продемонстрировать одним примером. В 1962 г. в журнале «Nature» была опубликована статья Д.И. Семенова и И.П. Трегубенко [23] с единственной аффилиацией Института биологии Уральского научного центра, г. Свердловск. Заметим, что статья была без зарубежных соавторов. На русском языке ее название можно представить так: «Закономерности выведения металлов из организмов при позднем применении комплексонов».

Данная публикация, как вершина айсберга, показывает передовые на мировом уровне разработки лаборатории Д.И. Семенова в области разработки и испытания соединений, связывающих и выводящих из организма те или иные вещества. Значительная часть тематики этой лаборатории была направлена на выведение радионуклидов и была закрытой. Кроме того, здесь же велись работы по радиопротекторам. Дальнейшее развитие института показало, что присутствие в коллективе специалистов, профессионально владеющих статистическими методами и математическим моделированием, а также комплексом знаний и навыков выпускников медицинских и технических вузов, придало большой запас устойчивости коллективу при изменениях тематики исследований. Начавшие работать в лаборатории Д.И. Семенова физик В.С. Безель, медики Н.М. Любашевский, Е.Б. Григоркина и др. после ее закрытия успешно обогатили своими знаниями и опытом экологические работы других подразделений.

Когда институт оказался первым в нашей стране академическим учреждением, в названии которого было слово «экология», его статус существенно вырос. В те годы в массовом сознании и даже в школьных учебниках этого и многих связанных с ним терминов или не было вовсе, или в них вкладывался иной по сравнению с современным смысл. Разумеется, что экология как биологическая дисциплина появилась и оформилась существенно раньше, но идеи, заложенные в популяционную экологию школой С.С. Шварца, отличаются оригинальностью и нацелены на управление природными ресурсами. В яркой и доступной форме эти подходы к изучению популяций были изложены С.С. Шварцем во многих статьях и докладах, а также в небольшой популярной книжке «Ступень к управлению природой», изданной в г. Москве в 1962 г. [24].

Еще одна замечательная научно-популярная книга «Единство жизни» была издана С.С. Шварцем в 1972 г. [25]: в ней сочетаются глубина и оригинальность содержания с доступной формой, там показана сложность структуры живой природы на разных уровнях организации в сочетании с их гармоничным взаимодействием. Важно, что большая часть примеров привлечена автором из собственной научной практики. Эту книгу можно смело рекомендовать и в наши дни читать любому, кто интересуется биологией, но ни с кем не может поговорить об этой науке. С.С. Шварц со страниц «Единства жизни» будет самым компетентным, ярким, умным и красноречивым собеседником. Интеллект и широта знаний академика доступны

каждому, что случается далеко не часто. Печально, что С.С. Шварцу жизнь отпустила короткий срок. Болезнь унесла его в возрасте всего 56 лет. Научное наследие этого замечательного ученого оригинально, обширно и разнообразно, но в его ядре находится учение о популяции.

Внедрение популяционного подхода для исследования широкого круга проблем стало отличительной чертой Уральской экологической школы. Популяционная экология наряду с популяционной генетикой стала источником эволюционных идей во второй половине XX-го столетия. Несомненно, что научные усилия С.С. Шварца привели к распространению среди биологов нашей страны популяционной идеологии. Монография С.С. Шварца «Эволюционная экология животных: Экологические механизмы эволюционного процесса» [26] внесла крупный вклад в развитие эволюционной экологии.

Целенаправленная работа коллектива во главе со С.С. Шварцем позволила разработать метод морфофизиологических индикаторов для позвоночных животных. От впервые высказанной идеи через целую серию шагов, занявших 20 лет, она окончательно оформилась и воплотилась в 1968 г. в монографии С.С. Шварца, В.С. Смирнова и Л.Н. Добринского «Метод морфофизиологических индикаторов в экологии наземных позвоночных» [27]. Этот метод, как следует из его названия, опирался на использование в качестве индикаторов состояния популяций позвоночных животных набора морфологических и физиологических параметров. К числу таких параметров относятся абсолютный и относительный вес тела и основных органов, длина тела и его частей и т.д. Экологическая интерпретация таких величин требует глубокого понимания связи особенностей организма и его частей с состоянием среды, в которой находится исследуемая популяция. Непременным условием использования метода следует считать грамотное применение статистических методов обобщения значительного объема цифровых данных. Все это создавало определенные трудности и накладывало некоторые ограничения на применение метода. Тем не менее со временем значительная часть экологов, умело освоив все тонкости метода морфофизиологических индикаторов, получали уникальные результаты по вскрытию механизмов адаптации тех или иных видов к определенным условиям среды. Естественно, что первые крупные работы такого плана были выполнены сотрудниками института в виде докторских диссертаций.

Существенной вехой в развитии экологических исследований были три монографии, посвященные единой тематике: «Пути приспособления наземных позвоночных животных к условиям существования в Субарктике. Т. 1. Млекопитающие; Т. 2. Птицы; Т. 3. Земноводные» [28–30]. Эти работы, безусловно, были важны сами по себе, но материалы, изложенные в них, послужили основой для крупных теоретических обобщений по проблематике, связанной с эволюционной экологией, микроэволюцией и видообразованием [26, 31]. Последняя монография С.С. Шварца «Экологические закономерности эволюции» [31] была оформлена и сдана в печать уже после смерти автора его близким коллегой и товарищем со студенческих лет Н.Н. Даниловым.

Если просмотреть список публикаций С.С. Шварца за 1960–1970-е годы, то он поражает не только широтой научных интересов. Многие работы настолько глубоки по содержанию, что фактически открывают новые отрасли науки. Так, исследования в области экологии человека затрагивают проблемы факториального, популяционного и биоценотического (биосферного) уровней. Особенность двойственной природы человека с его социальной и биологической составляющей лежала в основе большинства положений С.С. Шварца о взаимодействии человека и биосферы. Катастрофически быстрое расширение влияния человека на природу в наши дни лишь подтверждает верность положений, высказанных выдающимся экологом XX в.

Нельзя умолчать еще об одном направлении работ, которое начинало развиваться в Институте экологии растений и животных под руководством С.С. Шварца. Речь идет о химической экологии и ее части — исследовании эффекта группы в популяциях водных животных. Эта тематика развивалась на протяжении ряда лет группой сотрудников, в которую входили О.А. Пястолова, Г.Г. Рункова, Л.А. Добринская, Л.А. Ковальчук, Н.Л. Иванова, Л.С. Некрасова. Итоги были подведены в коллективной монографии [32]. Обращение к химической экологии связано с давним стремлением экологов к поискам рычагов регуляции численности организмов. Еще на первых этапах развития экологической тематики большое внимание уделялось прогнозированию численности вредителей сельского хозяйства. Не менее актуальной задачей был и остается прогноз численности популяций промысловых животных, составляющих основу охотничьего хозяйства.

К этому же направлению исследований относится идея поисков специфики сезонных генераций у мелких млекопитающих. С учетом этого открываются возможности регуляции и прогноза популяционной динамики. В ее разработке со С.С. Шварцем на первых этапах принимал участие В.Н. Павлинин. Позднее над разными ее аспектами работали А.В. Покровский в рамках экспериментальной экологии и В.Г. Оленев в полевых исследованиях. Позднее существенное развитие тематика получила в работах Г.В. Оленева с его концепцией физиологических функциональных группировок.

Молодые сотрудники следующих поколений, приходившие в институт, как правило, были выпускниками биофака УрГУ и реже других университетов. Нельзя не отметить приход в институт в 1961 г. В.Г. Ищенко, выпускника ЛГУ, ученика П.В. Терентьева, который проработал здесь всю жизнь и внес внушительный вклад в развитие популяционной экологии амфибий [33]. Главной особенностью этих биологов по сравнению со старшими коллегами было то, что они получили образование после господства мичуринской биологии на официальном уровне. Генетику начали преподавать специалисты нового поколения, лишенные клейма менделистов-морганистов или лысенковцев.

Переход к биологии мирового уровня прошел в институте без увольнений и закрытия лабораторий. Начало 1970-х годов было отмечено притоком значительного количества молодежи, пополнившей вновь созданные лаборатории. К этой плеяде свежих сил, достигших впоследствии докторского уровня, можно отнести таких сотрудников, как В.Д. Богданов, И.А. Богачева, А.Г. Васильев, И.А. Васильева, В.Л. Вершинин, М.Г. Головатин, Н.С. Корытин, О.А. Лукьянов, В.Г. Монахов, Л.С. Некрасова, Г.В. Оленев, В.Н. Позолотина, В.Н. Рыжановский, В.К. Рябицев, Н.Г. Смирнов. В этот же период институт получил новый четырехэтажный корпус. В 1980-е годы и позднее приток молодежи продолжался, но институт прирастал не только в своей центральной части. Новый директор д.б.н. В.Н. Большаков при поддержке Уральского отделения РАН создал несколько филиалов со своей тематикой: в 1988 г. в г. Перми был организован Отдел экологии и генетики микроорганизмов; в г. Оренбурге под руководством А.А. Чибилева с 1996 г. начал работать Отдел экологии степных ландшафтов. Оба эти отдела позднее превратились в самостоятельные институты. Из крупных реорганизаций следует указать отделение от института лаборатории лесоведения и Ботанического сада, которые были преобразованы в Институт леса.

В городе Заречном около Белоярской атомной станции был построен комплекс зданий, куда переместились из стационара в Миассово лабораторные установки биофизического отдела. К тому времени всем этим «хозяйством» руководил Н.В. Куликов, а позднее А.В. Трапезников. Из новых зданий институт прирос еще и двухэтажным корпусом на территории Ботсада, который получил наименование «генетико-биологический». Там разместились и до сих пор трудятся сотрудники, которые ведут работы по исследованию влияния промышленных загрязнений на природные системы. Эта так называемая «грязная» экология привлекла к себе внимание не только потому, что металлургическая и горно-рудная промышленность на Урале с давних пор поглощает естественную среду обитания живых существ (и в том числе человека). Исследователи, глубоко погруженные в эту область, убедительно доказали, что прикладная составляющая в «грязной» экологии всего лишь то, что находится на поверхности [34]. Глубокое проникновение в проблематику антропогенной (техногенной) трансформации организмов, популяций и экосистем привело к созданию теоретических основ экотоксикологии. Многостороннее развитие тематики, начатое О.Ф. Садыковым, В.С. Безземлем и Н.М. Любашевским, принимало разные организационные формы.

Современная лаборатория экотоксикологии популяций и сообществ, руководимая д.б.н. Е.Л. Воробейчиком, прочно удерживает лидерство по применению современных методов исследований. Публикации результатов в передовых журналах, авторство монографий и учебников, регулярные защиты докторских и кандидатских диссертаций, получение грантов – вот современный набор достижений сотрудников лабораторий такого уровня. Неудивительно, что туда стремятся попасть работать молодые сотрудники.

Именно этот критерий – рост числа молодых кадров – является самым убедительным и объективным показателем успешности развития той или иной тематики. Вполне естественно, что в разные годы центры притяжения внимания молодежи смещались. Сказываются и «модность» тематики, и возможность быстрого профессионального роста. Иногда важным является притягательность личности руководителя. Для некоторых на каком-то этапе научного развития самым важным становится возможность свободы выбора путей научного поиска. Можно привести несколько примеров, когда какую-то тематику начинал развивать в институте всего один человек. В этих работах в те времена

никто не видел никаких перспектив, но этот человек упорно продолжал развивать начатое дело и выходил на все более высокий уровень результатов. Кто-то так и оставался до конца научной жизни уникальным специалистом-одиночкой. Крайне редко, но бывало иначе. Эта самая узкая специальность вдруг приобретала исключительную значимость, а результаты, казавшиеся ранее частными и маловажными, вышли на обложки самых престижных мировых журналов.

Такое удивительное превращение произошло с С.Г. Шиятовым, который много лет один или с маленьким коллективом в лаборатории ботаники изучал кольцевые приросты деревьев на северной границе лесов и в горах. Кто бы мог подумать, что его результаты оказались ключом к пониманию и прогнозированию динамики мирового климата в пору его глобального резкого изменения? Вот тут-то пригодились его наработки, международные арктические и альпийские кооперации и молодые коллеги. Маленькая группа быстро превратилась в полноценную **лабораторию дендрохронологии**, в которой теперь работают только докторов наук пять человек, у которых уже есть свои ученики. Свою жизненную одиссею С.Г. Шиятов описал в автобиографической повести [3], которую каждый желающий может прочитать, скачав с сайта института. Сотрудники этой лаборатории провели уникальные для мирового уровня работы по построению сверхдлинных дендрохронологических шкал для Ямала длительностью 8768 лет. Р.М. Хантемирову удалось сопоставить отдельные климатические эпизоды с крупнейшими извержениями вулканов. Ряд достижений сотрудников лаборатории опубликованы в журналах высшего уровня.

Вполне естественно, что достижения, полученные дендрохронологическими методами, используются в решении смежных задач. Специальные методики в сочетании с дендрохронологическими применяют сотрудники недавно созданной **лаборатории геоинформационных технологий** под руководством д.б.н. П.А. Моисеева. В ней проводится изучение климатогенной динамики наземных экосистем и связанных с ней изменений их продуктивности. В различных регионах Урала и Субарктики изучается влияние климатических факторов на ростовые процессы и возобновление доминирующих древесных и кустарниковых видов, а также изменения состава, структуры, фитомассы и пространственного распределения в переходных зонах лес—горная тундра и лес—горная степь.

Примеры исключительного трудолюбия, увлеченности и профессионализма можно приводить как на работах, которые проведены в одиночку или в коллективах.

В лаборатории **экологии птиц и наземных беспозвоночных** (руководитель — д.б.н. М.Г. Головатин) работают два выдающихся «одиночки» — П.Ю. Горбунов и В.К. Рябицев. Не будет преувеличением отметить, что любому орнитологу нашей страны прекрасно известно имя д.б.н. В.К. Рябцева как автора многочисленных определителей птиц. Их выдающееся качество достигнуто автором благодаря тому, что каждая птица нарисована лично им. Сделано это с величайшей тщательностью при соблюдении тонких оттенков цвета и морфологическими подробностями, учитывающими возрастные и половые вариации. Выдающиеся знания орнитолога в одном человеке уникально переплелись с талантом художника-анималиста. Кроме определителей, сотрудники этой лаборатории — М.Г. Головатин, С.П. Пасхальный, В.К. Рябицев и В.Н. Рыжановский — создали капитальные монографии о птицах самых труднодоступных северных территорий — Полярного Урала [35], Ямала и Приобской лесотундры [36, 37].

Удивительные открытия в мировой энтомологии постоянно совершает П.Ю. Горбунов. Он работает в экспедициях преимущественно в Казахстане и других южных регионах и привозит оттуда насекомых, до того не известных науке. Самое впечатляющее событие произошло недавно, когда он открыл новое семейство мотыльков. Подобного уровня находка является буквально сенсационной. Для нашего века открытие нового таксона такого уровня — уникальный факт в биографии ученого, а для института, где работает энтомолог, — предмет гордости.

Тематика лаборатории **филогенетики и биохронологии** частично смыкается с таковой в **лаборатории палеоэкологии**. Ранее обе эти лаборатории работали в едином коллективе — сначала в составе группы исторической экологии, а затем в лаборатории с таким названием под руководством Н.Г. Смирнова. Его путь в науку был начат под руководством В.Н. Большакова в лаборатории экологических основ изменчивости организмов в 1973 г. С этого времени по инициативе Н.Г. Смирнова в институте было начато изучение ископаемых и субфоссильных млекопитающих с целью исследования динамики фауны в плейстоцене и голоцене и эволюции морфологических признаков. Поиски, разведка и раскопки местонахождений костных остатков

с тех пор регулярно проводились совместно с археологами и геологами Уральского и Западно-Сибирского регионов. Успешное накопление палеозоологических и палеоботанических данных привело к обобщению в виде монографий, статей, кандидатских и докторских диссертаций коллектива, который ныне работает в нескольких лабораториях института и в других городах Уральского региона. Фактически к нашему времени речь может идти о формировании Уральской школы палеоэкологов. Заметным достижением послужила коллективная монография группы европейских и российских исследователей, в которую вошли три автора из лаборатории палеоэкологии института («Эволюция экосистем Европы ...») [38].

Лаборатория филогенетики и биохронологии (зав. лаб. д.б.н. А.В. Бородин) проводит комплексное изучение эволюционных преобразований фаун грызунов, птиц, насекомых и растительности по палеонтологическим сборам из отложений плейстоцена и голоцена. В методическом арсенале лаборатории имеются морфологические, цитогенетические и молекулярные исследования. К выдающемуся достижению А.В. Бородина следует отнести его деятельность в качестве члена комиссии по четвертичной системе МСК. Признанием его международного авторитета послужило то, что он выступил в качестве сопредседателя организационного комитета и члена научного комитета международной конференции INQUA-SEQS «Четвертичный период Урала: Глобальные тенденции и их отражение в общеевропейской четвертичной летописи» (2014).

Пример выдающихся результатов демонстрируют публикации к.б.н. П.А. Косинцева из лаборатории палеоэкологии (зав. лаб. к.б.н. Т.В. Струкова). За последние несколько лет он в составе международных коллективов, численность которых варьирует от нескольких специалистов до нескольких десятков из многих стран, опубликовал более десяти статей в двух самых престижных научных журналах — «Nature» и «Science». Разумеется, эти выдающиеся публикации сопровождаются и другими работами в специализированных журналах, монографиях и других изданиях, которых у данного автора с 1981 г. по 2024 г. насчитывается почти восемьсот. Каждый научный работник, пишущий труды по результатам своих исследований, способен оценить такую производительность труда. Тематика исследований сотрудников лаборатории палеоэкологии касается преимущественно млекопитающих плейстоцена и голоцена. Исследуются разнообразные аспекты временной динамики состава и структуры фаун под

воздействием изменений климата и деятельности человека. Материалы для этих работ добываются в процессе раскопок в карстовых полостях и из археологических памятников.

Следует привести примеры признания на самом высоком международном уровне результатов работ не просто сотрудников института, а коллектива **лаборатории динамики арктических экосистем**, живущих и работающих в Арктическом стационаре в г. Лабытнанги. Большая их часть выполнена коллективными усилиями под руководством к.б.н. А.А. Соколова с привлечением зарубежных коллег. Все они касаются арктической тематики. За последние десять лет опубликовано более 50 статей, среди которых большая часть в самых высокорейтинговых экологических журналах. Предметом гордости служат статьи в «Nature» и «Science», да еще и с иллюстрациями из их статей, вынесенными на обложку.

Первые поколения сотрудников стационара в г. Лабытнанги провели множество экспедиций на Ямале и Полярном Урале. Некоторые из этих маршрутов стали настоящими легендами, например переход В.Ф. Сосина и В.С. Балахонova вокруг Ямала на моторной лодке за одну навигацию. Подчеркнем, что это был не просто путь из одной точки в другую, а настоящая результативная экспедиция по изучению млекопитающих и птиц. К разряду арктических путешествий, в которых сочетался сбор уникальных научных данных с преодолением стихий, следует отнести несколько рейсов парусно-моторной яхты «Флора» с экипажем из сотрудников института под предводительством Л.Ф. Семерикова, а позднее В.Л. Семерикова.

Стационар в г. Лабытнанги служил базой для биологов из нашего и других институтов, но о таких результатах, какие получены молодыми сотрудниками за последние годы, ранее никто и не мечтал. Справедливости ради следует отметить, что условия для экспедиционной работы в 1960-е и 1970-е годы невозможно сравнивать с современными, как и те тяготы, которые приходилось выносить полевикам на Ямале еще раньше. Кто может провести такое сравнение на личном опыте, так это директор стационара к.б.н. В.Г. Штро. Он руководит им с 1993 г., а начал работать там с 1972 г. Арктика остается суровым краем и в период глобального потепления, так что нужно отдать должное ее исследователям, особенно тем, кто не только приезжает туда для работы на несколько летних недель, но связал с ней свою жизнь и жизнь своих семей.

Помимо работников стационара, полевые работы на Севере круглогодично проводят сотрудники **лаборатории экологии рыб и биоразнообразия водных экосистем**. Ее сотрудники во главе с членом-корреспондентом РАН В.Д. Богдановым за последние годы получили выдающиеся результаты. Их достижения опираются на фундамент, заложенный многолетними разносторонними исследованиями биологии рыб Обского бассейна. Один из основополагающих трудов — определитель личинок сиговых рыб — выполнен В.Д. Богдановым [39]. Этот труд открыл возможности для изучения репродукционных процессов у сигов на принципиально более высоком уровне, чем ранее. Перепромысел самых ценных видов из этой группы рыб привел их на грань исчезновения до такой степени, что потребовались государственные меры для поисков путей восстановления их поголовья. По поручению Президента РФ в РАН была разработана научно обоснованная В.Д. Богдановым специальная программа. В этой программе учтены все важнейшие гидрологические, гидробиологические и иные факторы, от которых зависит восстановление поголовья муксуна, чира, нельмы. В основу мероприятий положены степень утраты нерестилищ и реальность их восстановления в разных частях Обь-Иртышского бассейна. Программа прошла существенные этапы согласования с Президентом РАН, губернаторами соответствующих регионов и руководством Федерального агентства по рыболовству. Эта работа, вобравшая основные достижения фундаментальных исследований экологов, имеет беспрецедентно высокий государственный уровень востребованности.

Лаборатория биоразнообразия растительного мира и микобиоты (зав. лаб. д.б.н. Д.В. Веселкин) ведет начало от лаборатории ботаники, созданной П.Л. Горчаковским. Он сформировал большой коллектив и по праву считается главой Уральской школы ботаников. Под его руководством защищено 14 докторских и более 50 кандидатских диссертаций, а в списке трудов числится 461 печатная работа, среди которых 27 монографий. Тематика этих работ разнообразна. В списке его трудов указаны следующие разделы: общие проблемы экологии, экология растений, растительность, фитоценология, лесоведение и дендрология, луговое ведение, растительность высокогорий, растительность степей, география и картография, история растительности, историческая фитогеография, растительные ресурсы, антропогенные изменения, охрана и мониторинг растительного мира, история ботаники, вопросы биологического образования, краеведение, эндемы, реликты, редкие растения.

После П.Л. Горчаковского руководство лабораторией принимали на себя М.А. Магомедов и В.А. Мухин. В настоящее время в лаборатории трудится 9 научных сотрудников, специализирующихся в разнообразной тематике, которые продолжают традиционные направления и открывают новые. Среди последних следует отметить солидный блок микологических исследований, включающий экологию, таксономию и физиологию грибов. В этих работах занято 5 сотрудников во главе с профессором, «Заслуженным деятелем науки» д.б.н. В.А. Мухиным. Он же является председателем Екатеринбургского отделения Русского ботанического общества. Заметное место в тематике занимало изучение микориз. Д.В. Веселкин защитил докторскую диссертацию на тему «Морфологическая изменчивость и адаптивное значение эктомикориз хвойных (*Pinaceae* Lindl.)». С тех пор, как лабораторию возглавил профессор РАН Д.В. Веселкин, в ее тематике появились и вышли на высокий уровень исследования по проблеме видов-вселенцев. Помимо традиционного изучения флоры и растительности городской среды, ведутся работы с использованием стабильных изотопов азота.

Исследования ботанического профиля ведут сотрудники **лаборатории молекулярной экологии растений** под руководством д.б.н. В.Л. Семерикова. С помощью анализа аллозимов, секвенирования хпДНК и мтДНК были исследованы пути расселения серии древесных видов в Северной Евразии, филогенетика, гибридное видообразование у ряда видов.

Видное место занимают исследования в области популяционной биологии растений, включая работы по популяционной генетике, систематике, филогенетике, филогеографии, по изучению генетических основ адаптации хвойных.

Лабораторией эволюционной экологии в настоящее время руководит д.б.н. А.Г. Васильев. В этой должности он является преемником академика В.Н. Большакова, который продолжает работать в коллективе. Только за последние пять лет опубликованы 12 монографий, посвященных теоретическим вопросам эволюционной биологии. Вот такая краткая аннотация деятельности лаборатории приведена на сайте института: «Лаборатория изучает эволюционно-экологические закономерности изменчивости и морфообразия популяций и сообществ животных, микроэволюционные и быстрые морфогенетические перестройки в измененной среде, структурно-функциональную организацию и устойчивость горной биоты, эколого-физиологические адаптации животных,

демографию, динамику численности и распространение грызунов, рукокрылых, насекомоядных млекопитающих, а также моллюсков, пиявок, чешуекрылых и двукрылых на Урале».

Две лаборатории — **популяционной экологии**, которой руководит д.б.н. Г.В. Оленев, и **функциональной экологии наземных животных** под началом д.б.н. В.Л. Вершинина — ведут свои истоки от коллектива зоологов под руководством С.С. Шварца.

Главные достижения лаборатории популяционной экологии связаны с изучением роли экологических факторов в процессах функционирования популяций цикломорфных млекопитающих на основе разработанной в лаборатории концепции функционально-онтогенетического подхода.

Исследования лаборатории функциональной экологии наземных животных сосредоточены на изучении устойчивости и функционировании экологических систем в естественных и антропогенно-трансформированных условиях. Основная цель — исследование функциональной специфики наземных животных Урала (преимущественно земноводных) в зонально-климатическом, ландшафтном и антропогенном градиентах.

В результате преобразования структуры института в 2015 г. была образована **лаборатория экологии охотничьих животных** (руководитель — д.б.н. Н.С. Корытин). Истоки этого коллектива уходят к работам зоологов первого поколения — С.С. Шварца и В.Н. Павлинина. Хотя в настоящее время охота на промысловых зверей и птиц утратила прошлое экономическое значение, но изучение биологических особенностей этой части животного мира остается актуальным по многим причинам. Особенно важно изучение популяционной экологии охотничьих животных, воздействие охоты на популяции, виды и трансформации местообитаний и изучение трофических связей. Эти исследования ведутся с целью понимания адаптационных возможностей видов, находящихся под прессом дополнительного фактора смертности. Важнейший аспект работ связан с подготовкой рекомендаций по рациональному ведению охотничьего хозяйства.

В 2018 г. была образована **лаборатория проблем сохранения биоразнообразия и ООПТ** (зав. лаб. д.б.н. М.С. Головатин). Эта лаборатория возникла не на пустом месте. Она имела не только солидный задел, но и заметный кадровый потенциал из молодых сотрудников, владеющих современными методами исследований. Каждый год сотрудники института

издают коллективные монографии о состоянии ООПТ разных категорий в Свердловской области.

Даже краткий обзор исследований, проводимых в современных лабораториях института, показывает, что работы ведутся широким фронтом по разнообразной фундаментальной и прикладной тематике. Она охватывает как традиционные для института направления, так и новейшие, возникшие в качестве ответа на вызовы острых проблем современной экологической ситуации. Есть работы, которые, казалось бы, удивительным образом оказались среди тематики Института экологии растений и животных. Так, на протяжении ряда лет группа сотрудников под руководством к.б.н. И.А. Кузнецовой отслеживает последствия падения на Северном Урале отделяющихся частей ракет-носителей «Союз». Эти работы получили высокую оценку руководства Роскосмоса.

Нельзя не отметить, что положение института, как и любого учреждения РАН, существенно изменилось после преобразований, связанных с переподчинением институтов из РАН сначала в Федеральное агентство научных организаций, а затем в Министерство науки и высшего образования РФ. Те или иные организационные и финансовые трудности всегда сопровождали научные исследования, но благодаря четкой работе научно-вспомогательных структур с профессиональным персоналом их удавалось преодолевать. Последние годы, помимо привычных управленческих органов, свою положительную роль играет научный руководитель института (ныне — член-корр. РАН В.Д. Богданов). Совет по защитах диссертаций принимает соискателей кандидатских и докторских степеней. На базе института работают редакции журналов «Экология» и «Фауна Урала и Сибири», ряд научных обществ. С каждым годом прирастают сборы музея, в котором сейчас насчитывается более 1.5 млн единиц хранения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Круглая дата в жизни Института экологии растений и животных УрО РАН дала повод оглянуться на пройденный за 80 лет путь, сравнить жизнь и условия работы в разные годы. Многое менялось. Изменилась страна, изменилась Академия наук. Исчезла Академия наук СССР, но появилась Российская академия наук. Совсем иной стала организация науки в регионах, и в частности на Урале. Тяжелые последствия для науки пришлось пережить не только генетикам, но и всем биологам и работникам сельскохозяйственной науки за несколько десятилетий господства мичуринской

биологии. Регион пережил ядерную катастрофу, которая оставила за собой Восточно-Уральский радиоактивный след. Работы на ВУРСЕ до сих пор интенсивно ведут несколько лабораторий.

Все годы существования институт уделял большое внимание изучению Арктики и Субарктики, но аспекты этого внимания существенно менялись. После открытия и освоения крупнейших месторождений нефти и газа на Ямале и в Сургутском Приобье экологическая обстановка там потребовала особого внимания. Критическое состояние оленьих пастбищ на Ямале — еще один объект исследований современных экологов. Динамика экосистем Арктики и Субарктики под воздействием меняющегося климата — важная тема изучения ботаников, зоологов и дендрохронологов.

Принципиально изменились за последние несколько десятилетий системы ценностей по отношению к живой природе и ее ресурсам. Вместо деления видов на полезные и вредные появилось понятие о биоразнообразии и необходимости его сохранения. Все эти и другие экологические парадигмы сформировались не сами по себе, а благодаря созданию экологического взгляда на природу и оценке места в ней человека. Одним из проводников экологического мышления в нашей стране по праву считают академика С.С. Шварца и его научную школу.

К счастью, сохранились воспоминания ветеранов этой школы, которые рассказывали, как 12 апреля 1961 г. во время первой молодежной конференции ее спокойный ход прервал взволнованный С.С. Шварц сообщением о том, что советский человек Ю.А. Гагарин совершил первый космический полет. Упомянуть об этом событии необходимо для понимания того, на каком фоне шло развитие молодой науки экологии, и это развитие продвигали С.С. Шварц, еще не академик, а всего лишь доктор наук 42 лет и его молодые помощники.

В наше время, т.е. в 20-е годы XXI в., проходит новая волна омоложения коллектива института. Значительно выросло количество аспирантов, желающих обучаться в институте по одной из трех специальностей: экология, ботаника, зоология. Создано несколько молодежных лабораторий, на государственном уровне молодые сотрудники получают специальные гранты, льготное жилье и молодежные премии. Еще одной из характерных особенностей этого поколения является выход в общественное пространство для популяризации не

только своих достижений, но и широких научных знаний. Большие возможности дает в этом деле сайт института и страницы в социальных сетях.

5 марта 2024 г. сайт института в разделе «Наши новости» поместил следующую информацию: «А.А. Соколов выступил на Всемирном фестивале молодежи. На федеральной территории «Сириус» в эти дни проходит всемирный фестиваль молодежи. ... По приглашению Дирекции фестиваля и Координационного совета по делам молодежи в научной и образовательной сферах Совета при Президенте Российской Федерации заведующий лабораторией динамики арктических экосистем Александр Соколов выступил спикером на двух сессиях: «Вымирающий вид. Основные проблемы сохранения биологического разнообразия» и «Климатические исследования: шанс сохранить планету для будущих поколений». Одновременно со Всемирным фестивалем молодежи, т.е. в конце зимы 2024 г., в залах трех музеев г. Екатеринбург были представлены экспозиции о научном и художественном творчестве выдающихся сотрудников института.

Все упомянутые приметы новых времен с их широким внедрением экологии в жизнь всех слоев российского населения, с упрочением биологии как важнейшей науки XXI в. оправдывают многие прогнозы тех мудрых патриархов, чьи портреты не только встречают нас на входе в институт, но и провожают и молодых, и пожилых — всех, отправляющихся в экспедиции за новыми открытиями или просто за пополнением музейных и гербарных коллекций. Будем надеяться, что очередные десятилетия институт не просто будет жить, но и развиваться, как и вся Российская академия наук, перешагнувшая рубеж 300-летия.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 122021000095-0 Института экологии растений и животных УрО РАН.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уральская экологическая школа: вехи становления и развития / Отв. ред. Н. Г. Смирнов. Екатеринбург: Гощицкий, 2005. 264 с.
2. *Мамаев С.А.* Полвека в ботаническом раю: очерки истории Ботанического сада на Урале. Екатеринбург: Ривера, 2005. 352 с.
3. *Шиятов С.Г.* Хронология моей жизни и научной деятельности. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2022. 156 с.
4. *Смирнов Н.Г.* Истоки биологии на Урале: В.Н. Татищев и землепроходцы. Екатеринбург: Лисица, 2023. 102 с.
5. *Зорина Л.И.* Уральское общество любителей естествознания. 1870–1929. Екатеринбург: Банк культурной информации, 1996. Т. 1. 208 с.
6. *Большаков В.Н., Колосова Е.Н.* Первое десятилетие (1944–1955 гг.) // Уральская экологическая школа: вехи становления и развития. Екатеринбург: Гощицкий, 2005. С. 29–40.
7. *Колосова Е.Н.* Василий Иванович Патрушев: известный и неизвестный. Документальная повесть. Екатеринбург–Сургут: Магеллан, 2008. 208 с.
8. *Ширяев А.Г., Ширяева О.С., Змитрович И.В., Ерохин Н.Г.* Памяти Зинаиды Афанасьевны Демидовой (1894–1985) // Микология и фитопатология. 2023. Т. 57(6). С. 462–466.
9. *Корытин С.А., Игнатиев В.А.* Храм Дианы на Пехре. К истории охотоведения в России. Киров: ООО «Альфа-Ком», 2006. 552 с.
10. Материалы чтений памяти выдающегося уральского териолога А.В. Покровского: К 90-летию со дня рождения. Екатеринбург: Гощицкий, 2013. 164 с.
11. *Ищенко В.Г.* «Я готов грузить камни» // Академик С.С. Шварц: Материалы к биографии, воспоминания. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. С.89–97.
12. *Данилов Н.Н., Павлинин В.Н., Шварц С.С.* Изучение животного мира родного края: Пособие для учителей средних школ. М.: Учпедгиз, 1958. 236 с.
13. *Павлинин В.Н., Шварц С.С.* Борьба с грызунами в парниках и теплицах // Пути повышения урожаев овощей, картофеля и плодов. Свердловск, 1954. С. 74–76.
14. *Шварц С.С., Павлинин В.Н.* Звероводство в колхозе им. С.М. Кирова Пышминского района Свердловской области // Пушное звероводство в колхозах РСФСР. М.: Госкультпросветиздат, 1955. С. 68–72.
15. *Павлинин В.Н.* Тобольский соболь: Ареал, очерк морфологии, проблема межвидовой гибридизации / Отв. ред. С.С. Шварц. Свердловск: УФАН СССР, 1963. 111 с. (Труды Института биологии УФАН СССР. Вып. 34).
16. *Pawlinin W.N.* Der Zobel (*Martes zibellina* L.). Wittenberg (Lutherstadt): Ziemsen, 1966. 102 p.
17. *Павлинин В.Н.* Новые способы промысла крота. М.: Заготиздат, 1949. 22 с.
18. *Глушков Н.Н., Долбилин И.П., Венгеров В.И., Тимашев Ф.С.* Леса Урала / Под. ред. М.Е. Ткаченко. Свердловск: Урал. филиал АН СССР, 1948. 230 с.
19. *Трапезников А.В., Юшков П.И.* Из истории отдела континентальной радиоэкологии // Уральская экологическая школа: Вехи становления и развития. Екатеринбург: Гощицкий, 2005. С. 111–133.
20. *Тимофеева-Ресовская Е.А.* Распределение радиоизотопов по основным компонентам пресноводных водоемов / Отв. ред. Н.В. Лучник. Свердловск, 1963. 76 с.
21. Н.В. Тимофеев-Ресовский на Урале. Воспоминания / Составитель В. Куликова. Екатеринбург: Екатеринбург, 1998. 160 с.
22. *Лучник Н.В.* Вторая игра. М.: Компания Спутник+, 2002. 336 с.
23. *Semenov D.I., Tregubenko I.P.* Regularities of metal excretion from organisms on late application of complexions // Nature. 1962. V. 193. P. 391–392.
24. *Шварц С.С.* Ступень к управлению природой (Об изучении популяций высших животных). М.: Знание, 1962. 40 с.
25. *Шварц С.С.* Единство жизни. Свердловск: Средне-Уральское кн. изд-во, 1972. 100 с.
26. *Шварц С.С.* Эволюционная экология животных: Экологические механизмы эволюционного процесса. Свердловск, 1969. 199 с. (Труды Института экологии растений и животных / АН СССР. Уральский филиал. Вып. 65.)
27. *Шварц С.С., Смирнов В.С., Добринский Л.Н.* Метод морфофизиологических индикаторов в экологии наземных позвоночных. Свердловск: Уральский фил. АН СССР, 1968. 387 с. (Труды Института экологии растений и животных / АН СССР. Уральский филиал. Вып. 58.)
28. *Шварц С.С.* Пути приспособления наземных позвоночных животных к условиям существования в Субарктике. Т. 1: Млекопитающие. Свердловск: Уральский фил. АН СССР, 1963. 133 с. (Труды Института экологии растений и животных. Вып. 33.)
29. *Данилов Н.Н.* Пути приспособления наземных позвоночных животных к условиям существования в Субарктике. Т. 2: Птицы / Отв. ред. С.С. Шварц. Свердловск: УФАН СССР, 1966. 146 с. (Труды Института биологии УФАН СССР. Вып. 56.)
30. *Шварц С.С., Ищенко В.Г.* Пути приспособления наземных позвоночных животных к условиям существования в Субарктике. Т. 3: Земноводные. Свердловск: УФАН СССР, 1971. 58 с. (Труды Института экологии растений и животных. Вып. 79.)
31. *Шварц С.С.* Экологические закономерности эволюции. М.: Наука, 1980. 279 с.
32. *Шварц С.С., Пястолова О.А., Рункова Г.Г., Добринская Л.А.* Эффект группы в популяциях водных животных и химическая экология. М.: Наука, 1976. 152 с.
33. *Ананьева Н.Б., Оленев Г.В., Куранова В.Н., Паевский В.А.* Владимир Георгиевич Ищенко (1938–2021) – памяти

- екатеринбургского петербуржца // Современная герпетология. 2023. Т. 23. Вып. 34. С. 169–180.
34. Воробейчик Е.Л. «Грязная экология» в ИЭРИЖ // Уральская экологическая школа: вехи становления и развития. Екатеринбург: Гощицкий, 2005. С. 175–217.
 35. Головатин М.Г., Пасхальный С.П. Птицы Полярного Урала / Науч. ред. В.К. Рябицев. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2005. 560 с.
 36. Рябицев В.К., Рыжановский В.Н. Птицы полуострова Ямал и Приобской лесотундры. Т. 1: Неворобьиные. М.; Екатеринбург: Кабинетный ученый, 2022. 624 с.
 37. Рябицев В.К., Рыжановский В.Н. Птицы полуострова Ямал и Приобской лесотундры. Т. 2: Воробьинообразные. М.; Екатеринбург, 2022. 392 с.
 38. Эволюция экосистем Европы при переходе от плейстоцена к голоцену (24–8 тыс. л.н.): Коллективная монография (*Evolution of the European Ecosystems during Pleistocene – Holocene transition (24–8ky)*) / Отв. ред.: А.К. Маркова, Т. ван Кольфсхотен. М.: Тов-во научных изд. КМК, 2008. 556 с.
 39. Богданов В.Д. Морфологические особенности развития и определитель личинок сиговых рыб р. Оби. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 1998. 55 с.

80 YEARS OF INSTITUTE OF PLANT AND ANIMAL ECOLOGY OF URAL BRANCH RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES: THE WAY OF THE URAL INSTITUTE OF BIOLOGY TO MODERN ECOLOGY

N. G. Smirnov

Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Russia 620144 Ekaterinburg

e-mail: nsmirnov@ipae.uran.ru

Abstract — The article presents the main events in the history of the Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, which will celebrate its 80th anniversary in 2024. The main attention is paid to the changes in the research topics. In the 40's and 50's it was closely associated with the tasks assigned to the Institute in relation to the requirements of the post-war national economy. Since 1955, in connection with the direction of the Institute by S.S. Schwartz and the renewal of the staff, a period of reorganisation of the subjects began, which led to the transformation of the Institute of Biology into the Institute of Plant and Animal Ecology. In the same year, research into radiobiology and population studies began. A new period of history began after V.N. Bolshakov became the director of the Institute in 1976. Several branches of the Institute were established, the number of staff increased and the scope of research broadened. Recent decades have been characterised by the mass arrival of young staff, the organisation of new laboratories and the increase in the number of publications in the most prestigious international journals.

Keywords: Institute of Plant and Animal Ecology, ecology, botany, zoology, ecotoxicology, radioecology, ichthyology, dendrochronology, mycology, quaternary paleoecology

УДК 504.5:621.039:581(470.55)

КОЭФФИЦИЕНТЫ ПЕРЕХОДА ^{90}Sr У ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ЯДЕРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

© 2024 г. Л. Н. Михайловская^a, В. Н. Позолотина^{a, *}, З. Б. Михайловская^a

^aИнститут экологии растений и животных УрО РАН,

Россия 620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202

*e-mail: pozolotina@ipae.uran.ru

Поступила в редакцию 25.04.2024 г.

После доработки 25.05.2024 г.

Принята к печати 26.05.2024 г.

Обобщены данные о вариабельности коэффициентов перехода (КП) ^{90}Sr у разных видов древесных растений, произрастающих в зоне влияния производственного объединения “Маяк”. Радиоэкологическая ситуация на этой территории определяется в основном двумя событиями: сбросом радиоактивных отходов в р. Течу (1949–1951 гг.) и Кыштымской аварией (1957 г.). Проанализированы основные причины изменчивости КП, включая видовые особенности растений, разные режимы увлажнения почв и уровень их загрязнения ^{90}Sr . Зависимость КП этого радионуклида у деревьев от плотности загрязнения почв описывается степенной функцией. На буферных территориях и фоновых участках КП ^{90}Sr соответствуют диапазонам изменчивости показателя, установленным МАГАТЭ, а на более загрязненных импактных участках показатели накопительной способности у деревьев, как правило, снижаются.

Ключевые слова: Кыштымская авария, Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС), река Теча, ^{90}Sr , коэффициент перехода (КП) (aggregated transfer factor – T_{ag}), почва, древесные растения

DOI: 10.31857/S0367059724050025 EDN: WCHPEW

Изучение миграционных потоков радионуклидов в природных экосистемах требует оценки накопительных возможностей основных ее компонентов. Значения коэффициентов перехода радионуклидов из почв в растения очень важны для прогнозирования уровней загрязнения конкретных видов, а также связанных с ними звеньев биогеохимических цепей в загрязненных экосистемах. Первоначально в радиоэкологии базовое предположение заключалось в том, что перенос радионуклидов из почвы в растения описывается положительной линейной зависимостью при определенных условиях среды [1]. Дальнейшие исследования [2–5] показали, что накопление радионуклидов растениями зависит от их видовых особенностей и комплекса экологических факторов, главным образом от типа почв, уровня осадков и температуры.

Анализ литературных данных выявил фрагментарность информации по разным таксонам, преобладание исследований с небольшим числом точек отбора в пределах конкретных районов. Кроме того, нет единства в представлении материалов – в разных работах для оценки накопления радионуклидов использованы разные критерии:

удельная активность образцов растений без связи с уровнями загрязнения почв, коэффициенты накопления, коэффициенты перехода, которые невозможно сравнивать.

В настоящее время появились работы [6–9], в которых показан нелинейный характер зависимости переноса радионуклидов из почвы в растения. Эта закономерность важна для моделирования процессов переноса радионуклидов по пищевым цепочкам и разработки контрмер [5]. Таким образом, противоречивые данные о диапазонах изменчивости факторов переноса радионуклидов из почв в растения и разные суждения о причинах, обуславливающих высокое разнообразие коэффициентов перехода, стимулируют продолжение исследований на эту тему.

Зона влияния ядерного предприятия (производственное объединение (ПО) “Маяк”) характеризуется большим разнообразием ландшафтов и почв, высоким флористическим и ценотическим богатством, широким градиентом радиоактивного загрязнения. Она является уникальным природным полигоном для исследований в области радиоэкологии, в частности для анализа причин

изменчивости КП радионуклидов в растения. В качестве реперного радионуклида был выбран ^{90}Sr — основной загрязнитель зоны, возникшей в результате Кыштымской аварии на предприятии в 1957 г. Данных об этом радионуклиде в научной литературе значительно меньше, чем о ^{137}Cs , который является основным загрязнителем зон аварии на Чернобыльской и Фукусимской АЭС [10].

Цель данной работы — оценить диапазоны изменчивости коэффициентов перехода ^{90}Sr у разных видов древесных растений и выявить основные причины этой изменчивости, включая видовые особенности растений, режимы увлажнения почв, а также уровни плотности загрязнения почв в зоне влияния ПО “Маяк”.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Характеристика района исследования

ПО “Маяк” — одно из крупнейших ядерных предприятий России — было создано в 1948 г. Оно расположено в лесостепной зоне Южно-Зауральской провинции вблизи г. Кыштым (рис. 1). Климат умеренно континентальный, с продолжительной и холодной зимой (средняя температура января — $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$) и теплым, часто засушливым летом (средняя температура июля $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$). Среднегодовое количество осадков составляет 400–500 мм. В почвенном покрове преобладают различные подтипы серых лесных почв, черноземов и буроземов [11, 12]. В депрессивных формах рельефа (озерных понижениях, поймах рек, заболоченных пространствах) развиты дерновые, лугово-слоистые и лугово-болотные почвы разной степени оглеенности и оторфованности [12]. Все почвы реперных участков характеризуются слабокислым или нейтральным значением pH. Содержание гумуса в верхнем корнеобитаемом слое серых и темно-серых лесных почв составляет 22.0–30.4%, в черноземах — 5.1–13.9%, в буроземах — 7.5–7.8%, а содержание обменного Ca^{+2} — 13.0–93.6, 23.0–44.0 и 18.2–20.0 мг-экв/100 г соответственно. Дерновые и лугово-слоистые почвы характеризуются содержанием гумуса 5.7–8.1%, обменного Ca^{+2} — 19.2–37.3 мг-экв/100 г [12, 13].

В течение всего периода деятельности ПО “Маяк” прилегающие территории подвергались загрязнению аварийными и штатными выбросами техногенных радионуклидов, а также водными аэрозолями, сдуваемыми с промышленных водоемов [14, 15]. Радиоэкологическая ситуация в зоне влияния предприятия в хронологическом порядке

определяется в основном двумя событиями: сбросом радиоактивных отходов в р. Течу (1949–1951 гг.) и Кыштымской аварией (1957 г.).

Река Теча вытекает из оз. Иртяш, принадлежит к крупнейшей в Западной Сибири Обь-Иртышской речной системе, ее протяженность составляет 240 км. В период 1949–1952 гг. было сброшено 76 млн м^3 отходов общей радиоактивностью 10^{17} Бк, среди которых долгоживущие радионуклиды ^{90}Sr и ^{137}Cs составляли соответственно 11.6 и 12.2% [16]. В 1951–1964 гг. в верховье р. Течи был построен каскад искусственных водохранилищ, ограничивших поступление радионуклидов в реку. В настоящее время источником поступления радионуклидов в реку во время весеннего половодья являются Асановские болота, расположенные в верховье. С учетом радиоактивного распада запас ^{90}Sr в пойме р. Течи оценивается в 4.5×10^{12} Бк. Максимальная плотность загрязнения пойменных почв ^{90}Sr составляет 928 кБк/ м^2 , показатели снижаются с увеличением расстояния от источника загрязнения [17].

Восточно-Уральский радиоактивный след сформировался 29 сентября 1957 г. в результате взрыва емкости с радиоактивными отходами на ПО “Маяк”. Эта так называемая Кыштымская авария по международной шкале ядерных событий относится к 6-му уровню, уступая лишь авариям на АЭС в Чернобыле и Фукусиме, получившим статус 7-го уровня [18]. Общий выброс радионуклидов оценивался в 7.4×10^{17} Бк, из них около 10% поднялось в атмосферу и, выпадая из облака, загрязнило территорию площадью 23 000 км^2 (см. рис. 1).

В выпадениях преобладали короткоживущие радионуклиды, а из долгоживущих изотопов наибольший вклад в загрязнение зоны внес ^{90}Sr [19, 20]. В настоящее время интегральные запасы ^{90}Sr в почвах ВУРСа составляют по разным источникам $(2.1\text{--}4.4) \times 10^{14}$ Бк с интервалом неопределенности $(1.0\text{--}5.0) \times 10^{14}$ Бк, а ^{137}Cs — 66.1×10^{12} Бк [21–23]. Градиент загрязнения почв очень широк: по мере удаления от эпицентра аварии на расстояние от 6 до 40 км запас ^{90}Sr изменяется вдоль центральной оси с 69 МБк/ м^2 до 100 кБк/ м^2 , подчиняясь экспоненциальной функции ($y = a \cdot e^{-bx}$), и далее до фоновых значений ($1\text{--}4$ кБк/ м^2) [23]. В поперечных сечениях от центральной оси к перифериям плотность загрязнения почв радионуклидами также уменьшается на несколько порядков величин [14, 23]. Высокая неоднородность загрязнения почв отмечена и на микроуровне: в пределах небольших однородных площадок (400–1000 м^2) плотность

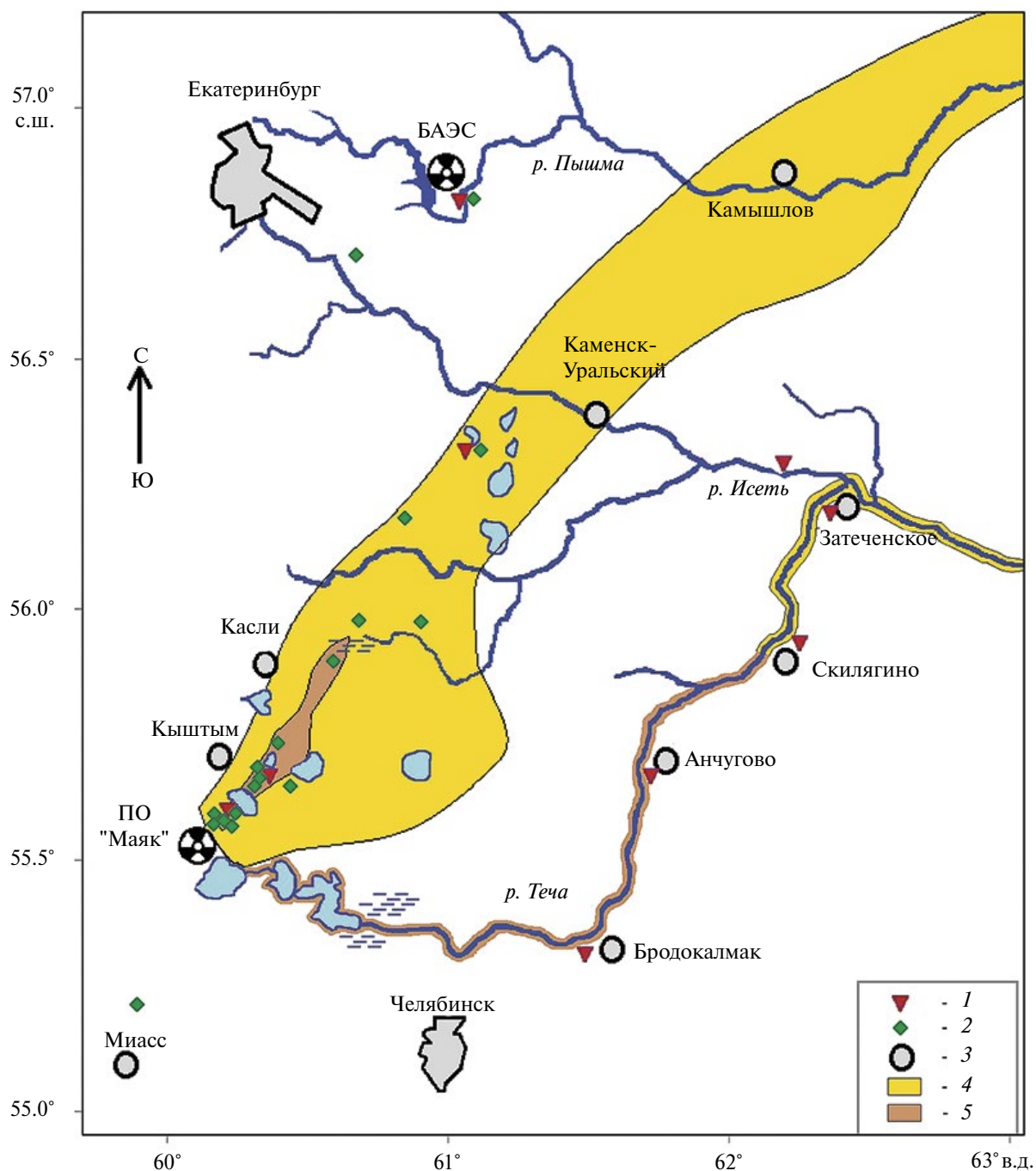


Рис. 1. Схема района исследований. Участки: 1 – гидроморфные, 2 – автоморфные, 3 – населенные пункты; плотность загрязнения почв ^{90}Sr : 4 – 4 – 200 кБк/м², 5 – 201 – 69000 кБк/м².

загрязнения может различаться более чем на порядок величин [24, 25].

В 1967 г. территория ВУРСа была загрязнена повторно. В засушливое лето водная поверхность оз. Карачай, которое использовалось предприятием в качестве открытого хранилища жидких радиоактивных отходов среднего уровня, сильно уменьшилась, обнажив дно и пологие берега. Мелкий песок и ил, загрязненные радионуклидами, поднимались

ветрами и разносились на большие расстояния, формируя пятнистое загрязнение местности [16, 21]. Основным загрязнителем (75%) был ^{137}Cs : его поступление в окружающую среду по официальным данным оценивалось как 2.2×10^{13} Бк, по другим источникам объем поступления был в 1.5–2 раза больше [21]. В 2000 г. начались работы по рекультивации берегов озера, в 2015 г. оз. Карачай было полностью ликвидировано [15].

Методы отбора проб почв, растений и их камеральная обработка

Отбор образцов в наземных экосистемах проводили с учетом путей поступления радионуклидов и ландшафтно-географических особенностей региона [4]. Анализ литературных и собственных данных показал, что плотность загрязнения почв может влиять на КП радионуклидов в растения [6, 8, 9, 26, 27]. Учитывая это обстоятельство, для снижения изменчивости КП территорию ВУРСа ранжировали по плотности загрязнения почв ^{90}Sr — были выделены импактная ($200\text{--}69\,000\text{ кБк/м}^2$) и буферная ($4\text{--}200\text{ кБк/м}^2$) зоны. Пойму р. Течи также условно разделили на участки, считая их аналогичными по уровням загрязнения почв импактной (среднее течение) и буферной (нижнее течение) зонам ВУРСа.

В качестве контрольных участков использовали территории с плотностью загрязнения почв ^{90}Sr $0.8\text{--}4.0\text{ кБк/м}^2$. Эти уровни не превышают фоновых значений для Уральского региона в целом [14, 17].

На разных расстояниях от источников загрязнения выделяли реперные участки с однородным рельефом, неповрежденными почвенным покровом и растительностью. На каждом участке закладывали по три почвенных разреза, располагая их по углам треугольника со стороной 10 м. Пробы почв отбирали слоями мощностью 5–10 см с учетом площади до глубины 20–40 см. Около разрезов отбирали пробы древесных растений: крупные и мелкие ветви, листья/хвою, семена, шишки и спил из нижней части ствола (на высоте 25–50 см). Образцы стволов разделяли на кору и древесину. Исследованы наиболее часто встречающиеся виды древесных растений: береза повислая (*Betula pendula* Roth.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), осина (*Populus tremula* L.), ива ломкая (*Salix fragilis* L.) и ива пятичичинковая (*Salix pentandra* L.). Все образцы высушивали до воздушно-сухого состояния, взвешивали, измельчали и озоляли при температуре $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Содержание золы оценивали в процентах от сухого веса образцов.

Метод определения ^{90}Sr

Определение ^{90}Sr в образцах проводили радиохимическим способом по аттестованной методике [28], которая основана на выщелачивании радионуклидов 6N HCl , выделения ^{90}Y в форме оксалатов, хроматографическом отделении сопутствующих иттрию изотопов тория и церия, окончательной очистке

путем повторного осаждения оксалата иттрия и приготовлении счетного образца в стандартной кювете. Радиохимический выход ^{90}Y контролировали весовым методом по количеству изотопного носителя (стабильного иттрия). Измерение β -активности проводили на малофоновой установке УМФ-2000 с нижним пределом обнаружения 0.2 Бк/кг при статистической ошибке измерений не более 10%.

Расчет коэффициентов перехода

Поступление радионуклидов в органы растений оценивали, используя удельную активность образцов. Для сравнения накопительной способности растений применяли коэффициенты перехода радионуклида (КП), рекомендованные МАГАТЭ. Величину КП ($\text{м}^2/\text{кг}$) рассчитывали как отношение удельной активности радионуклида в организме (Бк/кг сухой массы) к плотности загрязнения $0\text{--}40\text{ см}$ слоя почвы (Бк/м^2) [29].

Статистический анализ данных

Достоверность результатов достигали исследованием всех образцов полевого материала в 2–4 повторностях, а также представительными по массе пробами. Для анализа данных рассчитывали среднее значение и стандартное отклонение. Для проверки статистических гипотез использовали t -критерий Стьюдента и корреляционный анализ Спирмена (R_s). Все расчеты проведены с помощью программы STATISTICA 10.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Накопление ^{90}Sr деревьями на автоморфных элементах рельефа в зоне влияния ПО “Маяк”

На автоморфных участках зоны ВУРСа диапазон плотности загрязнения почв и концентраций ^{90}Sr в растениях составляет 4–5 порядков величин [6, 8]. Использование КП как относительной величины снижает диапазон изменчивости оценок накопительной способности растений до двух порядков величин (табл. 1). Ранжирование территории по плотности загрязнения почв позволяет еще уменьшить диапазоны КП, характеризующие разные участки зоны. На основании полученных данных можно заключить, что КП ^{90}Sr значимо ($t_{\text{ст}}$ от 4.0×10^{-4} до 1.22×10^{-11}) уменьшаются с ростом уровня загрязнения почв, при этом КП в контроле на порядок величин выше, чем в импактной зоне (см. табл. 1).

Таблица 1. Накопление ⁹⁰Sr деревьями на автоморфных участках в зоне ВУРСа

Вид	Фракции	Зола, %	КП, 10 ⁻³ м ² /кг			
			Импакт	Буфер	Контроль	min–max
<i>Betula pendula</i>	Семена	3.8 ± 0.4	1.9 ± 0.1	4.2 ± 0.8	–	1.8–4.2
	Листья	5.4 ± 0.5	3.5 ± 1.9	10.1 ± 5.3	33.3 ± 17.9	1.6–64.9
	Мелкие ветви	2.7 ± 0.6	3.5 ± 1.7	16.0 ± 12.4	30.8 ± 6.8	1.5–37.1
	Крупные ветви	2.4 ± 0.3	2.6 ± 1.4	8.7 ± 3.1	16.6 ± 8.6	1.1–28.8
	Ствол	0.6 ± 0.2	1.4 ± 1.2	6.2 ± 1.2	7.6 ± 2.4	0.6–11.7
<i>Pinus sylvestris</i>	Семена	7.5 ± 0.4	0.6 ± 0.2	–	–	0.5–0.7
	Шишки	0.6 ± 0.1	0.08 ± 0.02	0.09 ± 0.04	0.27	0.05–0.27
	Хвоя	2.3 ± 0.3	0.9 ± 0.5	1.8 ± 0.8	6.9 ± 3.3	0.1–14.3
	Мелкие ветви	1.8 ± 0.4	1.2 ± 0.5	1.8 ± 1.2	8.6 ± 3.3	0.6–13.9
	Крупные ветви	1.1 ± 0.1	0.7 ± 0.2	1.5 ± 1.1	12.5 ± 11.2	0.2–28.5
	Ствол	0.6 ± 0.2	0.6 ± 0.4	1.6 ± 1.1	16.9 ± 8.9	0.2–31.8
<i>Salix pentandra</i>	Листья	8.3 ± 1.7	14.3	7.4 ± 0.4	28.4 ± 3.2	7.1–32.1
	Ветви	3.8 ± 0.9	6.6	7.9 ± 4.9	14.5 ± 1.0	4.4–14.6
	Ствол	3.2 ± 0.1	6.3	–	15.9 ± 1.5	4.4–17.0

Распределение ⁹⁰Sr по органам изученных деревьев имеет сходный характер. По величинам КП их можно выстроить в следующий ряд: листья(хвоя) ≥ мелкие ветви > крупные ветви ≥ ствол ≥ репродуктивные органы. Лиственные породы, как правило, накапливают ⁹⁰ Sr в больших количествах, чем сосна. КП радионуклида в вегетативных органах деревьев коррелируют с зольностью ($R_s = 0.812–0.476$ при $p = 0.05$).

В табл. 2 показаны масса фракций стволов березы и сосны, их зольность, доля накопленного в разных органах ⁹⁰Sr и коэффициенты перехода. Массовая доля коры у молодых и старых деревьев березы составляет 17.45 и 17.92%, ее зольность

в 3–6 раз выше по сравнению с древесиной, и соответственно доля аккумулированного в коре ⁹⁰Sr у молодых деревьев достигает 45%, а у старых – 52%. У сосны массовая доля коры с возрастом снижается от 24.84 до 6.62%, ее зольность в 6–10 раз выше, чем древесины. У молодых деревьев доля ⁹⁰Sr, аккумулированного в коре, достигает 48%, а у старых – 25%. Для обоих видов деревьев КП ⁹⁰Sr в коре в 3–4 раза выше, чем в древесине (t_{st} от 0.002 до 0.006).

Сравнение наших результатов с коэффициентами перехода, рассчитанными по данным работы [30], полученными в 1991 г. для почв естественного сложения буферной зоны ВУРСа (серая

Таблица 2. Характеристика фракций стволов березы и сосны разного возраста, произрастающих на автоморфных почвах импактной зоны ВУРСа, и распределение в них ⁹⁰Sr

Фракция ствола	Возраст, лет	n*	Масса фракции (возд.-сухое вещество), %	Зольность, %	Содержание ⁹⁰ Sr, %	КП, 10 ⁻³ м ² /кг
Береза						
Кора	19–26	4	17.45 ± 2.75	1.58 ± 0.33	45.28 ± 10.97	3.17 ± 1.61
	64–69	6	17.92 ± 1.97	2.78 ± 0.01	52.23 ± 18.69	2.81 ± 1.09
Древесина	19–26	4	82.55 ± 2.75	0.43 ± 0.12	54.71 ± 10.99	0.71 ± 0.17
	64–69	6	82.08 ± 1.97	0.42 ± 0.04	47.76 ± 18.69	0.64 ± 0.36
Ствол **	19–26	4	100	0.58 ± 0.19	100	1.09 ± 0.20
	64–69	6	100	0.84 ± 0.13	100	1.01 ± 0.28
Сосна						
Кора	20–26	7	24.84 ± 4.07	2.02 ± 0.54	48.32 ± 15.79	1.51 ± 0.86
	70–110	5	6.62 ± 2.90	2.44 ± 0.89	25.45 ± 3.94	1.36 ± 0.62
Древесина	20–26	7	75.15 ± 4.07	0.31 ± 0.02	51.67 ± 15.79	0.44 ± 0.24
	70–110	5	93.37 ± 2.90	0.25 ± 0.04	74.54 ± 3.94	0.42 ± 0.10
Ствол **	20–26	7	100	0.74 ± 0.20	100	0.76 ± 0.40
	70–110	5	100	0.36 ± 0.10	100	0.49 ± 0.17

*n – размер выборки; ** – ствол без разделения на кору и древесину.

Таблица 3. Изменение накопления ^{90}Sr деревьями с течением времени

Вид	КП, 10 ⁻³ м²/кг				Год отбора, источник
	листья/хвоя	ветви	кора	древесина	
Буфер					
<i>Betula pendula</i>	7.8 ± 0.7	17.3 ± 0.7	19.2 ± 1.0	2.8 ± 0.2	1991, [30]
	12.8 ± 8.2	16.0 ± 12.4	10.0 ± 1.7	2.3 ± 0.5	2020, сд*
Контроль					
<i>Pinus sylvestris</i>	11.8 ± 7.0	9.4 ± 1.8	8.2 ± 0.6	1.8 ± 0.6	1991, [30]
	7.2 ± 4.8	10.4 ± 4.3	16.7 ± 6.9	0.8 ± 0.4	2011–2012, сд
<i>Betula pendula</i>	30.0 ± 3.5	21.2 ± 1.8	16.5 ± 1.2	4.1 ± 0.6	1991, [30]
	33.7 ± 19.3	34.2 ± 4.1	16.7 ± 6.8	2.7 ± 1.4	2011–2012, сд

*сд — собственные данные.

лесная почва) и за его пределами (бурая лесная почва), показывает, что накопление ^{90}Sr сосной и березой практически не изменилось с течением времени (табл. 3).

Анализ литературных данных и наших результатов свидетельствует о том, что плотность загрязнения почвы является хорошим предиктором для оценки уровня загрязнения растений. На рис. 2 приведены обобщенные данные о накопительных способностях различных органов березы и сосны, произрастающих в градиенте загрязнения на автоморфных почвах зоны ВУРСа. Согласно рис. 2, с ростом уровня загрязнения почв КП уменьшаются.

Математические расчеты показали, что зависимость накопления радионуклидов растениями от плотности загрязнения почв автоморфных участков

ландшафта описывается наиболее корректно не линейной, а степенной функцией $y = a \cdot x^{-b}$. Значения КП на наиболее загрязненных участках меньше на порядок величин по сравнению с фоновыми выборками. В табл. 4 приведены коэффициенты соответствующих уравнений регрессии (a , b) и коэффициенты детерминации (R^2).

Накопление радионуклидов деревьями на гидроморфных участках зоны ВУРСа и в пойме р. Течи

На гидроморфных участках импактной зоны ВУРСа характер распределения радионуклида по органам деревьев был такой же, как и на автоморфных: наименьшие КП ^{90}Sr отмечены в шишках и древесине (табл. 5). Береза и осина накапливают ^{90}Sr одинаково, а сосна в меньшей степени, чем

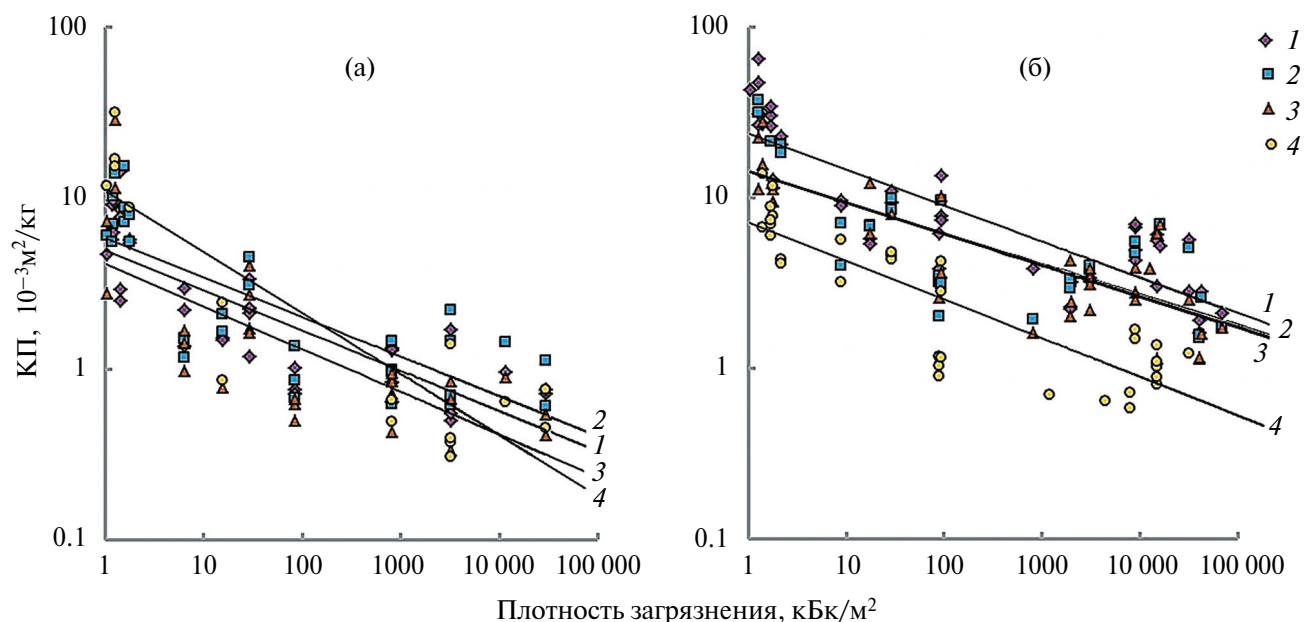


Рис. 2. Зависимость КП ^{90}Sr в разные органы сосны (а) и березы (б) от плотности загрязнения почв ВУРСа: 1 — листья/хвоя, 2 — мелкие ветви, 3 — крупные ветви, 4 — ствол.

Таблица 4. Параметры уравнений регрессии $y = ax^b$ для КП ^{90}Sr в надземные органы березы и сосны (y , $10^{-3}\text{м}^2/\text{кг}$) в зависимости от плотности загрязнения почв (x , $\text{кБк}/\text{м}^2$)

Органы	<i>Betula pendula</i>			<i>Pinus sylvestris</i>		
	<i>a</i>	<i>−b</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>−b</i>	<i>R</i> ²
Листья/хвоя	23.81	−0.21	0.74	4.98	−0.24	0.69
Мелкие ветви	14.21	−0.18	0.54	5.84	−0.23	0.62
Крупные ветви	14.22	−0.18	0.63	4.15	−0.25	0.55
Ствол	7.15	−0.23	0.74	11.09	−0.36	0.79

Таблица 5. Накопление ^{90}Sr фракциями деревьев на гидроморфных элементах рельефа импактной зоны ВУРСа

Органы	КП, $10^{-3}\text{м}^2/\text{кг}$		
	<i>Populus tremula</i>	<i>Betula pendula</i>	<i>Pinus sylvestris</i>
Листья/хвоя	12.3 ± 1.5	15.7 ± 13.0	2.1 ± 1.0
Мелкие ветви	8.9 ± 1.2	10.7 ± 10.4	3.1 ± 1.7
Крупные ветви	14.7 ± 1.4	5.8 ± 2.8	2.1 ± 1.2
Кора	16.7 ± 4.0	10.3 ± 4.7	4.9 ± 2.1
Древесина	1.9 ± 0.5	2.3 ± 2.1	1.2 ± 0.3
Шишки	—	—	0.20 ± 0.02
Ствол	6.4 ± 1.5	3.7 ± 1.2	1.0 ± 0.11

лиственные деревья. Сравнение данных табл. 1, 2 и 5 показывает, что коэффициенты перехода ^{90}Sr на гидроморфных участках, как правило, в 2–4 раза выше, чем на автоморфных.

В зоне влияния радиоактивных сбросов в р. Течу характер распределения радионуклидов по органам деревьев не изменяется (табл. 6). Несмотря на то, что плотности загрязнения ^{90}Sr пойменных почв р. Течи в среднем (200–700 $\text{кБк}/\text{м}^2$) и ниже (10–200 $\text{кБк}/\text{м}^2$) течения различаются, малое количество данных и высокая вариабельность не позволяют выявить достоверных различий между накоплением ^{90}Sr деревьями на этих участках поймы реки. Максимальные КП наблюдаются в образцах *Larix sibirica*, собранных П.И. Юшковым в 2005 г. [31]. Сравнение КП в разных частях *Betula*

pendula на гидроморфных участках импактной зоны ВУРСа и среднего течения поймы р. Течи (см. табл. 5 и 6) свидетельствует о том, что различия недостоверны.

ОБСУЖДЕНИЕ

Загрязнение зоны влияния ПО “Маяк” формировалось разными путями из различных источников. Зона ВУРСа загрязнена аварийными выпадениями радионуклидов из атмосферы, а р. Теча – в результате сброса жидких радиоактивных отходов. Кроме того, следует учитывать штатные газоаэрозольные выбросы предприятия, которые продолжают с начала его работы (1948 г.) и по настоящее время. Скорость и масштабы миграционных процессов на разных участках зоны

Таблица 6. Накопление ^{90}Sr фракциями деревьев в пойме р. Течи

Вид	КП,10 ⁻³ м²/кг				Год отбора, источник
	листья/ хвоя	ветки	кора	древесина	
Нижнее течение р. Течи					
<i>Pinus sylvestris</i>	0.9 ± 0.6	1.8 ± 1.3	3.1 ± 1.4	0.8 ± 0.5	2005, [31]
<i>Pinus sylvestris</i>	2.2 ± 0.7	3.3 ± 0.9	—	—	сд*, 2010
<i>Larix sibirica</i>	22.0	8.9	7.7 ± 0.9	5.9 ± 0.4	2005, [31]
<i>Betula pendula</i>	3.5	3.2	0.9 ± 0.5	0.3 ± 0.1	2005, [31]
<i>Salix fragilis</i>	8.7 ± 3.0	8.9 ± 5.1	—	—	сд, 2010
Среднее течение р. Течи					
<i>Betula pendula</i>	6.0 ± 2.6	6.6 ± 2.6	—	—	сд, 2010
<i>Salix fragilis</i>	10.0 ± 4.2	7.2 ± 2.5	—	—	сд, 2010

*сд — собственные данные.

зависят от типа экосистем, физико-химической формы радионуклидов, комплекса почвенных и погодно-климатических условий [3, 20]. Многочисленные попытки ранжировать растения по накопительной способности с помощью удельной активности не привели к однозначным выводам, унифицированными характеристиками являются коэффициенты перехода, учитывающие плотность загрязнения почв. Полученные ряды сильно изменялись в зависимости от ландшафтных, почвенных и метеорологических условий [32, 33]. Кроме того, высокая гетерогенность радиоактивного загрязнения природных биоценозов затрудняет анализ накопительной способности растений [24, 25].

Спустя более 60 лет после аварийных ситуаций в зоне влияния ПО «Маяк» характер распределения ^{90}Sr в надземных органах древесных растений, произрастающих в градиенте загрязнения ВУРСа, в пойме р. Течи и на контрольных участках, схож. Максимальные КП ^{90}Sr наблюдаются в активно растущих органах (хвоя, листья, мелкие ветки), минимальные — в одревесневших частях растений и генеративных органах. Различия сильнее выражены у березы, чем у сосны. Все органы березы и осины накапливают больше ^{90}Sr , чем сосна, поскольку эти листовые породы относятся к кальцефильным видам, а ^{90}Sr является химическим аналогом Са [20]. Такой тип распределения ^{90}Sr в деревьях складывается с течением времени на всех загрязненных территориях на стадии преобладания у растений корневого поглощения радионуклидов [29, 34].

Изучение распределения ^{90}Sr в стволах березы и сосны показало, что КП ^{90}Sr для коры гораздо выше, чем для древесины. При этом в стволах березы независимо от возраста деревьев ^{90}Sr распределяется между корой и древесиной примерно поровну. Подобное распределение может быть нарушено при появлении в стволе ложной сердцевины — в этом случае накопление ^{90}Sr древесиной деревьев увеличивается [8, 35]. Для сосны отмечено снижение доли коры с возрастом и соответственно снижение относительного содержания радионуклида в ней.

Изменение КП с течением времени определяется биологической доступностью радионуклида в почве. Имеются данные, свидетельствующие как о снижении корневого поступления ^{90}Sr в растения с течением времени, так и об отсутствии изменений либо даже повышении подвижности радионуклида в отдельные годы [3, 32]. По-видимому, накопление радионуклида растениями и изменение КП

со временем определяются комплексом свойств почв и влиянием климатических факторов [3]. Отсутствие временной зависимости величины КП ^{90}Sr , обнаруженное на автоморфных элементах рельефа буферной территории ВУРСа и контрольных участках, свидетельствует о длительном сохранении уровня биологической доступности радионуклида в почвах.

Различия водного режима на автоморфных и гидроморфных участках ландшафта могут влиять на КП ^{90}Sr для разных видов растений. На примере аварийной зоны Чернобыльской АЭС показано, что увеличение влажности и плодородия почв приводит к уменьшению накопления ^{90}Sr деревьями [3, 36]. В наших исследованиях КП у деревьев, произрастающих на автоморфных почвах импактной зоны ВУРСа, были ниже, чем на гидроморфных. По-видимому, повышение КП на гидроморфных участках происходит в результате влияния комплекса физико-химических свойств почв, превышающего эффект от увеличения влажности почв. Так, маломощные дерновые и лугово-слоистые почвы гидроморфных участков береговой зоны озер характеризуются меньшим плодородием (содержание гумуса, Са), чем серые и темно-серые лесные почвы, наиболее распространенные на автоморфных элементах ландшафта [12, 13].

Широкий диапазон плотности загрязнения территории ВУРСа ($1\text{--}69\,000\text{ кБк/м}^2$) позволил нам выявить нелинейную зависимость накопления радионуклидов древесными растениями. Работы, в которых показана нелинейная связь между накоплением радионуклидов растениями и плотностью загрязнения почв, единичны [7–9, 37]. Феномен не является следствием разной подвижности радионуклидов в почвах, поскольку на территории ВУРСа и прилегающих участках почвенный покров однотипен. Более того, содержание подвижных форм радионуклидов в почвах ВУРСа может быть выше, чем на контрольных территориях [38, 39].

Причиной относительного снижения поступления радионуклида в надземную массу растений может быть радиационное поражение корней. Высокие дозовые нагрузки на корневую систему могут привести к уменьшению поступления радионуклида в растения [37]. Нами показано, что большая часть ^{90}Sr и ^{137}Cs через 60 лет после аварии находится в верхнем 20-см слое почвы [40–41] и создает радиационную нагрузку на корневые системы, превышающую фоновые значения на 3–4 порядка величин [42]. Кроме того, на территориях с уровнем загрязнения почв, близким

к фоновым, значимым фактором может быть относительно большой вклад аэрального загрязнения растений, который становится пренебрежимо малым на импактных участках [43].

В ряде работ при выборе растений для фиторемедиации радиоактивно загрязненных территорий авторы используют принципы экотоксикологии [44, 45]. У разных видов растений обнаружена непрямая зависимость накопления тяжелых металлов от их концентрации в почвах, которая связана со способностью структур корня ограничивать поступление больших количеств токсикантов в надземные органы [46]. Следует учитывать, что весовые количества стабильных элементов в окружающей среде значительно выше, чем радиоактивных изотопов, и не ясны механизмы, обеспечивающие сходство зависимости КП от уровня загрязнения почв. Возможно, ионизирующие излучения, образующиеся при распаде радионуклидов, индуцируют у растений биохимические реакции, снижающие накопление при высоких уровнях загрязнения. Так, в опытах с рисом, выращенным в условиях повышенной УФ-радиации, были выделены растения с низкой способностью к накоплению Cd. Эффект был связан с разными мутациями гена *OsNRAMP5*, который кодирует естественный ассоциированный с устойчивостью протеин-макрофаг [47]. Этот вопрос нуждается в дальнейшем изучении.

Анализ данных показывает, что величины КП ^{90}Sr , полученные для древесных растений на территории Урала с низким уровнем загрязнения (буферная зона, контроль), соответствуют диапазонам, установленным МАГАТЭ для территорий России и Украины, загрязненных в результате аварии на ЧАЭС, а при более высоких показателях плотности загрязнения почв КП были ниже [33]. Было бы целесообразно рекомендовать МАГАТЭ провести ревизию КП ^{90}Sr в древесные растения с учетом плотности загрязнения почв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спустя более 60 лет после событий, обусловивших радиоактивное загрязнение обширных территорий в зоне влияния ПО “Маяк”, установлен схожий характер распределения ^{90}Sr в надземных органах деревьев, произрастающих в градиенте загрязнения и на фоновых участках. Накопительная способность листьев/хвои была выше, чем осевых органов и древесины. Разные органы листовых пород накапливают ^{90}Sr больше, чем у сосны. Однозначного влияния водного режима на накопление

радионуклида деревьями выявить не удалось из-за различий физико-химических свойств почв на гидроморфных и автоморфных участках.

Зависимость коэффициентов перехода ^{90}Sr в древесные растения от плотности загрязнения почв описывается степенной функцией, следовательно плотность загрязнения почв необходимо учитывать при оценке накопительной способности растений. Величины КП ^{90}Sr на фоновых участках и буферных территориях зоны влияния ПО “Маяк” соответствуют диапазонам изменчивости показателя, установленным МАГАТЭ, а на импактных участках ВУРСа значения КП этого радионуклида, как правило, ниже.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН (№ 122021000077-6).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит исследований с участием людей или животных в качестве объектов изучения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IAEA, Handbook of transfer parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments, IAEA TECDOC 364. IAEA, Vienna, 1994.
2. Сельскохозяйственная радиоэкология / Ред. Алексахина Р.М., Корнеева Н.А. М.: Экология, 1991. 400 с.
3. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах. М.: Наука, 1999. 228 с.
4. Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Михайловская Л.Н. Радиоэкологические исследования почвенно-растительного покрова. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2006. 89 с.
5. Gillett A.G., Crout N.M.J., Absalom J.P. et al. Temporal and spatial prediction of radiocaesium transfer to food products // Radiat. Environ. Biophys. 2001. V. 40. №3. P. 227–235. <https://doi.org/10.1007/s004110100107>
6. Молчанова И.В., Михайловская Л.Н., Позолотина В.Н. и др. Техногенные радионуклиды в почвах Восточно-Уральского радиоактивного следа и их накопление растениями различных таксономических

- групп // Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. Т. 54. № 1. P. 77–84.
<https://doi.org/10.7868/S086980311401010X>
7. *Mikhailovskaya L.N., Pozolotina V.N., Antonova E.V.* Accumulation of ^{90}Sr by Plants of Different Taxonomic Groups from the Soils at the East Ural Radioactive Trace // Behavior of Strontium in Plants and the Environment / Eds. Gupta D. K., Walther C., Cham: Springer International Publishing AG, 2018. P. 61–73.
 8. *Mikhailovskaya L.N., Pozolotina V.N., Modorov M.V.* et al. Accumulation of ^{90}Sr by *Betula pendula* within the East Ural Radioactive Trace zone // J. of Environmental Radioactivity. 2022. V. 250. P. 106914.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106914>
 9. *Beresford N., Wright S.* Non-linearity in radiocaesium soil to plant transfer: Fact or fiction? // Radioprotection. 2005. V. 40. № S1. P. 67–72.
<https://doi.org/10.1051/radiopro:2005s1-011>
 10. *Imanaka T., Hayashi G., Endo S.* Comparison of the accident process, radioactivity release and ground contamination between Chernobyl and Fukushima-1 // J. of Radiation Research. 2015. V. 56. № S1. P. i56–i61.
<https://doi.org/10.1093/jrr/rrv074>
 11. *Мартюшов В.З., Смирнов Е.Г., Тарасов О.В.* и др. Экологический мониторинг в Восточно-Уральском заповеднике // Координация мониторинга в ООПТ Урала. Екатеринбург: Изд-во «Екатеринбург», 2000. С. 96–110.
 12. *Позолотина В.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н.* и др. Современное состояние наземных экосистем зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа. Екатеринбург: Гощицкий, 2008. 204 с.
 13. *Фирсова В.П., Молчанова И.В., Мещеряков П.В.* и др. Почвенно-экологические условия накопления и перераспределения радионуклидов в зоне ВУРСа. Екатеринбург: Изд-во «Екатеринбург», 1996. 140 с.
 14. Атлас Восточно-Уральского и Карачаевского радиоактивных следов, включая прогноз до 2047 года / Под ред. Израэля Ю.А.. М.: ИГКЭ Росгидромета и РАН. Фонд «Инфосфера», НИА «Природа». 2013. 140 с.
 15. *Мокров К.Ю., Мокров Ю.Г.* Реконструкция плотности выпадений ^{90}Sr и ^{137}Cs в районе расположения ФГУП «ПО Маяк» за период 1950–2020 гг. (на примере пос. Новогорный) // Вопросы радиационной безопасности. 2021. № 2. С. 35–45.
 16. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Течи / Ред. Аклеев А.В., Киселев М.Ф. М.: Мин-во здравоохранения РФ, 2000. 532 с.
 17. *Трапезников А.В., Молчанова И.В., Караваева Е.Н.* и др. Итоги многолетних радиоэкологических исследований реки Течи // Вопросы радиационной безопасности. 2007. № 3. С. 36–49.
 18. INES. The international nuclear and radiological event scale. User's manual. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2013. P. 206.
 19. *Nikipelov B.V., Romanov G.N., Buldakov L.N.* et al. About accident on Southern Urals of 29 September 1957 // Inform. Bull. Interdepartmental. Council for Information and Public Relations in the atom. energy. 1990. P. 39–48.
 20. *Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А.* и др. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Под ред. Ильина Л.А., Губанова В.А. М.: ИздАТ, 2001. 752 с.
 21. *Aarkrog A., Dahlgaard H., Nielsen S.P.* et al. Radioactive inventories from the Kyshtym and Karachay accidents: Estimates based on soil samples collected in the South Urals (1990–1995) // Sci. Tot. Environ. 1997. V. 201. № 2. P. 137–154.
 22. *Pozolotina V. N., Shalaumova Y. V., Lebedev V. A.* et al. Forests in the East Ural Radioactive Trace: structure, spatial distribution, and the ^{90}Sr inventory 63 years after the Kyshtym accident // Environmental Monitoring and Assessment. 2023. V. 195. №6. Art. 632.
<https://doi.org/10.1007/s10661-023-11300-y>
 23. *Molchanova I., Mikhailovskaya L., Antonov K.* et al. Current assessment of integrated content of long-lived radionuclides in soils of the head part of the East Ural Radioactive Trace // J. Environ. Radioact. 2014. V. 138. № 6. P. 238–248.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.09.004>
 24. *Mikhailovskaya L.N., Modorov M.V., Pozolotina V.N.* et al. Heterogeneity of soil contamination by ^{90}Sr and its absorption by herbaceous plants in the East Ural Radioactive Trace area // Science of the Total Environment. 2019. V. 651. P. 2345–2353.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.119>
 25. *Коробова Е.М., Тарасов О.В., Романов С.Л.* и др. Исследование процессов миграции ^{90}Sr и ^{137}Cs в элементарных ландшафтно-геохимических системах Восточно-Уральского радиоактивного следа // Вопросы радиационной безопасности. 2020. № 3. С. 51–62.
 26. *Watt N.R., Willey N.J., Hall S.C., Cobb A.* Phytoextraction of ^{137}Cs : The effect of soil ^{137}Cs concentration on ^{137}Cs uptake by *Beta vulgaris* // Acta Biotechnol. 2002. V. 22. № 1–2. P. 183–188.
 27. *Караваева Е.Н., Михайловская Л.Н., Молчанова И.В., Позолотина В.Н.* Накопление ^{90}Sr и ^{137}Cs растениями из почв, загрязненных в результате эксплуатации предприятий ядерно-энергетического комплекса // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. 2010. Т. 12. № 1. С. 85–90.
 28. Методика измерений удельной активности ^{90}Sr в пробах почв, грунтов, донных отложений и горных пород бета-радиометрическим методом с радиохимической подготовкой /

- А.Е. Бахур, Л.И. Мануилова, Д.М. Зуев [и др.]. ФР.1.40.2013.15383. М.: ФГУП “ВИМС”, 2013. 17 с.
29. IAEA. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. ed. IAEA, 2010. Vienna.
 30. Karavaeva Ye.N., Kulikov N.V., Molchanova I.V. et al. Accumulation and distribution of long-living radionuclides in the forest ecosystems of the Kyshtym accident zone // Science of the Total Environment. 1994. V. 157. № 1–3. P. 147–151.
 31. Юшков П.И. Влияние жидких радиоактивных сбросов ПО “Маяк” на леса в поймах рек Теча и Исеть // Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин. Екатеринбург, 2006. С. 286–308.
 32. Переволоцкий А.Н. Радиационно-экологическая обстановка в лесных биогеоценозах: динамика, факторы, прогноз (на примере региона аварии Чернобыльской АЭС): Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Обнинск, 2013. 39 с.
 33. The IAEA handbook on radionuclide transfer to wildlife / B.J. Howard, N.A. Beresford, D. Copplestone [et al.] // J. of Environmental Radioactivity. 2013. V. 121. P. 55–74.
 34. Алексахин Р.М., Нарышкин М.А. Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1977. 141 с.
 35. Holiaka D., Yoschenko V., Levchuk S., Kashparov V. Distributions of ^{137}Cs and ^{90}Sr activity concentrations in trunk of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Chernobyl zone // J. Environ. Radioact. 2020. V. 222. Art. 106319. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106319>
 36. Переволоцкая Т.В., Булавик И.М., Переволоцкий А.М. О влиянии подтопления на распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs в лесном биогеоценозе // Радиационная биология. Радиоэкология. 2009. Т. 49. № 3. С. 291–301.
 37. Тихомиров Ф.А., Карабань Р.Т., Бочарова М.А. Накопление ^{90}Sr и ^{137}Cs в опытах с сеянцами хвойных древесных растений // Лесоведение. 1975. № 1. С. 82–87.
 38. Karavaeva Ye.N., Molchanova I.V., Mikhailovskaya L.N. Peculiarities of the technogenic radionuclides transfer from soils into plants in the radioactive contaminated areas // Radioprotection. 2009. V. 44. № 5. P. 371–375. <http://dx.doi.org/10.1051/radiopro/20095136>
 39. Тарасов О.В., Федорова О.В., Тананаев И.Г. и др. Формы состояния и миграция радионуклидов в почвах Восточно-Уральского радиоактивного следа // Вестник Дальневосточного отд. РАН. 2016. Т. 1. № 185. P. 47–52.
 40. Mikhailovskaya L.N., Pozolotina V.N. Spatial distribution of ^{90}Sr from different sources in soils of the Ural region, Russia // Strontium contamination in the environment / Eds. Pathak P., Gupta D. K. Springer International Publishing, 2020. P. 141–158.
 41. Позолотина В.Н., Антонова Е.В., Михайловская Л.Н. Итоги многолетних радиоэкологических исследований наземных экосистем Восточно-Уральского радиоактивного заповедника // Вопросы радиационной безопасности. 2023. № 2. С. 47–68.
 42. Karimullina E., Mikhailovskaya L.N., Antonova E., Pozolotina V. Radionuclide uptake and dose assessment of 14 herbaceous species from the East-Ural Radioactive Trace area using the ERICA Tool // Environmental Science and Pollution Research. 2018. V. 25. № 14. P. 13975–13987. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-018-1544-y>
 43. Михайловская Л.Н., Позолотина В.Н., Михайловская З.Б. Вклад современных газоаэрозольных выбросов атомных предприятий в загрязнение растительного покрова // Ядерно-физические исследования и технологии в сельском хозяйстве: Тезисы докл. межд. науч.-практ. конф. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2020. С. 201–203.
 44. Gupta D.K., Deb U., Walter C., Chatterjee S. Strontium in the ecosystem: transfer in plants via root system // Behaviour of strontium in plants and the environment / Eds. Gupta D. K., Walther C. Cham: Springer International Publishing AG, 2018. P. 1–18. P. 61–73.
 45. Sharma S. Uptake, transport, and remediation of strontium // Strontium contamination in the environment / Eds. Pathak Pankaj, Gupta Dharmendra K. The Handbook of Environmental Chemistry, 2020. V. 88. P. 99–120.
 46. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с.
 47. Ishikawa S., Ishimaru Y., Igura M. et al. Ion-beam irradiation, gene identification, and marker-assisted breeding in the development of low cadmium rice // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2012. V. 109. P. 19166–19171.

AGGREGATED TRANSFER FACTORS OF ^{90}Sr IN WOODY PLANTS IN THE ZONE OF INFLUENCE OF A NUCLEAR ENTERPRISE

L. N. Mikhailovskaya^a, V. N. Pozolotina^{a, *}, Z. B. Mikhailovskaya^a

^a*Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Russia 620144 Ekaterinburg*

**e-mail: pozolotina@ipae.uran.ru*

Abstract — Data on the variability of transfer aggregated factors (T_{ag}) of ^{90}Sr in different species of woody plants growing in the zone of influence of the Mayak Production Association are summarized. The radioecological situation in this territory is determined mainly by two events: the dumping of radioactive waste into the river. Tschu, 1949–1951 and the Kyshtym accident, 1957. The main reasons for the variability of T_{ag} , including species characteristics of plants, different soil moisture regimes and the level of their ^{90}Sr contamination, were analyzed. The dependence of the T_{ag} of this radionuclide in trees on the density of soil contamination is described by a power function. In buffer areas and background areas, T_{ag} ^{90}Sr corresponds to the ranges of variability of the indicator established by the IAEA, and in more contaminated impact areas, the accumulative capacity of trees, as a rule, decreases.

Keywords: Kyshtym accident, East Ural radioactive trace (EURT), Tschu river, ^{90}Sr , aggregated transfer factor (T_{ag}), soil, woody plants

УДК 550.42:546.11.027*3:502.211+22.386.83

ТРИТИЙ ОТ МОЛЕКУЛЫ ДО БИОСФЕРЫ. 2. ПОДХОДЫ К ДОЗИМЕТРИИ

© 2024 г. Е. В. Антонова^{a,*}

^a Институт экологии растений и животных УрО РАН, Россия 620144 Екатеринбург,
ул. 8 Марта, 202

*e-mail: selenaa@ipae.uran.ru

Поступила в редакцию 10.06.2024 г.

После доработки 03.07.2024 г.

Принята к публикации 06.07.2024 г.

Тритий (^3H) имеет естественное и техногенное происхождение. Высокая миграционная способность, наличие разных физических форм и химических соединений, сродство с органическими молекулами и включенность в обменные процессы в биосфере привлекают внимание к этому изотопу в сфере радиационной защиты живых организмов и человека. Проанализированы данные 324 публикаций (230 из них – в Приложении)¹ на основе лабораторных и полевых исследований для понимания подходов к методологии оценки доз ^3H у референтных групп организмов растений и животных, обозначенных в 108-й Публикации Международного комитета по радиационной защите. Описаны базовые принципы и особенности расчета мощности поглощенной дозы от неорганических и органических форм и соединений ^3H для разных уровней биологической организации. Выявлено более половины исследований, не касающихся вопросов дозиметрии, но анализирующих радиобиологические эффекты. Перспективы дальнейших исследований могут быть связаны с дифференцированным подходом при оценке доз от разных форм и соединений ^3H , обеспечением более тесного контакта между лабораторными и полевыми исследованиями, а также смещением фокуса внимания с уровня референтных организмов на уровень популяций. Полученные результаты найдут свое применение при постановке проблем в области радиоэкологии и радиобиологии, а также при усовершенствовании норм радиационной безопасности, связанных с работой действующих предприятий атомной промышленности и развитием объектов новой ядерной техники.

Ключевые слова: тритий, уровни биологической организации, биота, мощность поглощенной дозы, референтные виды

DOI: 10.31857/S0367059724050033 **EDN:** WCHNHXU

Бета-излучатель тритий (^3H) с периодом полураспада около 12.3 года имеет естественное и техногенное происхождение [1–4]. Он существует в нескольких формах и химических соединениях: тритиевая несвязанная вода (НТО, T_2O , DTO), встречается в окружающей среде; водная несвязанная тканями форма ^3H , тритий свободной воды тканей, неорганически связанный тритий (TFWT); органически связанный с белками, полисахаридами и липидами ^3H (ОВТ); обменный (связан с атомами O_2 , S и N_2 , eОВТ), необменный (связан с атомами C, neОВТ) и суммарный (tОВТ=eОВТ+neОВТ); меченные ^3H прекурсоры (предшественники нуклеиновых и аминокислот); нерастворимые соединения и меченные ^3H газы (НТ, T_2 , CH_3T и др.) [5–8].

Самой распространенной в природе формой и химическим соединением ^3H (более 99%) явля-

ется НТО [9]. Входя в состав воды, ^3H участвует в глобальном круговороте водорода и во всех метаболических процессах (рис. 1). Международные нормативы по содержанию трития в питьевой воде, предложенные разными организациями и странами, различаются на 1–2 порядка [10, 11] и приведены в табл. 1. В СССР и России нормативы по НТО и ОВТ для населения многократно эволюционировали [12]. По современным оценкам, уровень вмешательства по содержанию трития в питьевой воде составляет 7.6×10^3 Бк/л, а предел годового поступления НТО и ОВТ с продуктами питания – 2.1×10^7 и 8.3×10^6 Бк/кг соответственно [13]. Считается, что текущие нормы трития тщательно установлены, консервативны и обеспечивают адекватную защиту человека от его воздействия [14].

Последние десятилетия характеризовались сменой парадигмы в радиоэкологии, поскольку менялась философия Международного комитета

¹ Дополнительная информация доступна по doi для авторизованных пользователей.

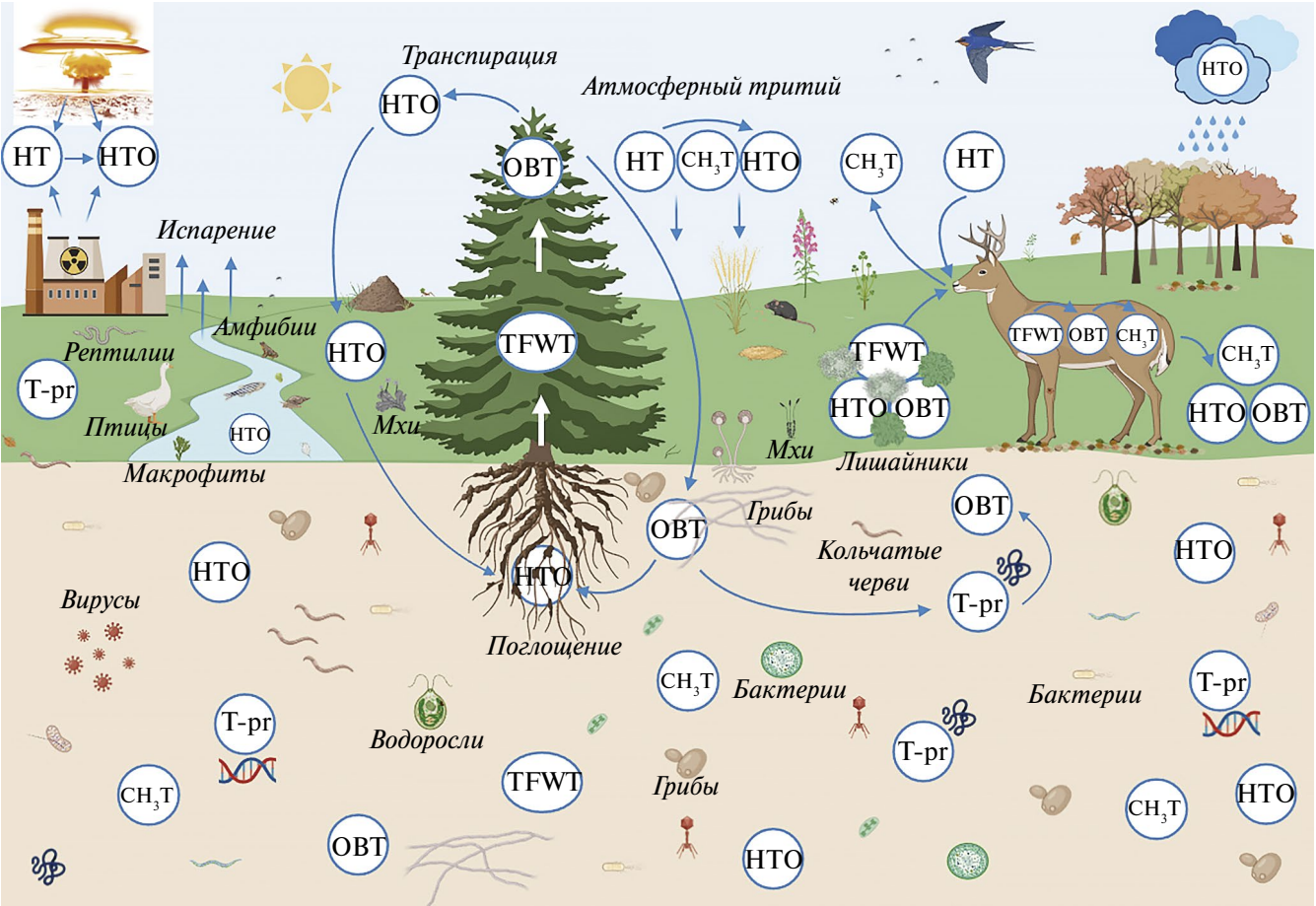


Рис. 1. Круговорот разных форм и соединений трития в биосфере: НТ – меченные тритием газы; CH_3T – тритиевый метан; НТО – тритиевая несвязанная вода; ТФВТ – тритий свободной воды тканей; Т-Pr – меченные ^3H прекурсоры; ОВТ – органически связанный ^3H .

Таблица 1. Нормативы содержания трития в питьевой воде в разных странах по [10, 11] с модификациями

Страна	Содержание, Бк/л
Австралия	76 103
Аргентина	Нормы не установлены
Великобритания (Англия, Уэльс, Шотландия и Северная Ирландия)	100
ЕС (Бельгия, Франция, Германия, Италия, Норвегия, Румыния, Испания, Швеция)	100
Канада	7 000
Китай	Нормы не установлены
Корея	Нормы не установлены
Россия	7 600
США	740
Финляндия	30 000
Швейцария	10 000
Япония	Нормы не установлены
Всемирная организация здравоохранения	10 000

по радиационной защите (МКРЗ). Впервые рекомендации по защите окружающей среды от радиации появились в Публикации 26 [15]. МКРЗ рекомендовал считать уровень радиационной безопасности, определенный для человека, безопасным и для других видов. Эта идея нашла свое отражение

в последующих рекомендациях [16], где отмечалось, что применение системы радиационной защиты, разработанной для человека, не ставит под угрозу исчезновение видов или не создает дисбаланс между ними. Постепенная смена антропоцентрической парадигмы в обществе привела к созданию рабочих групп, обобщающих результаты исследований поведения радионуклидов в разных компонентах наземных и водных экосистем [17–22], разрабатывающих программы для расчета дозовых нагрузок биоты [23–26] и оценки биологических эффектов [4, 27–30].

Современный уровень развития радиоэкологии и радиобиологии предполагает использование эталонных видов растений и животных, обозначенных в Публикации 108 [31], в качестве модельных организмов при разработке дозиметрических моделей и оценке биологических эффектов. Модели МКРЗ обеспечивают коэффициенты преобразования дозы для представителей большого числа таксонов. В них используется ряд упрощенных подходов: простая геометрия тела с однородным составом и плотностью, однородное внутреннее распределение радионуклидов, ограниченный набор внешних источников излучения для наземной флоры и фауны [31]. С одной стороны, вопрос расширения числа изучаемых видов очевиден, поскольку представители биоты чрезвычайно разнообразны и могут оказаться нестандартными объектами при моделировании [32, 33]. Из-за сложности морфологии, внутренней структуры и плотности организма оценка мощности дозы, полученная с помощью гомогенной модели, может быть слишком упрощенной [34]. С другой стороны, все еще остается открытым вопрос о том, сможет ли увеличение числа видов повысить радиационную защиту окружающей среды [35]. Чаще всего, независимо от изучаемого организма, мощность поглощенной дозы (МПД) связана с инкорпорированными радионуклидами, и в первую очередь это касается ^3H [36]. Поэтому предполагается, что для оценки радиоэкологических рисков представителей разных таксономических групп, в том числе находящихся под угрозой исчезновения, достаточно использовать уже обозначенные в Публикации 108 МКРЗ [31] референтные виды растений и животных [35].

Развивая идеи Н.В. Тимофеева-Ресовского об элементарных биологических структурах и явлениях на разных уровнях комплексности жизни в биосфере (молекулярно-клеточный, организменный, популяционный, экосистемный и биосферный) [37], в последние десятилетия рабочие груп-

пы Международного союза радиоэкологов (МСР), основываясь на данных, связанных с риском для отдельных организмов, обосновывают необходимость добавления популяционного и экосистемного подходов к набору инструментов, доступных для управления радиационной безопасностью [38–43]. К настоящему времени научными коллективами разных стран накоплены значительные данные о миграции разных форм и соединений ^3H в окружающей среде [1, 44–46], метаболизме и накоплении биотой [47–53], разработаны модели для оценки мощности поглощенной дозы трития [54–59]. На лабораторных животных достаточно подробно изучено поступление разных форм и соединений трития в организм, распределение их в органах и тканях, пути выведения, токсичность для разных биологических уровней и относительная биологическая эффективность (ОБЭ) [59].

Дефицит технологий снижения поступлений ^3H в окружающую среду с радиоактивными сбросами и выбросами АЭС, нерешенные проблемы утилизации тритийсодержащих отходов [60], внедрение объектов новой ядерной техники [5], сброс в северную часть Тихого океана сточных вод [61], загрязненных ^3H и другими радионуклидами в результате аварии на Фукусиме в 2011 г., повышают риски потенциального переноса нуклидов, их накопления разными компонентами природных экосистем и действия на биоту. Это актуализирует тритиевую тематику на ближайшие десятилетия.

Цель настоящей работы – анализ подходов в дозиметрии, обобщение данных по методологии оценки доз для эталонных видов растений и животных, испытывающих действие разных форм и соединений ^3H , в ходе лабораторных экспериментов и полевых наблюдений, поиск пробелов в знаниях.

МЕТОДОЛОГИЯ

1. Поиск и отбор источников

Поиск данных для обзора проведен по ключевым словам «tritium», «третий» в системах Google Scholar, Scopus, Web of Science, PubMed, агрегирующих на своих официальных веб-страницах опубликованные тезисы конференций, статьи в сборниках и журналах, монографии и другие типы публикаций разных издательств, с последующим просмотром рефератов и полных текстов. Одновременное использование нескольких баз данных обусловлено их разной специализацией, преимуществами или недостатками [62]. Кроме

того, просматривали списки литературы в публикациях на сопряженные темы, личные и лабораторные веб-страницы.

2. Релевантность и анализ данных

Исследованию присваивали статус «содержит методику расчета и/или информацию о дозе облучения» в случае опубликованной величины мощности дозы облучения (рад/ч или Гр/ч) или дозы облучения (рад или Гр). Если в публикации были указаны только сведения об удельной активности (мкКи/мл, кБк/мл) используемых в экспериментах форм и соединений трития, т.е. только токсикологические характеристики, исследованию присваивали статус «не содержит методику расчета и/или информацию о дозе облучения». Смешанными считали исследования, в которых содержались сведения о проведении лабораторных экспериментов на полевом материале (дикие виды растений и животных) или об использовании в ходе работы НТО и ОВТ из природных источников.

При расчете доли исследований с оценками дозовых нагрузок трития за единицу принимали биологический вид и число экспериментов, т.е. если в одной публикации участвовали две конечные точки или более (в данном случае — референтные виды) или различные условия воздействия (формы и соединения трития), их считали отдельными исследованиями. Согласно ICNafp [63], латинские названия таксонов в статье обозначены курсивом независимо от их рангов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Методология оценки доз облучения трития на разных уровнях биологической организации

Точная дозиметрия чрезвычайно важна при изучении потенциального воздействия экологически значимых радионуклидов, к которым относится ^3H . Исследования, содержащие сведения о методах расчета и величине дозы у референтных видов растений и животных в ходе лабораторных экспериментов и натурных наблюдений, можно рассматривать на разных уровнях биологической организации.

1.1. Молекулярно-клеточный уровень

В 50–80-е годы прошлого столетия для изучения разнообразных процессов жизнедеятельности клетки (метаболизм нуклеиновых кислот; организация и дупликация хромосом; датировка

времени возникновения нейронов в эмбрионе; обновление гонад и др.) использовали меченные тритием биохимические субстраты, в частности ^3H -тимидин [64–67]. В некоторых работах МПД рассчитывали на основании количества распадов ^3H на ядро, исходя из того, что на один распад, зафиксированный автордиографической пленкой, приходится 143 распада ^3H . Эффективность автордиографии в этом случае составляла менее 1% [68], в других — около 5% [64]. Теоретические обоснования расчета МПД от внутриядерного ^3H -тимидина были опубликованы в исследовании [69]. На основании микроскопической анатомии внутриядерные источники излучения рассматривали, скорее, как точечные, чем как распределенные равномерно. Поэтому формулы для расчета дозы, предполагающие однородное распределение поглощенной энергии, не считались приемлемыми [70].

В более поздних исследованиях моделирование дозы облучения на клеточном и субклеточном уровнях чаще всего проводили на основании концентрации НТО в окружающей среде, средней энергии β -частиц при распаде ^3H (0.057 МэВ), коэффициента преобразования МэВ в Дж [71], массы критического органа или объекта воздействия [72, 73] и ряда допущений (рис. 2):

1) концентрация НТО в 1 мкКи/мл дает мощность поглощенной дозы 0.291 рад/день (2.91 мГр/день) [74];

2) вода составляет 70–80% [74] или 80–90% [75] мягких тканей и клеток [76] и 20% твердых тканей [73]; она содержит 11% водорода [75]; содержание воды в клетках млекопитающих составляет 0.68–0.92 мл/г [77];

3) размер клеток (диаметр около 5 мкм) значительно превышает среднюю длину пробега β -частиц ^3H в тканях [75, 78];

4) ^3H распределен в клетке/организме равномерно в течение всего периода воздействия [74, 75], в том числе в виде ОВТ и прекурсоров [79];

5) в клетке/организме не наблюдается превышение концентрации ^3H выше равновесного уровня ^3H в воде, т.е. коэффициент накопления для разных организмов равен 1 [80–85], 0.6–0.7 [73, 86–90] или 0.18–0.23 [91];

6) тритий распределен только в водной части клетки [92];

7) коэффициент для оценки дополнительной дозы трития, включенного в неводные компоненты клеток, составляет 0.3 [74, 75, 93–95];

8) период полувыведения ^3H составляет 2.3–3.5 дня [96–99] на основании уравнения, указанного в справочнике [71].

Таким образом, формулы для расчетов мощности МПД от трития с учетом времени воздействия могут иметь следующий вид:

$$D_{\beta} = DCC \times \varepsilon_{\beta} \times C_T,$$

$$D_{\beta} = DCC \times \varepsilon_{\beta} \times C_E,$$

где D_{β} – мощность поглощенной дозы (Гр/ч); DCC – коэффициент преобразования дозы; ε_{β} – средняя энергия β -излучения ^3H , равная = 5.7 кэВ; C_T – удельная активность ^3H в клетках, тканях или органах (Бк/г); C_E – удельная активность ^3H в окружающей среде (Бк/кг, Бк/л).

При анализе воздействия ионизирующего излучения на биологические объекты, имеющие микроскопические размеры (клетки, субклеточные структуры), важную роль играет квантовый характер потери энергии заряженными частицами и связанный с этим статистический характер распределения энергии [100]. Анализ флуктуаций энергии является предметом исследования микродозиметрии. Он позволяет дать количественную характеристику неравномерности выделения энергии в равномерно облученном веществе. Микродозиметрия обычно оперирует параметром удельной энергии (z) – отношение энергии, переданной малому объему вещества, к весу этого объема [101]. Поскольку величина z отрицательно зависит от объема и дозы облучения и положительно от линейной передачи энергии ионизирующих частиц, то вероятностный характер поглощения приводит к большим флуктуациям величины [102].

Анализ опубликованных результатов показал, что оценка дозы облучения при воздействии трития на молекулярно-клеточном уровне является

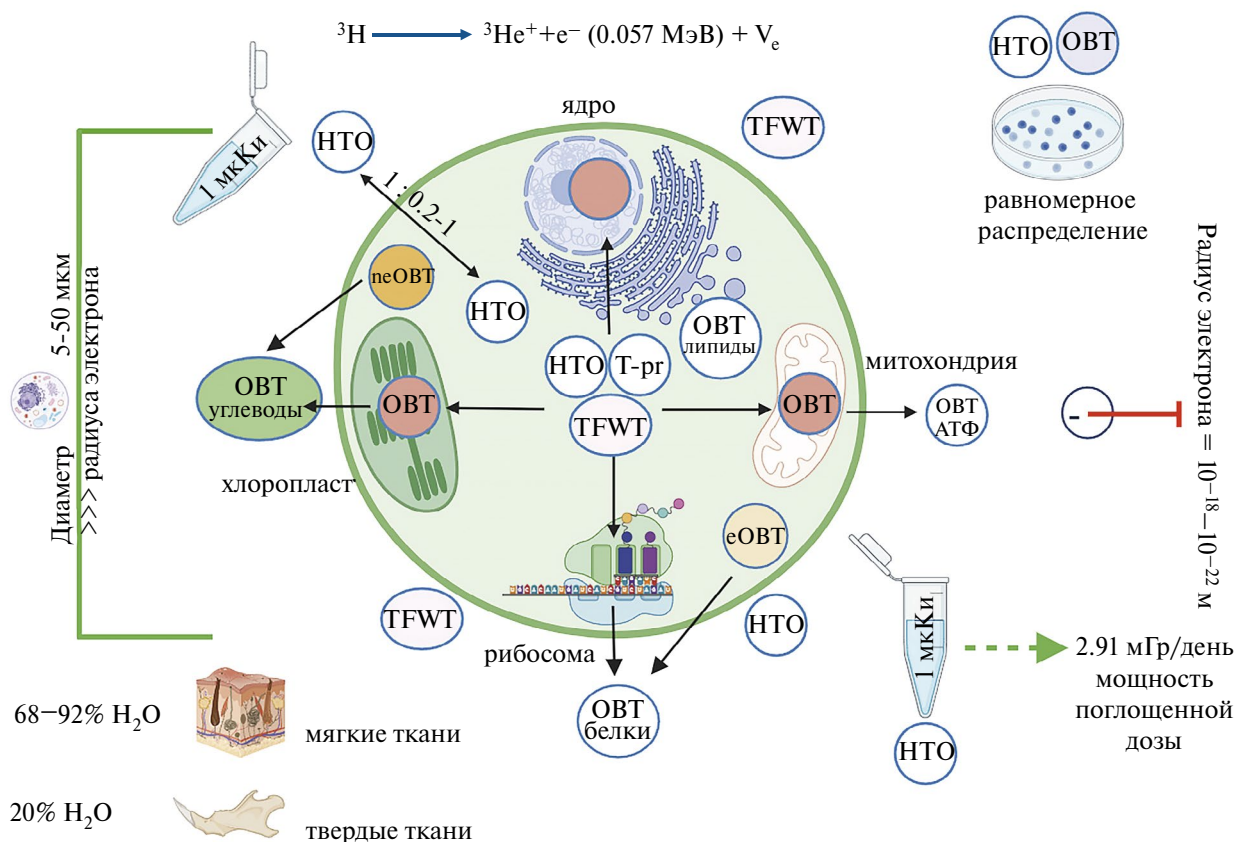


Рис. 2. Концептуальная схема оценки мощности поглощенной дозы от трития: НТО – тритиевая несвязанная вода; TFWT – тритий свободной воды тканей; T-Pr – меченные ^3H прекурсоры; OBT – органически связанный ^3H ; eOBT – обменная форма OBT; neOBT – необменная форма OBT.

достаточно сложной и до настоящего времени окончательно не решенной проблемой [12, 57]. ^3H излучает электрон (β -частицу) с низкой энергией, поэтому его внешнее воздействие можно не учитывать при расчете МПД [103, 104]. Поскольку ^3H может концентрироваться либо в цитоплазме, либо в ядре клетки, то распределение ^3H в субклеточных структурах зависит от его химической формы. Так, результаты моделирования с помощью биофизического кода PARTRAC (табл. 2) показали, что для равномерно распределенного в цитоплазме, но не прошедшего сквозь мембрану ядра ^3H поглощенная ядром доза может составлять лишь 15% от дозы всей клетки [105]. По данным [106], когда источник излучения и мишень расположены в ядре, различия в расчетах МПД не превышают 5% от значений, опубликованных Комитетом по медицинской внутренней дозиметрии США (MIRD) [107]. Если же ^3H расположен в цитоплазме, различия в расчетах могут достигать 10–20%, а при сравнении результатов моделирования методом Монте-Карло с данными MIRD – около 30% [106].

Поскольку разнообразие форм и размеров организмов в природе очень велико, использование при расчете МПД для каждого типа организмов методов Монте-Карло является чрезмерно затратным. Это мотивировало группу исследователей создать модель, позволяющую рассчитывать поглощение энергии от инкорпорированных β -излучателей в животных различной геометрии при условии равномерного распределения изотопа [108]. Микродозиметрическое моделирование для ^3H , однородно распределенного в среде в виде НТО и связанного с биологически важными молекулами в форме ОБТ размером от 10 нм до 2 мм, выявило, что средние линейные энергии дозы ОБТ примерно в 1.7 раза выше, чем НТО [122]. Образование двойных разрывов хромосом (DSB) может также значительно варьировать у разных биологических систем (плазмидная ДНК, дрожжи, культура клеток китайского хомячка, фибробласты человека) и клеточных сред даже в условиях равномерного распределения ^3H [123].

Вторая проблема при оценке мощности поглощенной дозы на клеточном уровне связана с короткой длиной пробега β -частиц при распаде инкорпорированного ^3H по сравнению с размерами биологических мишеней. Это приводит к тому, что в периферически расположенных хромосомах DSB происходят чаще, чем в центральных молекулах [105]. В таких условиях повышается риск пере- или недооценки дозы, полученной

ядром, и, следовательно, ожидаемых биологических эффектов. Поэтому нанодозиметрия является логическим продолжением микродозиметрии, позволяющей с помощью разработанных экспериментальных и численных методов охарактеризовать структуру трека частиц по распределению вероятности ионизационных кластеров в целевом объеме, которые по массе на единицу площади эквивалентны нанометрическому объему конденсированного вещества (небольшому участку ДНК) [124].

Наибольшие отклонения от общепринятой дозиметрии характерны для ^3H , распределенного гетерогенно [105]. Показано, что для типичной клетки (радиус ≈ 10 мкм) и ядра (≈ 5 мкм) ^3H , сконденсированный в ядре, создает более высокую ОБЭ-взвешенную МПД, чем ^3H , распределенный в клетке равномерно. При этом равномерно распределенный в клетке ^3H создает поглощенную дозу выше, чем ^3H , равномерно распределенный в тканях [121]. Поэтому для гетерогенно распределенного ^3H , представленного в разных формах и соединениях, необходимо использовать клеточные и микродозиметрические модели, позволяющие оценить дозы и ОБЭ для клеточного ядра [121, 125]. При этом объем ядра является определяющим фактором для расчета дозы клеточного ядра, в то время как его форма имеет второстепенное значение [106].

1.2. Организменный уровень

Растения могут поглощать НТО из почвы (корневой способ поступления) и влаги воздуха (аэральный способ через листья), а затем с помощью фотосинтеза [126, 127] превращают TFWT, содержащуюся в тканях, в обменные (еОБТ) и необменные (неОБТ) формы и соединения органически связанного трития. Однако до сих пор не совсем ясен путь передачи НТО из почвы к растению в динамике [128], нет четкого понимания связи между еОБТ и неОБТ [129], отмечается высокая изменчивость соотношения ОБТ/НТО от динамически меняющихся погодных условий [130], кислотности почвы, типа сельскохозяйственной культуры, генотипа, стадии развития растений, продолжительности, времени и условий воздействия [7, 112]. Эти и другие нерешенные вопросы увеличивают неопределенности при расчете и моделировании МПД от трития для референтных групп организмов, в том числе при оценке доз в пищевых цепях.

Немногочисленные расчеты МПД от трития в форме НТО для водных цветковых растений и

Таблица 2. Программы и модели, позволяющие оценить мощность поглощенной дозы от ^3H на разных уровнях биологической организации

Название модели	Краткое описание программы или модели	Ссылки на источник литературы
MELWA (Monoenergetic ELections in Wild Animals)*	Модель экспресс-расчета поглощения энергии от источников моноэнергетических электронов, равномерно распределенных в тканях животных сферической, эллипсоидной и цилиндрической геометрии, обитающих в дикой природе. Предложенные уравнения не связаны с методами Монте-Карло, не содержат подгоночных параметров и не требуют интерполяции между расчетными точками	[108]
COOLER (COmputation Of Local Electron Release)	Программа используется для исследования геометрии клеток и влияния полного спектра β -распада ^3H на значения поглощенной дозы (S) в целевой области (ядро клетки) за 1 распад в исходной области (ядро, цитоплазма или культуральная среда) и на относительную биологическую эффективность (ОБЭ) НТО для выживания клеток при аналогично высоких мощностях дозы. Программа осуществляет математическую свертку значений двух членов: 1) положение источников β -частиц (место распада ^3H); 2) плотность выделяемой энергии как функции радиального расстояния от точечного источника	[109, 110]
CROPTRIT (TRItium in agricultural CROPs)	Комплексная модель исследовательского уровня с акцентом на почву и баланс поглощения ^3H в системе «воздух–растение» и «почва–растение» в агроценозах	[111, 112]
EDEN (Elementary Dose Evaluation for Natural Environmen)	Код представляет собой инструмент Монте-Карло, который оценивает коэффициент преобразования дозы (DCC) на основе двух основных предположений: 1) любой организм имеет геометрию эллипсоида, определяемую тремя осями; 2) все характеристики, определяющие любой источник радиации (плотность, элементный состав, радионуклидный состав, концентрации), считаются однородно распределенными по всему объему. Все необходимые данные определяются пользователем, за исключением спектроскопических данных (вносятся из базы данных)	[113–116]
ERICA	Программа для расчета МПД у референтных видов организмов, обитающих в водных и наземных экосистемах, на основе измеренной или смоделированной удельной активности радионуклидов в окружающей среде. Ключевыми параметрами модели являются отношение активности нуклидов в организме к активности в среде ($CR_{\text{wo-media}}$), коэффициент распределения (K_d), т.е. отношение активности в отложениях к активности в воде, и DCC, т.е. МПД на единицу активности в организме или среде. При расчете дозы используется весовой коэффициент ОБЭ, равный 3 для ^3H	[26, 29, 30]
FDMH (Tritium Food Chain and Dose Module)	Модуль в системе RODOS для оценки миграции ^3H по пищевой цепи (НТО) и расчета дозовых нагрузок от загрязнения воздуха и осадков над сельскохозяйственными растениями. Учитывает почасовые метеорологические данные и суточные циклы	[117]
Genmod-PC	Код позволяет провести внутреннюю дозиметрию от разных форм ^3H и ^{14}C у человека с учетом дозовых коэффициентов согласно биокинетическим и компартментным моделям на уровне организма	[55]
GEANT4 (GEometry ANd Tracking)	Комплексная модель на основе GEANT4 для прогнозирования значений поглощенной фракции элементарных частиц и γ -фотонов в веществе сферической, эллипсоидной и цилиндрической геометрии с использованием методов Монте-Карло	[118]
HCNO-S и HCNO-C	Физиологические и дозиметрические подходы к биохимической модели дозиметрии при поступлении ОБТ с пищей	[54, 119]
NEWTRIT	Модель позволяет оценить все возможные пути формирования дозы от атмосферных выбросов ^3H с учетом преобразования НТ в НТО, а также НТО в ОБТ. Она учитывает соотношение $^3\text{H}/\text{H}$ в каждом компоненте окружающей среды и процессы разбавления при переходе ^3H по пищевым цепям	[120]

Таблица 2. Окончание.

Название модели	Краткое описание программы или модели	Ссылки на источник литературы
PARTRAC	Биофизический код Монте-Карло, который позволяет моделировать треки электронов и фотонов с энергией 10 эВ–100 МэВ, а также треки протонов и более тяжелых ионов в нерелятивистском режиме. Мишенью является геном интерфазных клеток человека, структурированный на 6 уровнях организации ДНК (пара дезоксинуклеотидов, двойная спираль, нуклеосома, фибрилла хроматина, петли волокон хроматина и хромосомы)	[105]
PENELOPE (PENetration and Energy LOss of Positrons and Electrons)	Код позволяет рассчитать МПД, которая зависит от геометрии клетки, линейной передачи энергии и спектра флюенса электронов при равномерном и гетерогенном распределении ^3H в клетке, на мембране, цитоплазме или клеточном ядре	[121]

* Предлагаемое нами оригинальное название модели.

водорослей были проведены на следующих основаниях: 1) удельной активности ^3H в среде обитания и рассчитанного коэффициента дозового преобразования DCC (3.29×10^{-6} мкГр/ч на Бк/мл) [116] с допущениями, что ^3H в организме находится в равновесии со средой обитания [131]; 2) мощности дозы общего ^3H с учетом связанного с тканями ^3H [73]; 3) времени воздействия, средней энергии распада β -излучения, удельной активности ^3H в питьевой воде, расхода питьевой воды, коэффициента передачи в критическом органе, эффективного периода полураспада и массы тела при допущении, что ^3H в организме распределен равномерно [72]. Для меченных тритием биохимических субстратов МПД рассчитана на основании количества распадов ^3H , зафиксированных автордиографической пленкой [68].

У всех групп животных ^3H может попадать в организм при вдыхании, через кожу и проглатывании. Большая часть внешнего радиационного воздействия от ^3H может быть заблокирована эпидермисом животных, поскольку максимальная дальность его излучения составляет около 5 мм в воздухе и 0.6 мкм в ткани [126]. В организм животных ОВТ поступает с пищей разного происхождения: 1) от первичных продуцентов (растения); 2) более высоких трофических уровней, консументов разного порядка [132]. Предполагается, что при попадании в организм животных ^3H -тимидина тритий распределяется по органам и тканям равномерно [133]. Аналогичные данные приводятся и для других соединений трития [72]. Показано, что при пероральном поступлении наибольшее количество ^3H -тимидина обнаруживается в мышцах (32.5%) и желудке (19.5%). Экскреция из организма ^3H -тимидина происходит медленнее, чем НТО, что способствует формированию тканевой дозы за

счет ^3H -тимидина, в 28 раз превышающую дозу от НТО [133].

Расчеты МПД от разных форм и соединений ^3H у моллюсков, рыб и млекопитающих (см. табл. 2) выполнены с помощью следующих компьютерных программ: COOLER [110]; EDEN [113–116, 134–138], использующей DCC, равный 3.29×10^{-6} мкГр/ч на Бк/мл [139], с оценкой интернализации ^3H [82–85, 134, 137, 140]; ERICA [26, 30, 134, 141–144]. Для всех программ и моделей в целом применимы допущения, указанные для молекулярно-клеточного уровня (см. рис. 2).

С более подробной информацией об опубликованных к настоящему времени исследованиях в области дозиметрии трития у разных референтных групп можно ознакомиться в Приложении. Отметим лишь, что в работе [30] проведено сравнение четырех способов расчета МПД от ^3H для водных беспозвоночных: 1) преобразование активности ^3H , содержащегося в морской воде, в МПД с фиксированными параметрами; 2) использование для расчетов МПД только активности ^3H , содержащегося в морской воде; 3) использование расчетных концентраций ^3H всего организма (woTAC), включающих в себя активность ^3H в сухой массе и расчетную активность TFWT, содержащегося в морской воде; 4) использование измеренных woTAC, включающих в себя активность ^3H в сухой массе и расчетную активность TFWT, содержащегося в морской воде. Показано, что методы расчета 3 и 4 рекомендуются для радиоэкологических исследований, поскольку они дают значения для отдельных животных и не зависят от оценки коэффициентов накопления. Первый способ расчета может быть использован, если измеренные woTAC недоступны. Поскольку существуют технические сложности

для точного измерения TFWT, авторы [30] рекомендуют в исследованиях водных беспозвоночных измерять концентрации ^{3}H в сырой массе и использовать эти данные для расчетов в ERICA.

1.3. Надорганизменные уровни

Оценка МПД от трития на уровне популяций, видов и их сообществ в настоящее время не разработана и полностью основана на дозиметрии молекулярно-клеточного и организменного уровней.

2. Основные направления исследования в области кинетики трития

В данном разделе представлен анализ исследований, посвященных кинетике ^{3}H , т.е. закономерностям протекания метаболических реакций во времени, зависимости этих закономерностей от внешних и внутренних факторов, а также преобразовании в живых организмах неорганических соединений ^{3}H в органические. Частично эти вопросы обсуждаются в первой части исследования [5]. Понимание закономерностей кинетики ^{3}H необходимо для дальнейших расчетов МПД с помощью компартментных биокинетических и воксельных моделей.

Результаты исследований в области кинетики трития представляют собой анализ экспериментальных данных на модельных объектах. Большинство работ проведено на клеточных культурах и лабораторных животных (см. Приложение). Гораздо меньше исследований растений: в качестве объектов чаще всего используются сельскохозяйственные виды из-за их коммерческого использования в качестве кормов для животных и пищи для человека. Единичные работы выполнены на бактериальных клетках. Так, в работе [145] на примере несерных пурпурных фотосинтезирующих бактерий *Rhodospseudomonas spheroides*, выращенных на среде с НТО (Ки/л), было обнаружено превышение коэффициента накопления ^{3}H в растущих клетках по сравнению с нерастущими. Значительное количество связанного ^{3}H накапливалось в виде пeOBT в растущих клетках и eOBT в нерастущих. На примере *Dunaliella salina* было показано [126], что высокая концентрация микроводорослей снижает скорость фотосинтеза, что приводит к замедлению накопления OBT (Бк/кг).

У сельскохозяйственных растений (дайкон *Raphanus sativus* var. *hortensis*, капуста *Brassica oleracea* var. *capitata*, ежа *Dactylis glomerata*, рис *Oryza sativa* subsp. *japonica*, яблоня *Malus domestica*,

редис *Raphanus sativus* var. *sativus*) продуктивность OBT была рассчитана согласно модели фотосинтеза, связанной с отношением C/H [146]. Так, соотношение C/H уменьшалось в процессе культивирования и варьировало в пределах 7–6, при этом скорость снижения C/H у разных видов не совпадала. При исследовании поглощения разных форм и соединений трития (НТ или НТО) тканями кукурузы, картофеля и райграса [147] было обнаружено, что инкорпорирование OBT (Бк/г) в листьях растений после обработки НТО было выше, чем после воздействия НТ. Период полувыведения OBT из листьев составил 10 дней, однако потери ^{3}H после воздействия НТ были больше, чем после НТО. При этом стебли не только содержали изначально меньше ^{3}H , чем листья, но и теряли его медленнее, особенно после воздействия НТ. Поскольку при выращивании тимopheевки в условиях паров НДО были показаны [148] различия по содержанию OBT в побегах и стернях (нижняя остаточная часть стеблей), рекомендуется использовать два компартмента (верхняя и нижняя части побега) при оценке переноса OBT от тимopheевки к домашнему скоту. Отметим также, что НТ проникал в более глубокие слои почвы быстрее, чем НТО, и превращался в НТО, доступную для растений [147].

Изотопное фракционирование водорода представляет собой серьезную проблему радиационной защиты [8]. Оно показывает, существует ли возможность его концентрирования в клетке, органе, организме или экосистеме. Более того, размеры и количество возможных источников водорода приводят к очень быстрому разбавлению ^{3}H , поскольку организм обитает в открытой среде. Это разбавление увеличивается по всей пищевой цепи и, следовательно, компенсирует возможные эффекты фракционирования. Другой аспект кинетики, связанный с ассимиляцией ^{3}H в тканях, описан в работе [149]. Если соотношение H/ ^{3}H одинаково для TFWT и OBT, то употребление пищи растительного и животного происхождения, содержащей пeOBT, может привести к увеличению МПД по сравнению с eOBT и TFWT из-за более длительного биологического полураспада пeOBT, что способствует увеличению DCC у TFWT в 2 раза. Доза, обусловленная приемом внутрь OBT, может быть в 2 раза выше, чем сопоставимое потребление НТО [132, 150]. Отметим, что OBT в растениях и животных часто имеет более высокие удельные концентрации ^{3}H , чем TFWT. Возможно, это связано не с эффектом обогащения ^{3}H , а с невозможностью достичь равновесных условий в природной среде. Однако

считается [151], что даже с учетом ОВТ радиационное воздействие ^3H в среднем составляет менее 1×10^{-6} Зв/год, что соответствует менее 1% от облучения ^{40}K .

Существующие в настоящее время биокинетические и дозиметрические модели МКРЗ по ^3H у разных групп животных модернизируются на основе современных биокинетических экспериментальных данных, особенно для новых химических форм ^3H [4]. Биокинетические модели представляют собой набор компартментов (разные органы и ткани), различающихся скоростью накопления, распределения и клиренсом ^3H путем экскреции [152]. Компартменты связаны между собой путями переноса. Математически модель преобразуется в набор дифференциальных уравнений первого порядка, решение которых дает предсказанное моделью удержание и выделение радионуклидов [153]. Разработаны модели не только для НТ, НТО и ОВТ, но и для материалов с низкой растворимостью. Сравнение дозиметрических и биокинетических разнотипных (компаратментных) моделей для ОВТ и НТО, а также дозовые коэффициенты подробно изложены в отчете НКДАР [4]. МКРЗ использует три основные биокинетические модели для оценки доз от соединений, содержащих тритий [154–158]:

1) модель всасывания трития в кровь в виде НТО после приема внутрь или вдыхания, применяемая также к другим соединениям, меченым тритием, которые частично превращаются в НТО после попадания в организм;

2) модель всасывания трития в кровь после приема ОВТ, в основном при приеме внутрь с пищей, но также применима к вдыханию неспецифических органических молекул, проглатыванию или вдыханию некоторых специфических тритиевых органических соединений;

3) общая модель МКРЗ для дыхательных путей человека, определяющая значения параметров абсорбции при вдыхании малорастворимых форм и соединений трития.

Поскольку неопределенность при действии облучения на референтные организмы больше, чем при расчете дозы, некоторые исследователи не рекомендуют разрабатывать более реалистичную методологию расчета дозы. Однако из-за сложности морфологии, внутренней структуры и плотности организма МПД, рассчитанная с

помощью однородной модели, может оказаться слишком упрощенной [34].

Описанные выше модели расчета доз не учитывают дифференцированного депонирования ОВТ и НТО по органам и тканям, в то время в работе [12] показано, что эффективная доза, обусловленная поступлением ОВТ, может в 2 раза и более превышать величину, спрогнозированную с помощью действующих моделей расчета дозы. Эти данные хорошо согласуются с результатами других исследований, использующих компартментные модели, биокинетика которых основана на окислении глюкозы, жирных кислот и аминокислот и образовании воды, углекислого газа и мочевины. Так, с помощью модели [119] были оценены размеры пула и скорость переносимого Н в процессе биохимических реакций. Дозовый коэффициент для потребления НТО был примерно на 8% больше рекомендованного МКРЗ, а ОВТ – в 1.2 раза. Если принять во внимание состав отдельных органов, то дозовый коэффициент для приема НТО примерно на 22% больше, чем значение МКРЗ. Большая часть (более 90%) поступившего в организм ОВТ окисляется и выводится в виде НТО, что физиологически более точно, чем текущая модель ОВТ МКРЗ [54]. Кроме того, на примере камбалы *Paralichthys olivaceus* было показано [159], что на величину МПД при моделировании метаболизма дейтерия в мышцах, кроме элиминации ОВД путем катаболизма, необходимо учитывать образование ОВД из НДО и употребление в пищу корма с естественным содержанием ОВД. Биологический период полувыведения ОВД составил 133 дня, что больше периода полувыведения ТФВТ из мышц [159]. На крысах и овцах для быстрых и медленных компонентов мышц получены аллометрические зависимости периода полувыведения ^3H , которые могут быть использованы при разработке биокинетических моделей [160]. Таким образом, неопределенности дозовых коэффициентов для НТО меньше, чем для ОВТ [58]. Поэтому общее представление, предлагаемое МКРЗ при оценке доз, может не в полной мере подходить для соединений трития в виде ОВТ, например содержащихся в рыбе.

Модели воксельного фантома имеют преимущество по сравнению с простыми геометрическими формами (сферической, эллипсоидной и цилиндрической) при использовании в дозиметрии модельных организмов [34]. В обеих моделях (геометрическая и воксельная) для расчета МПД обычно применяются методы Монте-Карло (см. табл. 2). Однако в воксельном моделировании

используется трехмерная копия организма с точным составом ткани и распределением источников облучения. Эти характеристики повышают точность дозиметрии и могут уменьшить неопределенность при изучении последствий действия радиации у референтных видов растений и животных при попытке ответить на вопрос, где и как возникают радиобиологические эффекты на популяционном уровне.

3. Оценка наличия данных о мощности поглощенной дозы от трития у референтных видов растений и животных

В Приложении представлено обобщение данных 230 публикаций, в которых различные соединения трития и частично дейтерия выступают в качестве источника ионизирующего облучения для разных представителей водных и наземных экосистем (млекопитающие; птицы; земноводные; рыбы; насекомые; планктонные ракообразные; моллюски; кольчатые черви; деревья, травы, кустарники и сельскохозяйственные растения; макрофиты; водоросли харовые, зеленые, диатомовые, синезеленые, красные; мхи и лишайники; грибы; бактерии и вирусы) в ходе лабораторных и полевых экспериментов. Наибольшее число работ по дозиметрии ^3H (рис. 3) представлено в группах млекопитающих (32.6%), травянистых дикорастущих, сельскохозяйственных растений (в том числе — овощных культур) и кустарников (18.8%), а также рыб (13.5%). Чрезвычайно мало данных по деревьям, мхам и лишайникам, бактериям, моллюскам, высшей водной растительности, водорослям. Полностью отсутствуют или встречаются единичные исследования по грибам, амфибиям, кольчатым червям, насекомым, ракообразным, птицам и вирусам. Ряд публикаций по тритию затрагивает определенные группы (моллюски, макрофиты, грибы, бактерии, вирусы), но такие референтные организмы не обозначены в 108-й Публикации МКРЗ [31].

По типу исследований (табл. 3, рис. 4) публикации распределились следующим образом: у вирусов, бактерий, пресноводных водорослей, насекомых и птиц были обнаружены только лабораторные эксперименты, для амфибий — полевые исследования, а для мхов и лишайников — только их сочетание (см. рис. 4). У других референтных групп также доминировали лабораторные исследования (млекопитающие, грибы, макрофиты, рыбы, морские водоросли и кольчатые черви), полевые (деревья) или их сочетание (моллюски).

В целом на долю лабораторных работ приходится 66.9% всех исследований по тритию, полевых — 11.9%, смешанных (полевые совместно с лабораторными) — 20.2% и моделирования — 1.1%.

Анализ распределения исследований по формам и соединениям трития (рис. 5) показал, что наиболее часто используемые из них — это НТО (48.5%). Для вирусов, водорослей, ракообразных, амфибий исследования были проведены только с тритиевой водой. Также она часто использовалась для бактерий (95.5%), макрофитов (84.6%), моллюсков (64.3%), рыб (63.3%) и млекопитающих (50.8%). В сходных долях были проведены исследования с мечеными тритием газами и ОВТ (12.2–15.5%). Анализ данных по дозиметрии ^3H в каждой референтной группе приведен ниже.

3.1. Вирусы

В единственной работе, посвященной вирусам, методы оценки доз не описаны (см. табл. 3 и Приложение). Приводятся концентрации экспериментальных растворов (НТО), содержащих тритий [161].

3.2. Бактерии

Данная референтная группа представлена 21 лабораторным исследованием на 8 видах: *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli*, *Photobacterium leiognathi*, *Ph. phosphoreum*, *Rhodospseudomonas spheroids*, *Rickettsia akari*, *R. mooseri* и *Streptococcus bovis* (см. табл. 3 и Приложение). В некоторых исследованиях указаны только названия родов *Thiobacillus*, *Bacteroidetes vadin* HA17, *Sphingomonas*, TRA3-20, CCM19a, Sva0081, *Desulfatiglans*, *Gamma-proteobacteria*, *Alpha-proteobacteria* [162]. В качестве источника трития в основном используется НТО, редко — ^3H -тимидин. Только в 27.3% работ встречается упоминание об оценке дозовых нагрузок. Одна из работ посвящена распределению и кинетике обменных (летучий ^3H) и необменных (входящий в состав нуклеиновых кислот ^3H) форм и соединений трития в растущих и нерастущих клетках *Rh. spheroids* [145]. Единственное исследование на уровне бактериальных сообществ представлено в публикации [162].

3.3. Грибы

Лабораторные эксперименты с природными и лабораторными объектами были проведены на представителях агариковых грибов (*Flammulina*



Рис. 3. Распределение исследований (%) по дозиметрии трития среди референтных групп организмов (исходный материал – 362 исследования). Данные о пресноводных (п) и морских (м) водорослях расположены на внутреннем и внешнем кольцах соответственно.

velutipes (Curt:Fr.) Sing., *Lentinus edodes* (Burg.) Sing.) и сахаромикетов (*Saccharomyces cerevisiae* Meyen ex E.C. Hansen 1883). В качестве источника трития в основном использовали меченные прекурсоры (^3H -аланин, $5\text{-}^3\text{H}$ -тимин, $5\text{-}^3\text{H}$ -цитозин, $6\text{-}^3\text{H}$ -ти-

мин), реже – НТ и НТО. Около 71% работ содержат сведения о методах и результатах расчета дозовых нагрузок (см. табл. 3 и Приложение). Исследование, выполненное на агариковых грибах [163], было посвящено процессам окисления НТ до НТО.



Рис. 4. Распределение публикаций по типу исследований между референтными группами организмов (исходный материал – 362 эксперимента). Доли разных типов исследований (%) обозначены разными цветами. Данные о пресноводных (п) и морских (м) водорослях расположены на внутреннем и внешнем кольцах соответственно.

3.4. Мхи и лишайники

Процессы окисления газообразного трития до НТО были также исследованы [163, 164] в ходе лабораторных экспериментов у 6 видов

мхов (*Glyphomitrium humillium* (Mitt.) Card., *Barbula unguiculata* Hedw, *Pogonatum inflexum* (Lind.) Lac., *Marchantia polymorpha* L., *Ditrichum pallidum* (Hedw.) Hampe, *Hypnum plumaeforme* Wils.) и 3 видов лишайников (*Parmelia tinctorum* Nyl., *Cladonia*

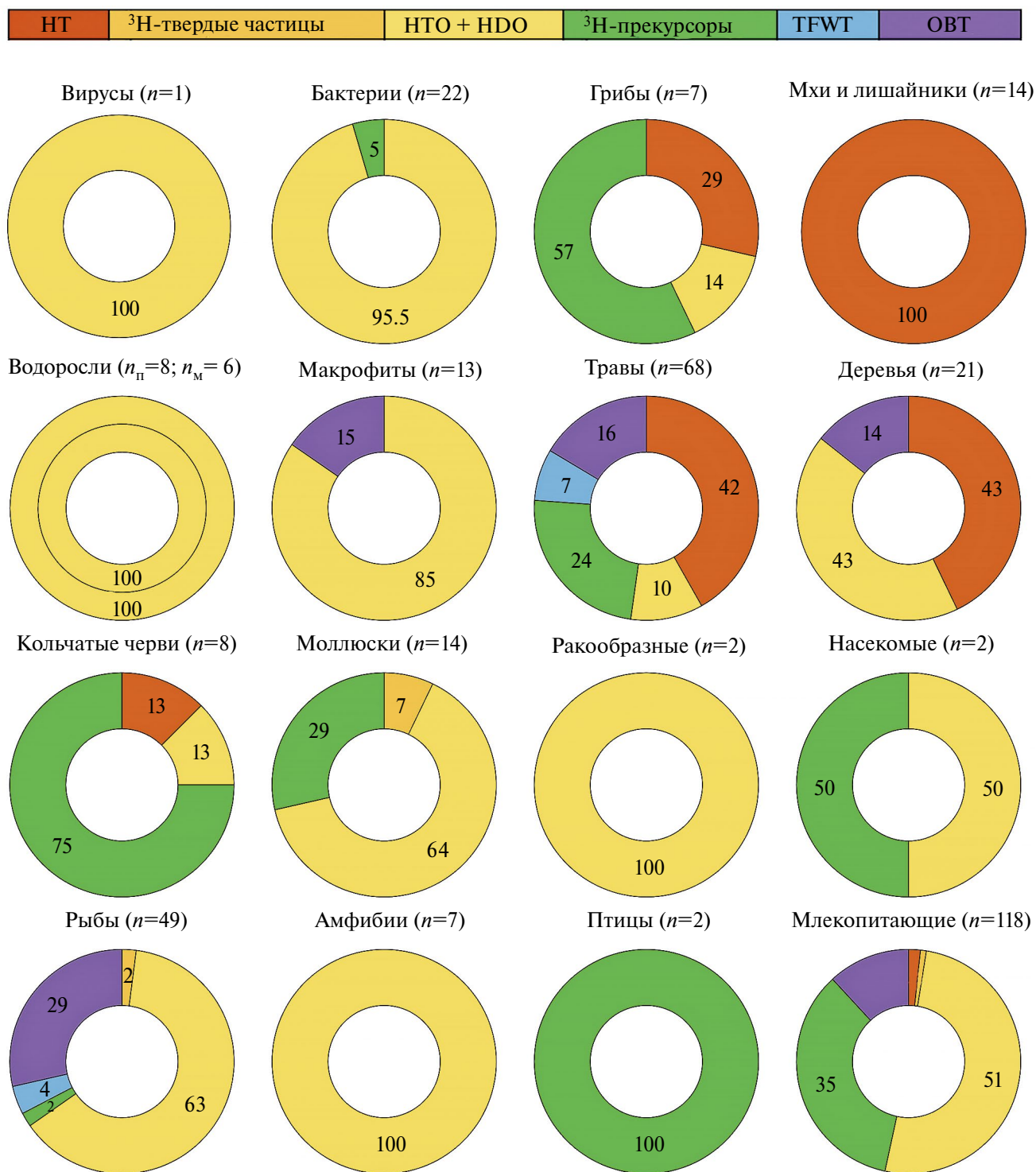


Рис. 5. Распределение исследований по формам и соединениям трития между референтными группами организмов (исходный материал – 361 исследование). Доли разных форм и соединений ^3H (%) обозначены разными цветами. Данные о пресноводных (п) и морских (м) водорослях расположены на внутреннем и внешнем кольцах соответственно.

rangiferina (L.) Web., *Cladia aggregata* (Sw.) Nyl.). Для данной референтной группы полностью отсутствуют публикации, в которых приводятся оценки МПД от трития (см. табл. 3 и Приложение).

3.5. Водоросли

Референтная группа представлена морскими (*Chaetoceros gracilis*, *Nitellopsis obtuse*,

Таблица 3. Распределение публикаций среди разных типов исследований по наличию оценок МПД от трития у референтных видов растений и животных (приводится общее число, в скобках – число работ с МПД, отнесенное к общему числу публикаций, %)

Референтные виды	Всего	Тип исследования			
		лабораторные	полевые	смешанные (полевые и лабораторные)	моделирование
Вирусы	1	1 (0%)	–	–	–
Бактерии	22	22 (27.3%)	–	–	–
Грибы	7	5 (71.4%)	–	2 (0%)	–
Мхи и лишайники	14	–	–	14 (0%)	–
Пресноводные водоросли	8	8 (37.5%)	–	–	–
Морские водоросли	6	4 (16.7%)	–	2 (0%)	–
Макрофиты	13	9 (7.7%)	3 (15.4%)	1 (0%)	–
Травы	68	27 (1.5%)	11 (0%)	30 (0%)	–
Деревья	21	4 (0%)	12 (0%)	5 (0%)	–
Кольчатые черви	8	6 (0%)	–	–	2 (25%)
Моллюски	14	–	2 (7.1%)	12 (78.6%)	–
Ракообразные	2	1 (50%)	1 (0%)	–	–
Насекомые	2	2 (50%)	–	–	–
Рыбы	49	35 (42.9%)	7 (12.2%)	7 (8.2%)	–
Амфибии	7	–	7 (0%)	–	–
Птицы	2	2 (0%)	–	–	–
Млекопитающие	118	116 (77.1%)	–	–	2 (0%)
Итого	362	242 (36.2%)	43 (2.5%)	73 (4.1%)	4 (0.6%)

Ulva prolifera) и пресноводными (*Chlamydomonas reinhardtii*, *Chlorella vulgaris*, *C. reinhardtii*) водорослями. Иногда указаны только названия родов *Leptolingbya* sp., *Synechococcus elongatus*, *Nostoc* sp. и *Anabaena* sp. [162]. В качестве источника ³H во всех лабораторных экспериментах была использована НТО (см. табл. 3 и Приложение). Для морских водорослей только в 16.7% публикаций встречается упоминание об оценке дозовых нагрузок, а для пресноводных – в 37.5%. Отметим также, что на примере зеленой водоросли *Ulva prolifera* была создана модель переноса органически связанного дейтерия – OBD [165]. Значительное накопление ОБТ микроводорослями (коэффициентами обогащения 2.1–3.4) и влияние факторов окружающей среды на этот процесс показаны в исследовании [162]. В работе [126] оценено обогащение и органификация ³H водорослями *Dunaliella salina* и перенос ОБТ по морской пищевой цепи «водоросли – рыба» и далее к человеку.

3.6. Макрофиты

В группе высших водных растений лабораторные и полевые исследования были проведены с участием *Hydrilla verticillata*, *Lemna minor*, *Pistia stratiotes*, *Spirodela polyrhiza*, *Ceratophyllum* (вид не указан) и *Vallisneria spiralis* при использовании НТО. Дозо-

вые нагрузки от трития были рассчитаны в 23.1% исследований (см. табл. 3 и Приложение).

3.7. Наземные растения (травы, кустарники, сельскохозяйственные растения)

В ходе лабораторных и полевых экспериментов исследованы следующие таксоны и группы растений:

- 1) травы: *Arundinaria pygmaea* (Miq.) Mitford, *Bambusa*, *Chenopodium album*, *Crepis capillaris*, *Dactylis glomerata*, *Eragrostis curvula* (Schrud.) Nees, *E. feruginea* (Thunb.) P. Beauv., *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Houttuynia cordata*, *Ornithogalum virens* Lindl., *Phalaris arundinacea* L., *Phleum pratense* L., *Plantago asiatica* L., *Themeda triandra* Forssk. subsp. *japonica* T. Koyama, *Tradescantia palidosa*, *Tradescantia* клон 02, *Trifolium repens* L., *Zoysia japonica* Steud.;
- 2) сельскохозяйственные культуры: *Allium cepa* L., *Brassica oleracea* var. *capitata*, *B. rapa* subsp. *pekinensis* (Lour.) Hanelt, 1986, *Cucumis sativus*, *Cucurbita pepo*, *Glycine max*, *Hordeum vulgare* L., *Oryza sativa*, *Pisum sativum*, *Raphanus sativus* L., *Triticum aestivum*, *Vicia faba* L., *Zea mays*;
- 3) кустарники: *Eurya japonica* Thunb., *Ilex pedunculosa* Miq., *Juniperus conferta* Parlat., *Lespedeza*

homoloba Nakai, *Pieris japonica* (Thunb.) D. Don, *Rhododendron obtusum* (Lind.) Planchon var. *kaempferi* (Planchon) Wilson, *Smilax china* L., *Vaccinium oldhamii*, *V. smallii* var. *glabrum* Koidz.;

4) папоротники: *Ceratopteris thalictroides*, *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn var. *latiusculum* (Desv.) Und., *Struthiopteris niponica* (Kunze) Nakai) и плауны (*Lycopodium clavatum* L. var. *nipponicum* Nakai).

В качестве источника трития использованы ^3H -уридин, ^3H -тимидин, НТ, НТО, TFWT и TBT (см. табл. 3 и Приложение). Только для 1.5% экспериментов были рассчитаны или приведены дозовые нагрузки от ^3H . В большинстве работ оценивали скорость окисления НТ до НТО, накопление растениями меченных ^3H молекул и использовали скорость синтеза ОВТ для изучения продуктивности сельскохозяйственных культур. В ряде исследований [148, 166, 167] применяли D_2O для изучения образования органических соединений дейтерия (eOBD, neOBD), в том числе для верификации кинетических и компартментных моделей. Наряду с рыбами и млекопитающими это вторая по числу исследований референтная группа.

3.8. Наземные растения (деревья)

В этой референтной группе встречались лабораторные и полевые исследования представителей широколиственных (*Alnus incana* (L.) Moench, *Malus domestica*, *Quercus laurifolia*, *Q. serrata* Murray, *Populus tremula* L.) и хвойных (*Pinus banksiana*, *P. palustris*, *P. strobus* L., *P. taeda*, *P. thunbergii* Parl.) лесов (см. табл. 3 и Приложение). Доминировали работы, посвященные изучению процессов окисления газообразного трития до НТО. Чаще всего встречались исследования по изучению накопления хвоей сосны TFWT и ОВТ из атмосферной влаги [127, 168–170] или сравнение накопительной способности ОВТ и НТО хвои и древесины [171]. Однако МПД для референтной группы деревьев не были рассчитаны.

3.9. Кольчатые черви

Встречаются работы (см. табл. 3 и Приложение), в которых меченные тритием субстраты используются в качестве инструмента для изучения метаболической активности половых желез [172] или нервной системы [173], а также развития мозга у червей [174]. Единственная работа [144] посвящена прогностической оценке доз от жидких и аэрозольных выбросов ^3H при эксплуатации

двух реакторов ВВЭР-1200. Таким образом, только 25% исследований содержало сведения о дозах.

3.10. Моллюски

Референтная группа представлена преимущественно лабораторными исследованиями 5 видов животных (*Mytilus edulis*, *M. galloprovincialis*, *Planorbis vortex*, *Pollicipes polymerus* и *Anisus vortex*) с преобладанием НТО в качестве источника трития. Несколько работ были посвящены оценке дозовых нагрузок от ^3H -глицина. В большинстве экспериментов (85.7%) были рассчитаны или приведены дозовые нагрузки от трития (см. табл. 3 и Приложение).

3.11. Ракообразные

Раздел представлен двумя лабораторными и полевыми исследованиями с участием *Artemia salina* [73] и *Daphnia magna* Str. [175]. Методы оценки доз от НТО описаны только в одной из работ (см. табл. 3 и Приложение).

3.12. Насекомые

Аналогичное немногочисленное наполнение (2 работы) касается и этой референтной группы. Данные были получены в ходе лабораторных экспериментов с *Chironomus riparius* и *Drosophila melanogaster*. В первом случае в качестве источника ^3H применяли НТО [176], а во втором — ^3H -тимидин [177]. Методы оценки доз описаны только в одном исследовании (см. табл. 3 и Приложение).

3.13. Рыбы

Наряду с наземными растениями и животными это третья по числу исследований референтная группа. Накоплены данные по 13 модельным видам рыб (*Carassius gibelio*, *Catostomus commersonii*, *Coregonus clupeaformis*, *Cyprinus carpio*, *Danio rerio*, *Esox lucius*, *Fugu niphobes*, *Ictalurus punctatus*, *Oncorhynchus mykiss*, *Oryzias latipes*, *Paralichthys olivaceus*, *Pimephales promelas*, *Salmo gairdneri*), полученных преимущественно в ходе лабораторных экспериментов. В качестве источника трития в 65% случаев была использована НТО, реже — ОВТ и TFWT (см. табл. 3 и Приложение). В сходном числе экспериментов (63%) были рассчитаны дозовые нагрузки. В ряде работ проводится сопоставление данных лабораторных и полевых исследований [136], обобщены данные по дозовым коэффициентам при проглатывании ОВТ

рыбой [58] и дозовым нагрузкам от трития для разных видов водной фауны [80].

3.14. Земноводные

В этой референтной группе в качестве объектов полевых исследований участвовали 4 вида лягушек (*Lithobates catesbeiana*, *Rana catesbeiana*, *R. pipiens*, *R. septentrionalis*). В качестве источника трития использована НТО. Методы оценки доз и сами дозовые нагрузки в работах не представлены (см. табл. 3 и Приложение). Отметим, что это исследования одного научного коллектива [178–181].

3.15. Птицы

В единичных работах, посвященных птицам и выполненным в лабораторных условиях на куриных эмбрионах [65, 182], методы оценки доз не описаны (см. табл. 3 и Приложение). В качестве источника трития использован ^3H -тимидин. Отметим, что в работе [65] меченные тритием прекурсоры использовались как метод датирования времени возникновения нейронов.

3.16. Млекопитающие

В самой многочисленной по числу исследований референтной группе лабораторные эксперименты были проведены на клетках лимфоидной лейкемии L5178Y мышей; на клетках китайского хомячка, несущих X-хромосому человека; на крысах, мышах, лошадях, обезьянах-крабодах и овцах. Источником ^3H служили меченные аминокислоты (аланин, аргинин, валин, гистидин, глутамин, лейцин, лизин, триптофан, фенилаланин), углеводы (глюкоза), прекурсоры нуклеиновых кислот (уридин, тимидин), ^3H -ДФР, ^3H -стальные частицы, НТ, НТО, ОВТ, в том числе лиофилизированное кроличье мясо и кресс-салат, содержащие ^3H и др. (см. табл. 3 и Приложение). Преобладали исследования с источником трития в виде НТО, ОВТ и ^3H -тимидина. В 77.1% экспериментов содержались сведения об оценке МПД.

4. Установление трендов и пробелов

В настоящее время научными коллективами накоплены данные о кинетике и метаболизме ^3H у флоры и фауны, разработаны подходы для оценки дозовых нагрузок на клеточном и организменном уровнях. На уровне организма это утверждение в первую очередь справедливо для эталонных групп моллюсков, млекопитающих

и рыб. Исследования дикорастущих трав и сельскохозяйственных растений, хотя и представительны, однако чаще всего направлены на изучение миграции изотопа по пищевым цепям для оценки доз у человека. При моделировании доз на уровне клеток большинство исследователей допускает гомогенное распределение разных форм и соединений ^3H (НТО и ОВТ), понимая, однако, что вероятность его неоднородной дисперсии между ядром и цитоплазмой клетки крайне высока. Это особенно важно учитывать, когда речь идет об органических и неорганических соединениях трития.

Такие нерешенные вопросы повышают степень неопределенности и вероятность получения смещенных оценок при расчете дозовых нагрузок как на уровне клетки, так и на уровне целостного организма. При переходе на более высокие уровни организации (популяции, виды и их сообщества) неопределенность и степень недооценки дозы возрастают еще больше. Разработка подходов к дозиметрии трития на уровне сообществ организмов довольно сложна и в настоящее время полностью не проработана, поскольку затрагивает сложные многоуровневые биологические системы, требующие учета множества факторов. В этом отношении использование биокинетических и воксельных моделей может способствовать повышению точности дозиметрии и снижению неопределенности на всех уровнях биологической организации.

Открытым остается также вопрос об использовании большого числа таксонов в радиоэкологических и радиобиологических исследованиях, в том числе трития. Анализ 230 публикаций, включающих 362 исследования (см. Приложение), показал, что больше половины работ (56.6%), опубликованных по референтным видам растений и животных, не содержали сведения о методах оценки доз от ^3H и значения конкретных величин МПД. При отсутствии дозиметрических оценок эффекты приходится рассматривать не в радиобиологических (доза—эффект), а в экотоксикологических (концентрация поллютанта—эффект) терминах. Такие оценки не сопоставимы между собой и представляются не совсем корректными, поскольку не в полной мере отражают степень воздействия ^3H на живые организмы и полноту оценок радиобиологических эффектов. Поэтому на данном этапе даже использование упрощенных подходов для представителей референтных групп растений и животных (простая геометрия тела с однородным

составом и плотностью, равномерное распределение в организме разных соединений инкорпорированного ^3H) может быть оправданным. Дальнейшее развитие дозиметрии эталонных видов предполагает учет особенностей их морфологии, гетерогенности внутренней структуры, плотности организма и других параметров.

5. Выводы, ограничения и перспективы на будущее

Учитывая высокую миграционную способность трития, его способность включаться в обменные процессы в биосфере и наличие разных физических форм и химических соединений, современные представления о дозиметрии ^3H на разных уровнях биологической организации не вполне однозначны. Поскольку поступление, метаболизм и распределение ^3H в субклеточных структурах, клетках, тканях и организмах является сложным и многоступенчатым процессом, зависящим от неоднородности распределения НТО и ОВТ в экологических и биологических системах, остаются полностью нерешенными следующие проблемы:

1. Необходимо свести к минимуму использование в радиобиологических исследованиях исключительно токсикологического подхода вместо оценок поглощенной дозы представителями эталонных видов флоры и фауны. Это не только будет способствовать адекватной оценке дозовых нагрузок эталонных организмов, но и приведет к общему знаменателю опубликованные к настоящему времени данные, в том числе для дальнейшего мета-анализа.

2. В моделях переноса ^3H в окружающей среде целесообразно пересмотреть некоторые параметры накопления и их значения, поскольку смоделированные оценки накопления ОВТ разными референтными видами демонстрируют большую изменчивость и представляются весьма консервативными. Это будет способствовать более точным оценкам дозовых нагрузок у биоты.

3. Отмечается фрагментарность или отсутствие данных по ряду таксонов, к которым могла быть применена дозиметрия ^3H , и неравномерность охвата разных эталонных групп, участвующих в радиоэкологических и радиобиологических исследованиях.

4. Дозиметрию ^3H у референтных организмов следует проводить с учетом дифференцированного депонирования НТО и ОВТ на уровне

органелл, клеток, тканей и органов. Это будет способствовать снижению уровня неопределенности при оценке доз и последствий хронического воздействия ^3H , в том числе в условиях действия малых доз.

5. Целесообразно обеспечить более тесное взаимодействие между лабораторными и полевыми исследованиями в радиоэкологии и радиобиологии ^3H . Полевые данные необходимы для расчета реальных сценариев облучения и изучения сочетанного влияния разных экологических факторов на природные популяции. В то же время результаты лабораторных экспериментов необходимо подтверждать наблюдениями в природе и моделированием.

6. Смещение фокуса внимания в исследованиях с организменного уровня на популяционный для совершенствования системы принятия решений в области дозиметрии ^3H и оценки радиобиологических эффектов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН (№122021000077-6). Автор благодарит канд. физ.-мат. наук К.Л. Антонова и канд. физ.-мат. наук А.А. Екидина (ИПЭ УрО РАН) за живую дискуссию, ценные замечания и рекомендации, которые существенно улучшили статью.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Дополнительные материалы доступны по ссылке <https://doi.org/10.1134/S1067413624602501>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eyrolle F., Ducros L., Le Dizès S. et al. An updated review on tritium in the environment // J. of Environ. Radioact. 2018. V. 181. P. 128–137.
2. Okada S., Momoshima N. Overview of tritium: characteristics, sources, and problems // Health Physics. 1993. V. 65. № 6. P. 595–609.

3. *Ferreira M.F., Turner A., Vernon E.L.* et al. Tritium: its relevance, sources and impacts on non-human biota // *Science of the Total Environ.* 2023. V. 876. Art. 162816.
4. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report 2016 with scientific annexes A, B, C and D. N.Y.: UN-SCEAR, 2017. 516 p.
5. *Antonova E.V., Antonov K.L., Vasyanovich M.E.* et al. Tritium from molecule to biosphere. 1. Patterns of behavior in the environment // *Russ. J. of Ecology.* 2022. V. 53. № 4. P. 253–284.
6. *Kim S.B., Baglan N., Davis P.A.* Current understanding of organically bound tritium (OBT) in the environment // *J. of Environ. Radioact.* 2013. V. 126. P. 83–91.
7. *Galeriu D., Melintescu A., Strack S.* et al. An overview of organically bound tritium experiments in plants following a short atmospheric HTO exposure // *J. of Environ. Radioact.* 2013. V. 118. P. 40–56.
8. *Le Goff P., Fromm M., Vichot L.* et al. Isotopic fractionation of tritium in biological systems // *Environment International.* 2014. V. 65. P. 116–126.
9. Investigation of the environmental fate of tritium in the atmosphere. Part of the Tritium Studies Project. Ottawa: CNSC, 2009. 104 p.
10. *Guéguen Y., Priest N.D., Dublineau I.* et al. *In vivo* animal studies help achieve international consensus on standards and guidelines for health risk estimates for chronic exposure to low levels of tritium in drinking water // *Environ. and Molecular Mutagenesis.* 2018. V. 59. № 7. P. 586–594.
11. Standards and guidelines for tritium in drinking water (INFO-0766). Ottawa: CNSC, 2014.
12. *Кочетков О.А., Монастырская С.Г., Кабанов Д.И.* Проблемы нормирования техногенного трития (обзор) // *Саратовский научно-медицинский журнал.* 2013. Т. 9. № 4. С. 815–818.
13. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы (СанПиН 2.6.1.2523-09). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
14. *Brooks A.L., Couch L.A., Chad S.A.* Commentary: what is the health risk of 740 bq l⁻¹ of tritium? a perspective // *Health Physics.* 2013. V. 104. № 1. P. 108–114.
15. ICRP Publication 26: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection // *Ann. ICRP.* 1977. V. 1. № 3. 88 p.
16. ICRP Publication 60: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection // *Ann. ICRP.* 1991. V. 21. № 1-3. 211 p.
17. ICRP Publication 92: Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q), and radiation weighting factor (W_R) // *Ann. ICRP.* 2003. V. 33. № 4. 117 p.
18. Transfer of tritium in the environment after accidental releases from nuclear facilities. Vienna: IAEA, 2014. 283 p.
19. *Howard B.J., Telleria D., Proehl G.* Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer to wildlife. Vienna: IAEA, 2014. 228 p.
20. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Technical reports. Series № 472. Vienna: IAEA, 2010. 208 p.
21. ICRP Publication 114: Environmental protection: transfer parameters for reference animals and plants // *Ann. ICRP.* 2009. V. 39. № 6. 115 p.
22. *Ewers L.W., Ham G.J., Wilkins B.T.* Review of the transfer of naturally occurring radionuclides to terrestrial plants and domestic animals. Chilton: National Radiological Protection Board, 2003. 64 p.
23. *Mills W.B., Cheng J.J., Droppo Jr. J.G.* et al. Multimedia benchmarking analysis for three risk assessment models: RESRAD, MMSOILS, and MEPAS // *Risk Analysis.* 1997. V. 17. № 2. P. 187–201.
24. *Yu C.* Modeling radionuclide transport in the environment and assessing risks to humans, flora, and fauna: the RESRAD family of codes // *Applied Modeling and Computations in Nuclear Science.* American Chemical Society, 2006. P. 58–70.
25. *Beresford N., Brown J., Copplestone D.* et al. D-ERICA: An integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation // European Commission under the Euratom Research, Nuclear Energy within the Sixth Framework Programme, 2007.
26. *Brown J.E., Alfonso B., Avila R.* et al. The ERICA tool // *J. Environ Radioact.* 2008. V. 99. № 9. P. 1371–1383.
27. *Copplestone D., Hingston J., Real A.* The development and purpose of the FREDERICA radiation effects database // *J. of Environ. Radioact.* 2008. V. 99. № 9. P. 1456–1463.
28. *Garnier-Laplace J., Copplestone D., Gilbin R.* et al. Issues and practices in the use of effects data from FREDERICA in the ERICA integrated approach // *J. of Environ. Radioact.* 2008. V. 99. № 9. P. 1474–1483.
29. *Brown J.E., Alfonso B., Avila R.* et al. A new version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals // *J. of Environ. Radioact.* 2016. V. 153. P. 141–148.
30. *Dallas L.J., Devos A., Fievet B.* et al. Radiation dose estimation for marine mussels following exposure to tritium: Best practice for use of the ERICA tool in ecotoxicological studies // *J. of Environ. Radioact.* 2016. V. 155–156. P. 1–6.
31. ICRP Publication 108: Environmental protection – the concept and use of reference animals and plants // *Ann. ICRP.* 2008. V. 38. № 4–6. 247 p.
32. *Ulanovsky A., Prohl G.* Dosimetry for reference animals and plants: current state and prospects // *Ann. ICRP.* 2012. V. 41. № 3–4. P. 218–232.

33. Antonova E.V., Pozolotina V.N. Investigation of biological-rhythm patterns: physiological and biochemical effects in herbaceous plants exposed to low-level chronic radiation. Part 1: Nonirradiated seeds // *Int. J. of Rad. Biology*. 2024. V. 100. № 7. P. 1051–1071.
34. Higley K., Ruedig E., Gomez-Fernandez M. et al. Creation and application of voxelised dosimetric models, and a comparison with the current methodology as used for the International Commission on Radiological Protection's reference animals and plants // *Ann. ICRP*. 2015. V. 44. № 1_suppl. P. 313–330.
35. Charrasse B., Anderson A., Mora J.C. et al. Does the use of reference organisms in radiological impact assessments provide adequate protection of all the species within an environment? // *Science of the Total Environ.* 2019. V. 658. P. 189–198.
36. Шевченко В.А. О перестройках хромосом, индуцированных ^3H -тимидином у *Crepis capillaris* // *Генетика*. 1971. Т. 7. № 5. С. 15–22.
37. Тимофеев-Ресовский Н.В. Некоторые проблемы радиационной биогеоценологии: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Свердловск, 1962. 46 с.
38. Bradshaw C., Kapustka L., Barnthouse L. et al. Using an ecosystem approach to complement protection schemes based on organism-level endpoints // *J. of Environ. Radioact.* 2014. V. 136. P. 98–104.
39. Horemans N., Gilbin R., Beresford N. Effects on ecosystems at Chernobyl and Fukushima: remaining controversies and future research challenges // *Lecture in: 5th Intern. Conference on Radioecology & Environmental Radioactivity*, Oslo, Norway, 4-9 September, 2022.
40. Brechignac F., Doi M. Challenging the current strategy of radiological protection of the environment: arguments for an ecosystem approach // *J. of Environ. Radioact.* 2009. V. 100. № 12. P. 1125–1134.
41. Bréchignac F. The need to integrate laboratory- and ecosystem-level research for assessment of the ecological impact of radiation // *Integr. Environ. Assess. Manag.* 2016. V. 12. № 4. P. 673–676.
42. Bréchignac F., Oughton D., Mays C. et al. Addressing ecological effects of radiation on populations and ecosystems to improve protection of the environment against radiation: agreed statements from a consensus symposium // *J. of Environ. Radioact.* 2016. V. 158–159. Supplement C. P. 21–29.
43. Garnier-Laplace J., Della-Vedova C., Andersson P. et al. A multi-criteria weight of evidence approach for deriving ecological benchmarks for radioactive substances // *J. of Radiol. Protection*. 2010. V. 30. № 2. P. 215–233.
44. Ofotsu P.M., Katayama K. A mini review of organically bound tritium in the environment // *Proc. of International Exchange and Innovation Conference on Engineering & Sciences (IEICES)*. 2022. V. 8. P. 330–334.
45. Vold E.L. A brief review of environmental transport of tritium at the Los Alamos LLRW disposal facility. Report LA-UR-94-3685, 1994. 15 p.
46. Nie B., Fang S., Jiang M. et al. Anthropogenic tritium: inventory, discharge, environ. behavior and health effects // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. V. 135. Art. 110188.
47. Cline J. Absorption and metabolism of tritium oxide and tritium gas by bean plants // *Plant Physiology*. 1953. V. 28. № 4. P. 717–723.
48. Strand J.A., Templeton W.L., Tangen E.G. Accumulation and retention of tritium (tritiated water) in embryonic and larval fish, and radiation effect // *3rd Int. Symp. of Radioecology*. Oak Ridge: U.S. AEC, 1971. 23 p.
49. Strack S., Kistner G. Biokinetic aspects of tissue-bound tritium in algae // *Current Topics in Radiation Research Quarterly*. 1978. V. 12. № 1–4. P. 133–141.
50. Patrick P. Tritium uptake kinetics in crayfish (*Orconectes immnis*). Report No 85-133-K. Ontario, 1985. 31 p.
51. Takeda H., Lu H.M., Miyamoto K. et al. Comparative biokinetics of tritium in rats during continuous ingestion of tritiated water and tritium-labeled food // *Int. J. of Radiation Biology*. 2001. V. 77. № 3. P. 375–381.
52. Hill R.L., Johnson J.R. Metabolism and dosimetry of tritium // *Health Physics*. 1993. V. 65. № 6. P. 628–647.
53. Priest N.D., Blimkie M.S.J., Wyatt H. et al. Tritium (^3H) retention in mice: administered as HTO, DTO or as ^3H -labeled amino-acids // *Health Physics*. 2017. V. 112. № 5. P. 439–444.
54. Richardson R., Dunford D. A biochemical-based model for the dosimetry of dietary organically bound tritium – part 2: dosimetric evaluation // *Health Physics*. 2003. V. 85. № 5. P. 539–552.
55. Richardson R.B., Dunford D.W. Review of the ICRP tritium and ^{14}C internal dosimetry models and their implementation in the Genmod-PC code // *Health Physics*. 2001. V. 81. № 3. P. 289–301.
56. Whillians D.W. Structure of a physiologically based biokinetic model for use in ^{14}C and organically bound tritium dosimetry // *Radiation Protection Dosimetry*. 2003. V. 105. № 1–4. P. 189–192.
57. Cox R., Menzel H.-G., Preston J. Internal dosimetry and tritium – the ICRP position // *J. of Radiol. Protection*. 2008. V. 28. № 2. P. 131.
58. Harrison J. Doses and risks from tritiated water and environmental organically bound tritium // *J. of Radiol. Protection*. 2009. V. 29. № 3. P. 335–349.
59. Silini G., Metalli P., Vulpis G. Radiotoxicity of tritium in mammals. Luxembourg: Commission of the European Communities, 1971. 36 p.
60. Семенов А.А., Заикин С.П., Филимонова Н.В. и др. Разработка составов цементобетонных смесей с использованием суперпластификаторов класса поликарбоксилатов для иммобилизации трития // *Вопросы атомной науки и техники. Серия:*

- Материаловедение и новые материалы. 2017. Т. 4. № 91. С. 95–122.
61. Sun J., Lucas M.C., Madigan D.J. Complex fish migrations call for Fukushima radioactivity monitoring beyond marine systems // *BioScience*. 2024. V. 74. № 4. P. 230–231.
 62. Falagas M.E., Pitsouni E.I., Malietzis G.A. et al. Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: strengths and weaknesses // *The FASEB J*. 2008. V. 22. № 2. P. 338–342.
 63. Turland N.J., Wiersema J.H., Barrie F.R. et al. International code of nomenclature for algae, fungi, and plants (Shenzhen code) adopted by the Nineteenth International Botanical Congress Shenzhen, China, July 2017: Koeltz botanical books, 2018.
 64. Lajtha L.G., Oliver R. The application of autoradiography in the study of nucleic acid metabolism // *Laboratory Investigation*. 1959. V. 8. № 1. P. 214–222.
 65. Yurkewicz L., Lauder J.M., Marchi M. et al. ³H-thymidine long survival autoradiography as a method for dating the time of neuronal origin in the chick embryo: The locus coeruleus and cerebellar Purkinje cells // *J. of Comparative Neurology*. 1981. V. 203. № 2. P. 257–267.
 66. Ermak T.H. Renewal of the gonads in *Styela clava* (Urochordata: Ascidiacea) as revealed by autoradiography with tritiated thymidine // *Tissue and Cell*. 1976. V. 8. № 3. P. 471–478.
 67. Taylor J.H., Woods P.S., Hughes W.L. The organization and duplication of chromosomes as revealed by autoradiographic studies using tritium-labeled thymidine // *Proc. Nat. Acad. Sci*. 1957. V. 43. № 1. P. 122–128.
 68. Wimber D.E. Chromosome breakage produced by tritium-labeled thymidine in *Tradescantia paludosa* // *Proc. Nat. Acad. Sci*. 1959. V. 45. № 6. P. 839–846.
 69. Robertson J.S., Hughes W.L. Intranuclear irradiation with tritium-labeled thymidine // *Proc. of the First National Biophysics Conference* / Eds. Quastler H., Morowitz H. J. New Haven: Yale University Press, 1959. P. 278–283.
 70. Cronkite E.P., Fliedner T.M., Killmann S.A. et al. Tritium-labelled thymidine (H³TDR): its somatic toxicity and use in the study of growth rates and potentials in normal and malignant tissue of man and animals // *Symp. on the Detection and Use of Tritium in the Physical and Biological Sciences*. Vienna: IAEA, 1962. P. 189–209.
 71. Hine G.J., Brownell G.L. Radiation dosimetry. N.Y.: Academic Press, 1956. 932 p.
 72. Synzynyns B.I., Momot O.A., Mirzeabasov O.A. et al. Radiological problems of tritium // *KnE Engineering*. 2018. V. 3. № 3. P. 249–260.
 73. Komatsu K., Higuchi M., Sakka M. Accumulation of tritium in aquatic organisms through a food chain with three trophic levels // *J. of Radiation Research*. 1981. V. 22. № 2. P. 226–241.
 74. Dobson R.L., Kwan T.C. The RBE of tritium radiation measured in mouse oocytes: increase at low exposure levels // *Radiation Research*. 1976. V. 66. № 3. P. 615–625.
 75. Dobson R.L., Cooper M.F. Tritium toxicity: effect of low-level ³HOH exposure on developing female germ cells in the mouse // *Radiation Research*. 1974. V. 58. № 1. P. 91–100.
 76. Wood T.H., Rosenberg A.M. Freezing in yeast cells // *Biochimica et Biophysica Acta*. 1957. V. 25. P. 78–87.
 77. Yamaguchi T., Muraiso C., Furuno-Fukushi I. et al. Water content in cultured mammalian cells for dosimetry of beta-rays from tritiated water // *J. of Radiation Research*. 1990. V. 31. № 4. P. 333–339.
 78. Беловодский Л.Ф., Гаевой В.К., Гришмановский В.И. Тритий. М.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
 79. Королев В.Г., Иванов Е.Л., Грачева Л.М. Изучение молекулярной природы мутаций в гене *ade2* у дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Сообщ. I. Общая схема и анализ неполярно комплементирующих мутаций // *Генетика*. 1980. Т. 16. № 2. С. 230–238.
 80. Adam-Guillermin C., Pereira S., Della-Vedova C. et al. Genotoxic and reprotoxic effects of tritium and external gamma irradiation on aquatic animals // *Rev. Environ. Contam. Toxicology* / Ed. Whitacre D.M. N.Y.: Springer, 2012. P. 67–103.
 81. Ichikawa R., Suyama I. Effects of tritiated water on the embryonic development of two marine teleosts // *Bul. of the Jap. Soc. of Sci Fish*. 1974. V. 40. № 8. P. 819–824.
 82. Hagger J.A., Atienzar F.A., Jha A.N. Genotoxic, cytotoxic, developmental and survival effects of tritiated water in the early life stages of the marine mollusc, *Mytilus edulis* // *Aquatic Toxicology*. 2005. V. 74. № 3. P. 205–217.
 83. Jaeschke B.C., Millward G.E., Moody A.J. et al. Tissue-specific incorporation and genotoxicity of different forms of tritium in the marine mussel, *Mytilus edulis* // *Environ. Pollution*. 2011. V. 159. № 1. P. 274–280.
 84. Jha A.N., Dogra Y., Turner A. et al. Impact of low doses of tritium on the marine mussel, *Mytilus edulis*: Genotoxic effects and tissue-specific bioconcentration // *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environ. Mutagenesis*. 2005. V. 586. № 1. P. 47–57.
 85. Jha A.N., Dogra Y., Turner A. et al. Are low doses of tritium genotoxic to *Mytilus edulis*? // *Marine Environ. Research*. 2006. V. 62. P. S297–S300.
 86. Etoh H., Hyodo-Taguchi Y. Effects of tritiated water on germ cells in medaka embryos // *Radiation Research*. 1983. V. 93. № 2. P. 332–339.
 87. Hyodo-Taguchi Y., Etoh H. Effects of tritiated water on the testicular stem cells in medaka. I. Diminished reproductive capacity at 2 months following exposure [*Oryzias latipes*]. Chiba: Nat. Inst. Radiol. Sciences, 1986. P. 35–36.
 88. Hyodo-Taguchi Y., Etoh H. Vertebral malformations in medaka (teleost fish) after exposure to tritiated water

- in the embryonic stage // *Radiation Research*. 1993. V. 135. № 3. P. 400–404.
89. *Ueno A.M.* Incorporation of tritium from tritiated water into nucleic acids of *Oryzias latipes* eggs // *Radiation Research*. 1974. V. 59. № 3. P. 629–637.
 90. *Hyodo-Taguchi Y., Egami N.* Damage to spermatogenic cells in fish kept in tritiated water // *Radiation Research*. 1977. V. 71. № 3. P. 641–652.
 91. *Selivanova M.A., Mogilnaya O.A., Badun G.A.* et al. Effect of tritium on luminous marine bacteria and enzyme reactions // *J. of Environ. Radioact.* 2013. V. 120. P. 19–25.
 92. *Ijiri K.* Cell death (apoptosis) in mouse intestine after continuous irradiation with γ -rays and with β -rays from tritiated water // *Radiation Research*. 1989. V. 118. № 1. P. 180–191.
 93. *Русинова Г.Г., Мушкачева Г.С., Турдакова В.А.* и др. Сравнение биологического действия окиси трития и гамма-облучения по изменению массы вилочковой железы крыс // *Радиобиология*. 1989. Т. 29. № 6. С. 798–803.
 94. *Carsten A.L., Commerford S.L., Cronkite E.P.* The genetic and late somatic effects of chronic tritium ingestion in mice // *Current Topics in Radiation Research Quarterly*. 1978. V. 12. № 1–4. P. 212–224.
 95. *Carsten A.L., Cronkite E.P.* Comparison of late effects of single x-ray exposure, chronic tritiated water ingestion, and chronic ^{137}Cs gamma exposure in mice // *Int. Symp. on Biological Implications of Radionuclides Released from Nuclear Industries*. Vienna: IAEA, 1979. P. 1–12.
 96. *Takeda H., Kasida Y.* Biological behavior of tritium after administration of tritiated water in the rat // *J. of Radiation Research*. 1979. V. 20. № 2. P. 174–185.
 97. ICRP Publication 10: Evaluation of radiation doses to body tissues: from internal contamination due to occupational exposure. Oxford: Pergamon Press, 1968. 26 p.
 98. *Cahill D.F., Yuile C.L.* Tritium: some effects of continuous exposure *in utero* on mammalian development // *Radiation Research*. 1970. V. 44. № 3. P. 727–737.
 99. *Umata T., Kunugita N., Norimura T.* A comparison of the mutagenic and apoptotic effects of tritiated water and acute or chronic ^{137}Cs gamma exposure on spleen T-lymphocytes on normal and p53-deficient mice // *Int. J. of Radiation Biology*. 2009. V. 85. № 12. P. 1082–1088.
 100. *Obodovskiy I.* Fundamentals of radiation and chemical safety. Amsterdam: Elsevier, 2015. 250 p.
 101. *Rossi H.H.* The role of microdosimetry in radiobiology // *Radiation and Environ. Biophysics*. 1979. V. 17. № 1. P. 29–40.
 102. *Иванов В.И., Лыцков В.Н., Губин А.Т.* Справочное руководство по микродозиметрии. М.: Энергоатомиздат, 1986. 184 с.
 103. *Berger M.J.* Beta-ray dose in tissue-equivalent material immersed in a radioactive cloud // *Health Physics*. 1974. V. 26. № 1. P. 1–12.
 104. *Bannister L., Serran M., Bertrand L.* et al. Environmentally relevant chronic low-dose tritium and gamma exposures do not increase somatic intrachromosomal recombination in pKZ1 mouse spleen // *Radiation Research*. 2016. V. 186. № 6. P. 539–548.
 105. *Alloni D., Cutaia C., Mariotti L.* et al. Modeling dose deposition and DNA damage due to low-energy β -emitters // *Radiation Research*. 2014. V. 182. № 3. P. 322–330.
 106. *Роднева С.М., Гурьев Д.В.* Дозиметрия трития на клеточном уровне // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2023. Т. 68. № 1. С. 92–100.
 107. *Vaziri B., Wu H., Dhawan A.P.* et al. MIRD pamphlet No. 25: MIRDcell v.2.0 software tool for dosimetric analysis of biologic response of multicellular populations // *J. of Nuclear Medicine*. 2014. V. 55. № 9. P. 1557–1564.
 108. *Сазыкина Т.Г., Крышев А.И.* Модель расчета поглощения энергии от инкорпорированных излучателей моноэнергетических электронов в объектах природной биоты // *Радиация и риск*. 2021. Т. 30. № 2. С. 113–122.
 109. *Siragusa M., Fredericia P.M., Jensen M.* et al. Radiobiological effects of tritiated water short-term exposure on V79 clonogenic cell survival // *Int. J. of Radiation Biology*. 2018. V. 94. № 2. P. 157–165.
 110. *Siragusa M., Baiocco G., Fredericia P.M.* et al. The COOLER code: a novel analytical approach to calculate subcellular energy deposition by internal electron emitters // *Radiation Research*. 2017. V. 188. № 2. P. 204–220.
 111. *Melintescu A.* Radiological impact assessment of acute tritium releases in environment – a soil dynamic model // *Fusion Science and Technology*. 2024. V. 80. № 3–4. P. 266–275.
 112. *Galeriu D., Melintescu A., Lazar C.* Development of CROPTRIT model: the dynamics of tritium in agricultural crops // *Intern. Conf. on Radioec. and Environ. Radioact.* Barcelona, Spain, 2014. OP-043.
 113. *Beaugelin-Seiller K., Jasserand F., Garnier-Laplace J.* et al. Modeling radiological dose in non-human species: principles, computerization, and application // *Health Physics*. 2006. V. 90. № 5. P. 485–493.
 114. *Gagnaire B., Adam-Guillermin C., Festarini A.* et al. Effects of *in situ* exposure to tritiated natural environments: a multi-biomarker approach using the fathead minnow, *Pimephales promelas* // *Science of the Total Environ.* 2017. V. 599–600. P. 597–611.
 115. *Beaugelin-Seiller K., Jasserand F., Garnier-Laplace J.* et al. EDEN: software to calculate the dose rate of energy for the non-human biota, due to the presence of radionuclides in the environment // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2004. V. 69. 10 p.
 116. *Réty C., Gilbin R., Gomez E.* Induction of reactive oxygen species and algal growth inhibition by tritiated

- water with or without copper // *Environ. Toxicology*. 2012. V. 27. № 3. P. 155–165.
117. *Galeriu D., Turcanu C., Melintescu A.* User guide for the tritium food chain and dose module FDMH of RODOS-PV4.0F_02. Bucharest: National Institute for Nuclear Physics and Engineering, 2001. 43 p.
 118. *Rahman Z., Rehman S.U., Mirza S.M.* et al. Geant4-based comprehensive study of the absorbed fraction for electrons and gamma-photons using various geometrical models and biological tissues // *Nuclear Technology and Radiation Protection*. 2013. V. 28. № 4. P. 341–351.
 119. *Richardson R., Dunford D.* A biochemical-based model for the dosimetry of dietary organically bound tritium – part 1: physiological criteria // *Health Physics*. 2003. V. 85. № 5. P. 523–538.
 120. *Peterson S.-R., Davis P.A.* Tritium doses from chronic atmospheric releases: a new approach proposed for regulatory compliance // *Health Physics*. 2002. V. 82. № 2. P. 213–225.
 121. *Chao T.-C., Wang C.-C., Li J.* et al. Cellular- and micro-dosimetry of heterogeneously distributed tritium // *Int. J. of Radiation Biology*. 2012. V. 88. № 1–2. P. 151–157.
 122. *Chen J.* Radiation quality of tritium // *Radiation Protection Dosimetry*. 2006. V. 122. № 1–4. P. 546–548.
 123. *Chen J.* Estimated yield of double-strand breaks from internal exposure to tritium // *Radiation and Environ. Biophysics*. 2012. V. 51. № 3. P. 295–302.
 124. *Rabus H., Nettelbeck H.* Nanodosimetry: bridging the gap to radiation biophysics // *Radiation Measurements*. 2011. V. 46. № 12. P. 1522–1528.
 125. Тимофеев Л.В., Максимов А.А., Кочетков О.А. и др. К вопросу о дозе трития на клеточном уровне // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2020. Т. 65. № 6. С. 66–72.
 126. *Mao L., Miao Y., Dong S.* et al. Algae induced tritium organification promotes human exposure risk // *Research Square*. 2023. Preprint. 33 p.
 127. *Hirao S., Kakiuchi H., Akata N.* et al. Assessing the variability of tissue-free water tritium and non-exchangeable organically bound tritium in pine needles in Fukushima using atmospheric titrated water vapor // *Science of the Total Environ.* 2024. V. 907. Art. 168173.
 128. *Ota M., Kwamena N.-O.A., Mihok S.* et al. Role of soil-to-leaf tritium transfer in controlling leaf tritium dynamics: comparison of experimental garden and tritium-transfer model results // *J. of Environ. Radioact.* 2017. V. 178–179. P. 212–231.
 129. *Galeriu D., Davis P., Raskob W.* et al. Recent progresses in tritium radioecology and dosimetry – today and tomorrow // *Fusion Science and Technology*. 2008. V. 54. № 1. P. 237–242.
 130. *Korolevych V.Y., Kim S.B., Davis P.A.* OBT/HTO ratio in agricultural produce subject to routine atmospheric releases of tritium // *J. of Environ. Radioact.* 2014. V. 129. P. 157–168.
 131. *Ulanovsky A., Pröhl G.* Tables of dose conversion coefficients for estimating internal and external radiation exposures to terrestrial and aquatic biota // *Radiation and Environ. Biophysics*. 2008. V. 47. № 2. P. 195–203.
 132. *Diabate S., Strack S.* Organically bound tritium // *Health Physics*. 1993. V. 65. № 6. P. 698–712.
 133. *Калязина Н.С., Журавлев В.Ф., Москалев Ю.И.* Кинетика обмена в организме тимидина, меченного тритием // *Гигиена и санитария*. 1980. № 12. С. 40–43.
 134. *Gagnaire B., Arcanjo C., Cavalié I.* et al. Tritiated water exposure in zebrafish (*Danio rerio*): effects on the early-life stages // *Environ. Toxicology and Chemistry*. 2020. V. 39. № 3. P. 648–658.
 135. *Arcanjo C., Armant O., Floriani M.* et al. Tritiated water exposure disrupts myofibril structure and induces mis-regulation of eye opacity and DNA repair genes in zebrafish early life stages // *Aquatic Toxicology*. 2018. V. 200. P. 114–126.
 136. *Beaton E., Gosselin I., Festarini A.* et al. Correlated responses for DNA damage, phagocytosis activity and lysosomal function revealed in a comparison between field and laboratory studies: fathead minnow exposed to tritium // *Science of the Total Environ.* 2019. V. 662. P. 990–1002.
 137. *Arcanjo C., Maro D., Camilleri V.* et al. Assessing tritium internalisation in zebrafish early life stages: importance of rapid isotopic exchange // *J. of Environ. Radioact.* 2019. V. 203. P. 30–38.
 138. *Arcanjo C., Maro D., Camilleri V.* et al. Errata: Assessing tritium internalisation in zebrafish early life stages: importance of rapid isotopic exchange // *J. of Environ. Radioact.* 2022. V. 242. Art. 106757.
 139. *Hunt J., Bailey T., Reese A.* The human body retention time of environmental organically bound tritium // *J. of Radiol. Protection*. 2009. V. 29. № 1. P. 23–36.
 140. *Strand J.A., Fujihara M., Burdett R.* et al. Suppression of the primary immune response in rainbow trout, *Salmo gairdneri*, sublethally exposed to tritiated water during embryogenesis // *J. of the Fish. Board of Canada*. 1977. V. 34. № 9. P. 1293–1304.
 141. *Kim S.B., Rowan D., Chen J.* et al. Tritium in fish from remote lakes in northwestern Ontario, Canada // *J. of Environ. Radioact.* 2018. V. 195. P. 104–108.
 142. *Pearson H.B.C., Dallas L.J., Comber S.D.W.* et al. Mixtures of tritiated water, zinc and dissolved organic carbon: assessing interactive bioaccumulation and genotoxic effects in marine mussels, *Mytilus galloprovincialis* // *J. of Environ. Radioact.* 2018. V. 187. P. 133–143.
 143. *Dallas L.J., Bean T.P., Turner A.* et al. Exposure to tritiated water at an elevated temperature: Genotoxic and transcriptomic effects in marine mussels (*M. galloprovincialis*) // *J. of Environ. Radioact.* 2016. V. 164. P. 325–336.

144. *Nushtaeva V.E., Spiridonov S.I., Mikailova R.A.* et al. Radiation dose assessment for representative biota organisms in the locale of NPP with VVER-1200 // Atomic Energy. 2020. V. 128. № 4. P. 251–258.
145. *Inomata T., Higuchi M.* Accumulation and retention of tritium (tritiated water) in *Rhodopseudomonas spheroides* under aerobic condition // Radiation and Environ. Biophysics. 1982. V. 20. № 2. P. 123–136.
146. *Satoh Y., Imada S., Tani T.* et al. Investigation of ratio of carbon to hydrogen (C/H ratio) in agricultural plants for further estimation of their productivity of organically bound tritium // J. of Environ. Radioact. 2022. V. 246. Art. 106845.
147. *Kirchmann R., Gerber G.B., Fagniat E.* et al. Accidental release of elemental tritium gas and tritium oxide: models and *in situ* experiments on various plant species // Radiation Protection Dosimetry. 1986. V. 16. № 1–2. P. 107–110.
148. *Tani T., Nagai M.* Retention of organically bound deuterium in grass plants exposed to heavy water vapour at different growth stages // Radiation Protection Dosimetry. 2022. V. 198. № 13–15. P. 886–890.
149. *DeVol T.A., Powell B.A.* Theoretical organically bound tritium dose estimates // Health Physics. 2004. V. 86. № 2. P. 183–186.
150. *Strack S., Kistner G., Emeis C.* Incorporation of tritium into planktonic algae in a continuous culture under dynamic conditions // Int. Sym. on the Behaviour of Tritium in the Environment. San Francisco, 16–20 Oct. 1978. Vienna: IAEA, 1979. 219–230 p.
151. *König L.A.* Tritium in the food chain // Radiation Protection Dosimetry. 1990. V. 30. № 2. P. 77–86.
152. *Smith R., Ellender M., Guo C.* et al. Biokinetics and internal dosimetry of tritiated steel particles // Toxics. 2022. V. 10. № 10. Art. 602.
153. *Barrett P.H.R., Bell B.M., Cobelli C.* et al. SAAM II: simulation, analysis, and modeling software for tracer and pharmacokinetic studies // Metabolism. 1998. V. 47. № 4. P. 484–492.
154. ICRP Publication 30: Limits for intakes of radionuclides by workers. Part 1 // Ann. ICRP. 1979. V. 2. № 3–4. 133 p.
155. ICRP Publication 30: Limits for intakes of radionuclides by workers. Part 2 // Ann. ICRP. 1980. V. 4. № 3–4. 89 p.
156. ICRP Publication 30: Limits for intakes of radionuclides by workers. Part 3 // Ann. ICRP. 1981. V. 6. № 3–4. 134 p.
157. ICRP Publication 68: Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers // Ann. ICRP. 1994. V. 24. № 4. 124 p.
158. ICRP Publication 88: Doses to the embryo and fetus from intakes of radionuclides by the mother // Ann. ICRP. 2001. V. 31. № 1–3. 522 p.
159. *Tani T., Ishikawa Y.* A deuterium tracer experiment for simulating accumulation and elimination of organically bound tritium in an edible flatfish, olive flounder // Science of the Total Environ. 2023. V. 903. Art. 166792.
160. *Galeriu D., A. Beresford N., Takeda H.* et al. Towards a model for the dynamic transfer of tritium and carbon in mammals // Radiation Protection Dosimetry. 2003. V. 105. № 1–4. P. 387–390.
161. *Greiff D.* The effect of beta rays (tritium) on the growth of rickettsiae and influenza virus // Proc. of the Symp. on the Detection and Use of Tritium in the Physical and Biological Sciences. V. II. Tritium in the Physical and Biological Sciences. Vienna: IAEA, 1962. P. 155–164.
162. *Lai J.-l., Li Z.-g., Han M.-w.* et al. Analysis of environmental biological effects and OBT accumulation potential of microalgae in freshwater systems exposed to tritium pollution // Water Research. 2024. V. 250. Art. 121013.
163. *Ichimasa M., Ichimasa Y., Yagi Y.* et al. Oxidation of atmospheric molecular tritium in plant leaves, lichens and mosses // J. of Radiation Research. 1989. V. 30. № 4. P. 323–329.
164. *Ichimasa M., Suzuki M., Obayashi H.* et al. *In vitro* determination of oxidation of atmospheric tritium gas in vegetation and soil in Ibaraki and Gifu, Japan // J. of Radiation Research. 1999. V. 40. № 3. P. 243–251.
165. *Shibata T., Ishikawa Y.* Deuterium transfer analysis including food chain from seawater into abalone // Radiation Protection Dosimetry. 2022. V. 198. № 13–15. P. 1125–1130.
166. *Atarashi-Andoh M., Amano H., Kakiuchi H.* et al. Formation and retention of organically bound deuterium in rice in deuterium water release experiment // Health Physics. 2002. V. 82. № 6. P. 863–868.
167. *Ichimasa M., Weng C., Ara T.* et al. Organically bound deuterium in rice and soybean after exposure to heavy water vapor as a substitute for tritiated water // Fusion Science and Technology. 2002. V. 41. № 3P2. P. 393–398.
168. *Takashima Y., Momoshima N., Inoue M.* et al. Tritium in pine needles and its significant sources in the environment // Int. J. of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes. 1987. V. 38. № 4. P. 255–261.
169. *Momoshima N., Kakiuchi H., Okai T.* et al. Tritium in a pine forest ecosystem: relation between fresh pine needles, organic materials on a forest floor and atmosphere // J. of Radioanal. and Nucl. Chem. 2000. V. 243. № 2. P. 479–482.
170. *Hisamatsu S.I., Katsumata T.I., Takizawa Y.* Tritium concentrations in pine needle, litter and soil samples // J. of Radiation Research. 1998. V. 39. № 2. P. 129–136.
171. *Pettitt E.A., Duff M.C., VerMeulen H.* Influence of irrigation approaches and spatial geolocation on tritium speciation, uptake and depuration // Chemosphere. 2024. V. 349. Art. 140921.
172. *Lattaud C., Marcel R.* Stimulating influence of cerebral ganglia on *in vitro* incorporation of tritiated leucine into ovaries of *Eisenia fetida* Sav. (Annelida: Oligochaeta) //

- Zoological Science. 1989. V. 6. № 4. P. 741–748.
173. Marsden J.R., Coleman C., Richard R. et al. Uptake of tritium-labelled biogenic amines by the prostomium of the polychaete *Nereis virens* (SARS) (Annelida) // Tissue and Cell. 1981. V. 13. № 2. P. 269–282.
 174. Easdown J., Marsden J., Paradis K. et al. A preliminary account of brain growth in postlarval *Nereis virens* (Polychaeta: Annelida): a [^3H]-thymidine study // Canadian J. of Zoology. 1980. V. 58. № 11. P. 2141–2149.
 175. Гудков Д.И. Тритий в пресных водах Украины и его действие на гидробионтов: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Киев, 1995. 24 с.
 176. Blaylock B. The production of chromosome aberration in *Chironomus riparius* (Diptera: Chironomidae) by tritiated water // The Canadian Entomologist. 1971. V. 103. № 3. P. 448–453.
 177. Kaplan W., Gugler H., Kidd K. et al. Nonrandom distribution of lethals induced by tritiated thymidine in *Drosophila melanogaster* // Genetics. 1964. V. 49. № 4. P. 701–714.
 178. Audette-Stuart M., Kim S.-B., McMullin D. et al. Measuring adaptive responses following chronic and low dose exposure in amphibians // Biomarkers of Radiation in the Environment / Eds. Wood M.D., Mothersill C.E., Tsakanova G. et al. Dordrecht: Springer, 2022. P. 205–221.
 179. Audette-Stuart M., Ferreri C., Festarini A. et al. Fatty acid composition of muscle tissue measured in amphibians living in radiologically contaminated and non-contaminated environments // Radiation Research. 2012. V. 178. № 3. P. 173–181.
 180. Audette-Stuart M., Yankovich T. Bystander effects in bullfrog tadpoles // Radioprotection. 2011. V. 46. № 6. P. S497–S502.
 181. Audette-Stuart M., Kim S.B., McMullin D. et al. Adaptive response in frogs chronically exposed to low doses of ionizing radiation in the environment // J. of Environ. Radioact. 2011. V. 102. № 6. P. 566–573.
 182. Sauer M.E., Walker B.E. Radiation injury resulting from nuclear labeling with tritiated thymidine in the chick embryo // Radiation Research. 1961. V. 14. № 5. P. 633–642.

TRITIUM FROM MOLECULE TO BIOSPHERE. 2. APPROACHES TO DOSIMETRY

E. V. Antonova^{a,*}

^a*Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Russia 620144 Ekaterinburg*

^{*}*e-mail: selen@ipae.uran.ru*

Abstract – Tritium (^3H) has natural and man-made origin. High migration capacity, the presence of different physical and chemical forms, affinity with organic molecules and involvement in metabolic processes in the biosphere attract attention to this isotope in the field of radiation protection of living organisms and humans. The data of 319 publications (230 of them are in the Supplementary materials) were analyzed based on laboratory and field studies to understand the approaches to the methodology of ^3H dose assessment in reference plant and animal organisms specified in Publication 108 of the International Committee on Radiation Protection. The basic principles and features of calculating the absorbed dose rate from inorganic and organic forms of ^3H for different levels of biological organization are described. More than half of the studies were identified that are not related to dosimetry issues, but analyze radiobiological effects. Prospects for further research may be associated with a differentiated approach to assessing doses from different forms of ^3H , ensuring closer contact between laboratory and field studies, and shifting the focus from the organism level to the populations. The results obtained will find application in formulating problems in the field of radioecology and radiobiology, as well as in improving radiation safety standards associated with the work of existing nuclear industry enterprises and the development of new nuclear technology facilities.

Keywords: tritium, levels of biological organization, biota, absorbed dose rate, reference species

УДК [574.24+574.34]:597.555.5-134.3:551.435.122

ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИЙ ЧИРА (*COREGONUS NASUS* (PALLAS, 1776)) НИЖНЕЙ ОБИ В ПЕРИОД 1981–2023 гг.

© 2024 г. В. Д. Богданов^{а,*}, А. Р. Копориков^{а,**}, И. П. Мельниченко^а,
И. А. Кшнясев^а, О. А. Госькова^а, Я. А. Кижеватов^а

^аИнститут экологии растений и животных УрО РАН, Россия 620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202

*e-mail: Bogdanov@ipae.uran.ru

**e-mail: Koporikov@mail.ru

Поступила в редакцию 25.04.2024 г.

После доработки 28.06.2024 г.

Принята в публикацию 04.07.2024 г.

Представлены результаты оценки численности генераций чира Нижней Оби. На основании данных о численности скатившихся с нерестилищ личинок, полученных на основных нерестовых реках в 1981–2023 гг., сделаны выводы о современной демографической ситуации в популяции чира Нижней Оби, влиянии антропогенных факторов и водности поймы Оби на его воспроизводство. Установлено, что наибольшее значение в воспроизводстве чира в 1980-х и 1990-х гг. имела р. Северная Сосьва. С 2010 г. произошло увеличение доли вклада в численность генераций более северных рек – Войкар и Собь. Снижение значимости вклада р. Северной Сосьвы связано как с потеплением климата в регионе, так и повышенным изъятием промыслом потенциальных производителей, в том числе и для рыбоводных нужд. Воспроизводство популяции чира слабо зависит от водности поймы Нижней Оби. Для восстановления его численности необходимо существенно изменить систему охраны нерестовых стад и организовать ООПТ в бассейне р. Хулги. Искусственного воспроизводства чира не требуется.

Ключевые слова: сиговые рыбы, воспроизводство, личинки, генерация, пойма, нерестовые притоки, водность, температура, лимитирующие факторы

DOI: 10.31857/S0367059724050045 **EDN:** WCGLMH

При наличии обширного ареала, подразделяющегося на репродуктивные, нагульные и зимовальные участки, популяционная структура чира Оби считается относительно простой [1]. В подтверждение этому нами установлено, что после полной гибели икры чира в р. Харбей в 1978 г. в результате перемерзания всех нерестилищ в нее уже через 5 лет заходили на нерест производители, возрастная структура которых была нормальной (без «выпадения» генерации 1978 г. рождения) и сходной с возрастной структурой чира, нерестовавшего в других уральских притоках Оби. Также после заморозов в р. Сыня в ней не наблюдалось резкого снижения доли производителей тех лет рождения.

Репродуктивный ареал чира находится в предгорной части уральских притоков Нижней Оби. Их значение для обеспечения размножения, инкубации икры и частично зимовки определяет необходимость проведения постоянного мониторинга состояния воспроизводства, важным

элементом которого являются сведения о численности генераций.

Ранее было установлено, что загрязнение воды и грунтов на нерестилищах в уральских притоках Оби минимальное [2, 3], и эффективность воспроизводства сиговых рыб определяется в основном масштабами перемерзания нерестовых участков, вызывающих локальные заморы, а также количеством и качеством нерестящихся производителей [4]. Экологическое состояние нерестилищ продолжает оставаться в пределах нормы, что обеспечивает воспроизводство сиговых рыб, в том числе чира. О нормальном состоянии среды свидетельствует также тот факт, что среди вылупившихся личинок сиговых рыб почти нет особей с аномальными внешними признаками [2].

К 1969 г. запасы обского чира оказались на низком уровне, а после резкого ограничения интенсивности промысла восстановились и стабилизировались, обеспечивая уловы в 1981–1995 гг.

на уровне 576–1188 т/год (в среднем 763 т/год). В дальнейшем они постепенно снижались, с 2005 г. снижение ускорилося. В последние годы (2020–2023 гг.) вылов чира снизился до крайне низких значений (до 50 т/год), и стал актуальным вопрос о восстановлении численности его популяции.

Цель нашей работы — на основе многолетних данных о воспроизводстве чира в уральских нерестовых притоках Нижней Оби дать оценку демографической ситуации в популяции чира и выявить закономерности динамики численности.

Актуальность исследования определяется высокой значимостью чира как одного из компонентов пресноводных экосистем Арктики, ценного промыслового вида, используемого в аквакультуре и в целях компенсации ущерба, нанесенного водным биоресурсам хозяйственной деятельностью человека, т.е. при решении социальных и природоохранных проблем.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Климат. Территории восточного склона Полярного и Приполярного Урала, а также поймы Нижней Оби имеют континентальный климат с коротким прохладным летом и долгой холодной зимой [5]. Абсолютные максимальные температуры достигают 35°C (июль, август), а минимальные падают до –58°C (февраль). В горах зима длится до семи месяцев, а средняя температура воздуха в январе колеблется от –19 до –21°C. Снежный покров устанавливается во второй половине октября и сохраняется в течение 200–240 дней, до конца мая. Как правило, с середины июня до начала сентября продолжается теплое время года без снежного покрова и с положительными среднесуточными температурами. Годовое количество осадков в среднем составляет около 800 мм, основная их часть (40–45%) приходится на летние месяцы (июнь — август).

Район исследования. Сбор данных проведен в бассейнах левобережных нерестовых притоков Нижней Оби: Северная Сосьва, Сыня, Войкар, Собь — в 1981–2023 гг. (рис. 1). Так как значение рек Харбей и Лонготъеган [3] в воспроизводстве обского чира крайне мало (от 0 до 0.1%), эти реки не рассматривались в общем анализе.

Длина р. Северная Сосьва составляет 866 км, площадь бассейна — 89.7 тыс. км² [6]. Учетный створ находится в 195 км от устья. Ширина русла в учетном створе составляет 400 м, наиболь-

шая глубина в межень — 6 м, в паводок — 13.8 м. Протяженность р. Сыни — 322 км, площадь водосбора 11.95 тыс. км². Учетный створ находится в 120 км от устья реки. В разные годы в период наблюдений ширина реки на створе изменялась от 80 до 157 м, максимальная глубина русла — от 0.7 м подо льдом до 7.5 м в ледоход. Река Войкар имеет протяженность 225 км, площадь водосборного бассейна 7.53 тыс. км². Учетный створ оборудован в 36 км от устья. За годы наблюдений ширина реки в месте створа изменялась от 185 м в зимнюю межень до 236 м во время паводка, максимальная глубина русла реки — от 2.1 м в межень и до 5.4 м во время паводка. Река Собь имеет протяженность 190 км и площадь водосбора 6.32 тыс. км². Учетный створ находится в среднем течении реки в районе ур. Тусигорт. Ширина учетного створа в зимнюю межень составляет 95 м, перед ледоходом она увеличивается до 140 м, в пик половодья — около 180 м; максимальная глубина на стрежне в зимнюю межень — 2.3 м, перед ледоходом — до 4.7–5.3 м.

Оценка численности генераций. При сборе материала по скату личинок применяли метод учета стока [7, 8]. Абсолютную численность личинок, прошедших через учетный створ, определяли по формуле:

$$N = (Q_p m T) / Q_{\text{лов}}, \quad (1)$$

где N — общее число личинок; Q_p — средний расход воды в реке за учетный период времени (м³/с); m — среднее арифметическое от числа личинок в пробах за расчетный период времени; T — расчетный период времени (с), составляющий обычно 6, 12 или 24 ч; $Q_{\text{лов}}$ — расход воды через сетку, равный SVt (м³/с); S — площадь входного отверстия (м²); V — скорость течения в сетке (м/с); t — время лова (с).

Всего собрано 5.8 тыс. проб. Видовую принадлежность личинок устанавливали по описаниям и определителю В.Д. Богданова [9]. При определении погрешности в методе учета численности личинок использовали ошибки, возникающие за счет изменения количества личинок в пробах, величины расхода воды и эффективности фильтрации ловушки. Систематическая погрешность определения расходов воды обычно составляет 5–10%, общая погрешность применяемого метода не превышала 40%, чаще была близка к 30% [10]. Эффективность фильтрации ловушки изменялась в зависимости от времени лова, скорости течения и количества выносимых взвесей от 0.8

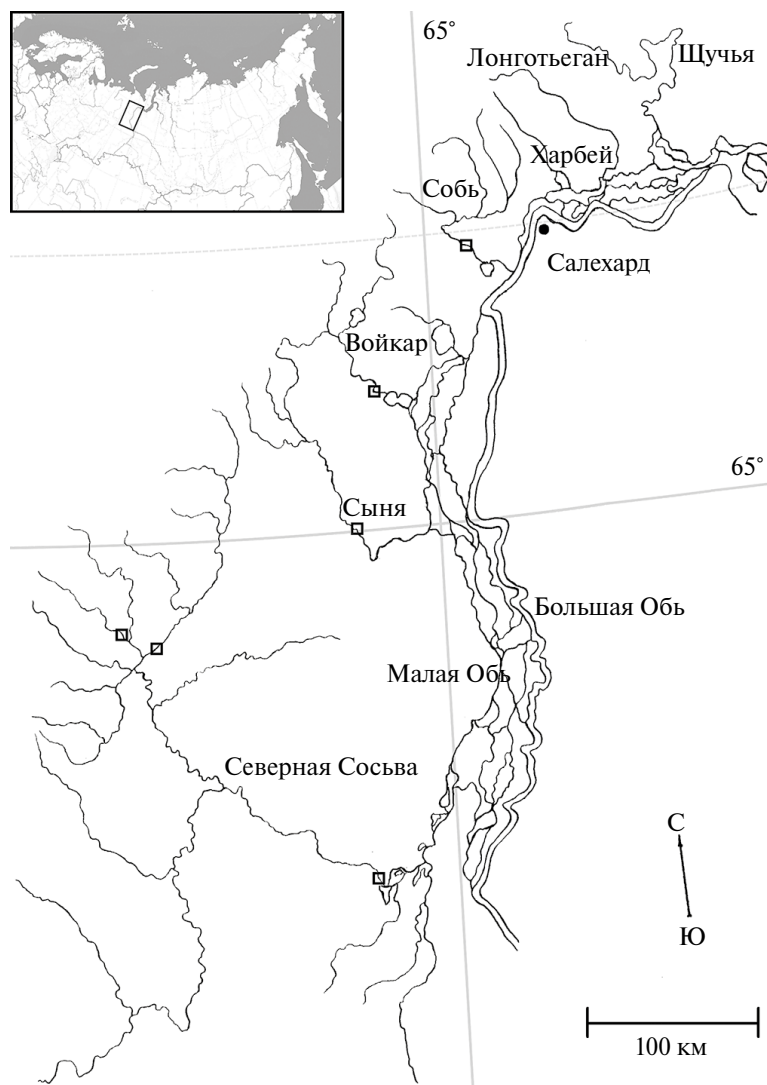


Рис. 1. Карта-схема расположения учетных створов (обозначены квадратом) на нерестовых притоках.

до 0.7 (на 20–30 % соответственно). Эта величина установлена эмпирически по соотношению скоростей течения в ловушке и потоке.

Взрослых рыб ловили ставными, плавными сетями и неводами. Биологический анализ проведен на свежем материале по общепринятым методикам [11]. Возраст рыб определен по чешуе. Индивидуальную абсолютную плодовитость самок (ИАП) оценивали как

$$\text{ИАП} = \text{вес гонад} \times \frac{\text{количество икринок в навеске}}{\text{навеска}}. \quad (2)$$

Оценка водности поймы Оби. Для построения гидрографов уровня воды и длительности затопления поймы нижнего течения р. Оби использовали данные о суточных уровнях воды за пе-

риод открытого русла в створе гидрологического поста (ГП) Салехард. Длительность затопления определяли для отметки 380 см ГП Салехард (ноль поста 0.52 м над ур.м.) [12], которая соответствует верхней границе нижнего экологического яруса поймы, затопляемого ежегодно. Для оценки влияния температуры воды Оби на распределение производителей чира по нерестовым притокам использовали данные ГП Мужы.

Сбор и обработку биологического материала осуществляли в соответствии с European Convention for the protection of Vertebrate animals used for experimental and other scientific purposes (ETS №123) (Европейская конвенция о защите позвоночных животных, используемых в экспериментах и в других научных целях (ETS №123) [13].

Статистическая обработка данных выполнена в программах Past, v.2.17b [14] и STATISTICA [15]. Использовали логарифмирование данных численности покатных личинок чира, что позволило стабилизировать дисперсию и сделать временные ряды более симметричными. Зависимость численности генераций от водности Оби оценивали по коэффициенту корреляции Спирмена. Применяли метод главных компонент (PCA/EOF), гармонический и спектральный анализы, для статистического моделирования — аппарат обобщенных регрессионных моделей (GRM) [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика водности поймы Нижней Оби.

Водность периода открытого русла и продолжительность затопления поймы определяют рыбопродуктивность бассейна Оби. Условия обитания сиговых рыб Оби в годы низкой водности ухудшаются [17], что приводит к снижению их промысловых запасов. Важнейшие антропогенные факторы, влияющие на изменение составляющих речного стока, — заполнение водохранилищ, добыча песчано-гравийной смеси (ПГС) и углубление русла, водопотребление и т.д. Также со снижением водности в стоке возрастает концентрация органических и минеральных веществ техногенного и бытового происхождения, что увеличивает токсичность обской воды для живых организмов [18]. Возможные изменения стока Оби, наряду с усилением влияния промысла в годы низкой водности, будут способствовать дальнейшему снижению численности чира.

За период наблюдений на ГП Салехард (1934–2023 гг.) самый высокий средний уровень воды в июне–августе зафиксирован в 1979 г., минимальный — в 2012 г. (рис. 2). За последние 40 лет низкий уровень воды наблюдался также в 1982, 1989, 1991–1992, 1995, 2004, 2005 гг. (рис. 3).

Все существенные спады водности Оби за период наблюдений связаны с накоплением воды в крупных водохранилищах. В 2012 г. в водохранилищах Оби и Иртыша из-за засухи критически понизился уровень воды, и пришлось весь первый паводок использовать для ее накопления в водохранилище. Вода в пойму Нижней Оби пришла только в конце июня. Но это был единственный экстремальный год за время наших наблюдений. Повторение таких условий несколько лет подряд приведет к снижению рыбопродуктивности по всем видам. Повышенная водность Оби прогнозируется к 2030 г. (см. рис. 3).

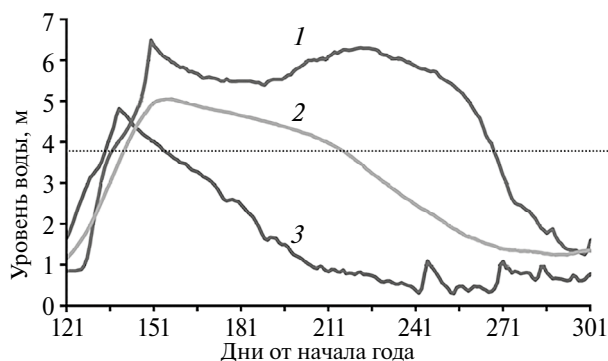


Рис. 2. Гидрографы суточных уровней воды в створе гидропоста Салехард для многоводного 1979 г. (1), маловодного 2012 г. (3) и многолетнего (2) среднего гидрографа (1934–2021 гг.). Горизонтальная пунктирная линия соответствует верхней границе нижнего экологического яруса поймы.

Коэффициент вариации уровня воды июня–августа высокий ($CV = 19.1\%$), что указывает на выраженную от года к году изменчивость этого элемента гидрологического режима р. Оби. Длительность полного затопления нижнего экологического яруса поймы варьирует в широком пределе — от 20 до 132 дней, а средняя многолетняя продолжительность затопления — 81 день. В последние три года длительность затопления поймы была ниже средних показателей, что значительно снижало длительность периода нагула сиговых рыб [5]. В маловодные годы она составляет в среднем 40–50 сут, в годы средней водности — 70–80 сут, в многоводные — 110–120 сут.

Статистически незначимый линейный тренд снижения водности Нижней Оби сохраняется на протяжении всего ряда наблюдений (1934–2023 гг.). При этом на протяжении последних трех лет (после серии многоводных лет 2014–2020 гг.) сохраняется выраженный тренд снижения средних уровней воды и продолжительности затопления поймы (см. рис. 3).

Оценка естественного воспроизводства чира.

После ската из нерестовых рек личинки чира распределяются в основном по левобережной части поймы Оби от устья р. Северной Сосьвы до Обской губы [19]. В Оби выше р. Северной Сосьвы молодь чира не встречается. После обсыхания поймы сеголетки чира скапливаются в устьевой зоне Оби. Массовая миграция молоди вниз по течению р. Оби в районе г. Салехарда отмечается в первые две декады августа. Происходит смешение молоди чира, рожденной в разных нерестовых реках (Северная Сосьва, Сыня, Войкар, Собь). К окончанию вегетационного периода сеголетки чира в среднем имеют массу тела около 30 г.

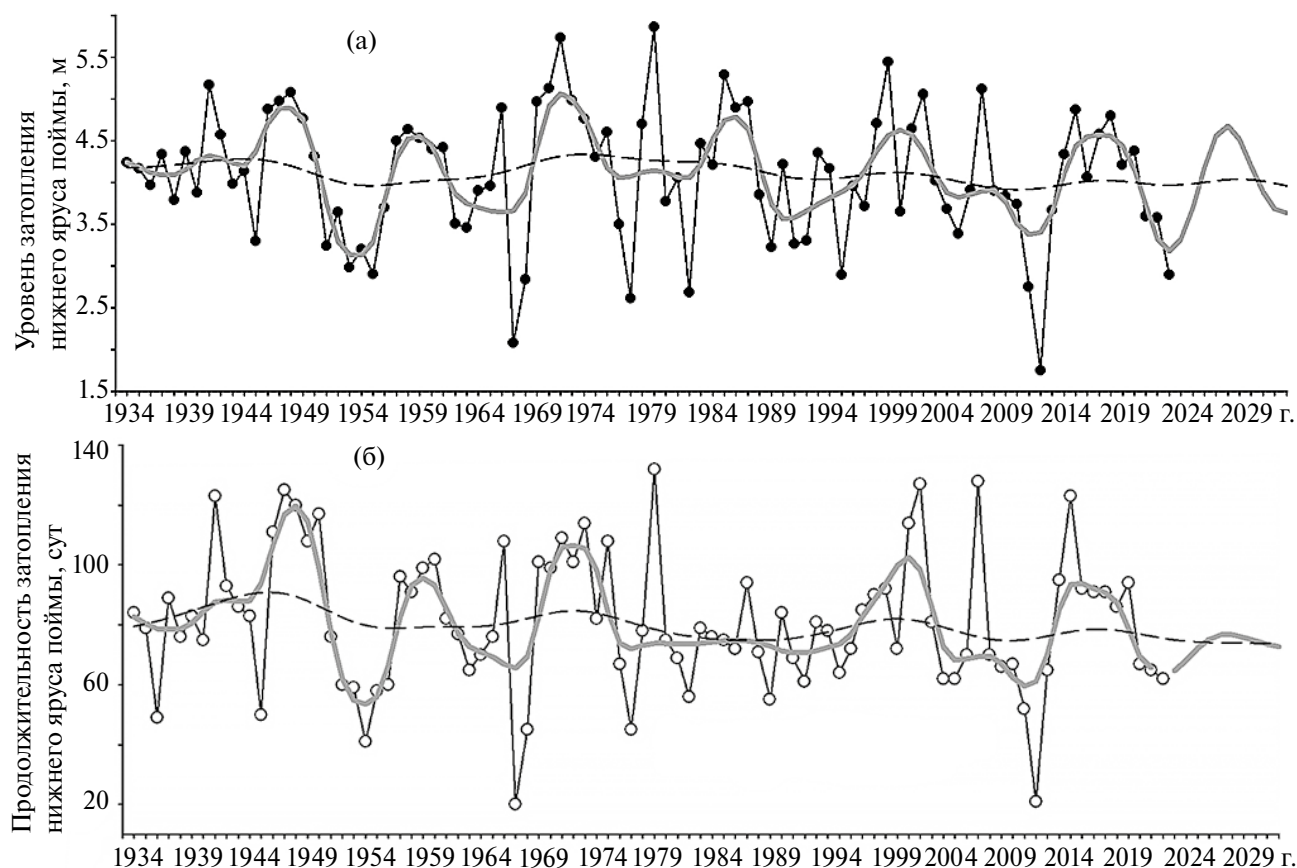


Рис. 3. Гидрология 1934–2023 гг. и прогноз до 2032 г. Многолетняя динамика уровня (а) и продолжительности затопления (б) нижнего экологического яруса поймы в 1934–2023 гг. в Салехардском пойменном районе, ее тренд (штриховая линия: $y = 201 - 0.06 * t$) и локальное сглаживание (Lowess) – жирная кривая.

Чир обского стада зимует в северной половине южной части Обской губы. С наступлением лета большая его часть мигрирует в дельту и устьевую часть Оби. В губе на лето остаются лишь молодь в возрасте 1–2 лет и определенное количество пропускающих нерест половозрелых особей, которые нагуливаются в прибрежье, заливах, на салмах (мелководьях) южной части губы. Миграцию в речную систему из Обской губы на нагул чир начинает с возраста трех лет. Нагул в пойме приурочен в основном к протокам и мелким сорам выше 66° с. ш. На нерест обское стадо чира заходит в реки Харбей, Лонготьюган, Собь, Войкар, Сыня, Северная Сосьва. На нерестилищах, где зажоры (скопление шуги с включением мелкобитого льда в русле реки, вызывающее стеснение водного сечения и связанный с этим подъем уровня воды) занимают большую часть площади нерестилищ, выживание икры чира очень высокое (до 95%) [20]. Чир размножается в заторах шуги, что спасает икру от перемерзания и хищников [21]. Доказана возможность развития икры чира, замороженной в лед [22]. Выживает икра, которая развивается в слое льда при тем-

пературе около 0°C . Таким образом, условия для естественного воспроизводства чира в уральских притоках, как правило, очень хорошие, что связано с обильными зажорными явлениями.

В последние шесть лет (2018–2023 гг.) в нерестовых стадах чира отсутствуют повторно созревающие особи (табл. 1), что свидетельствует об очень сильном влиянии промысла.

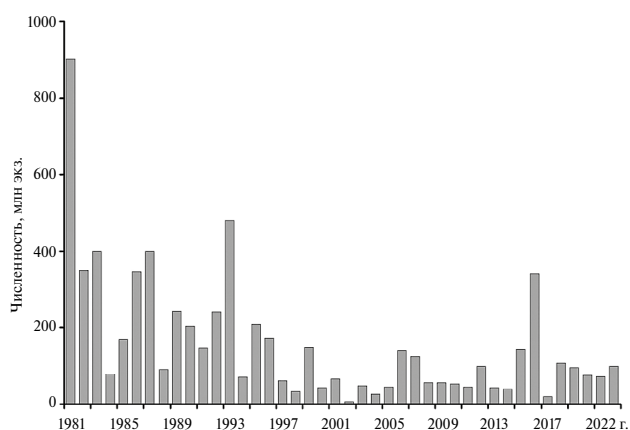
Численность генераций чира крайне изменчива (рис. 4). Так, минимальная по численности генерация отличается от максимальной в 150 раз. При этом в период с 1981 г. по 1999 г. разница была 27-кратной, а с 2000 г. по 2023 г. – 58-кратной. Средняя численность генераций чира в первый указанный период составляла 250 млн личинок, во второй – 80 млн. Самая многочисленная генерация численностью 902 млн личинок за 43 года появлялась только один раз, а генерации по 400 млн личинок – четыре раза. Рекордно низкая по численности генерация появилась в 2002 г. (5.9 млн экз.).

Таблица 1. Возрастной состав чира в нерестовых стадах, р. Сось, %

Год	Возраст, лет							
	4+	5+	6+	7+	8+	9+	10+	11+
1976	7	16	12	21	14	19	11	—
1997	—	3	28	43	20	5	1	—
2004	—	4	50	22	16	6	1	1
2006	4	10	40	35	9	2	—	—
2009	—	3	3	30	37	15	12	—
2013	—	4	17	31	35	11	2	—
2017	2	9	31	38	12	4	4	—
2018	—	25	54	19	2	—	—	—
2019	1	10	33	46	10	—	—	—
2020	12	12	29	32	11	4	—	—
2021	6	33	51	7	3	—	—	—
2022	—	14	73	12	1	—	—	—
2023	—	4	19	58	19	—	—	—

За период с 1981 г. по 2005 г. воспроизводство обского чира сократилось более чем в 30 раз. Затем начался период медленного восстановления численности. Однако за последние 17 лет появились только три генерации повышенной численности — приближающиеся к средней генерации 2006 и 2015 гг. рождения и многочисленная 2016 г. рождения. Последние две вступили в воспроизводство в 2021–2023 гг., что способствовало небольшому увеличению численности нерестовых стад чира. При сохранении этих генераций они могут еще два года влиять на численность производителей чира. Впоследствии прогнозируется ее спад. Следующий пик численности генераций чира возможен в 2030–2031 гг.

Установлено, что значение р. Северной Сосьвы в воспроизводстве чира, оцененная по численности покатных личинок, составляло в 1980-е гг. 43%, в последующие десятилетия постепенно снижалось до 31 % и достигло в 2021–2023 гг. 13%. Значение р. Сыни также за эти годы снижалось с 20% до 4%. Ведущая роль в воспроизводстве обского чира за период с 1981 г. по 2009 г. неизменно принадлежала р. Северной Сосьве. Затем основными нерестовыми реками чира стали более северные притоки Войкар и Сось — в последние три года их вклад в воспроизводство составил 68% (рис. 5) против 38% в 1980-е гг. Увеличение значения северных притоков могло произойти в связи с изменением температурного режима вод Оби. Средняя температура воды в период хода чира по руслу Оби в августе–октябре за последние 25 лет увеличилась, поэтому чир, как холодолюбивый вид, в большей мере выбирает более северные притоки для нереста (см. рис. 5).

**Рис. 4.** Динамика генераций чира Нижней Оби, млн экз.

Косвенно такое развитие событий подтверждает и увеличение уровня воспроизводства налима (холодолюбивый вид) в северных уральских притоках [23]. Увеличение значения р. Соби в воспроизводстве чира возможно также связано с появлением нового кормового водоема в нижнем течении реки после разработки месторождений ПГС в 1990-е гг. Снижение значения р. Северной Сосьвы, вероятно, связано с усилением нагрузки промысла (включая браконьерство и вылов для рыбоводных целей, который увеличился за последние три года в два раза) при более длительной миграции. Так, от устья р. Войкар до нерестилищ в бассейне р. Ляпин производителям нужно пройти еще более 700 км, минуя десятки населенных пунктов.

Отмечена высокая синхронность динамики численности покатных личинок чира на уральских нерестовых притоках (рис. 6), что свидетельствует об относительной стабильности условий

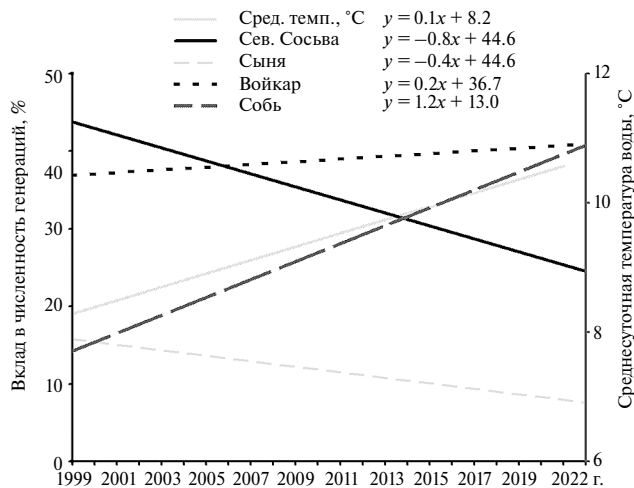


Рис. 5. Изменение трендов значения уральских нерестовых притоков (% вклада в численность генераций) в воспроизводстве чира и среднесуточная температура воды за 45 дней перед ледоставом в сентябре – октябре в Оби по данным ГП Мужж.

инкубации икры. Лишь в отдельные годы из-за локальных замороз на р. Сыне (1998, 2010, 2018 гг.) синхронность динамики нарушается.

Наблюдаемая динамика (логарифм) численности генераций чира показывает, что с середины 1990-х гг. популяция стала функционировать на пониженном динамическом уровне (рис. 7), что связано исключительно с высокой промышленной нагрузкой, так как условия среды на нерестовых реках остались неизменными.

«Фазовый портрет» воспроизводства чира зафиксировал в последнем десятилетии попытку коррекции/отскока к высоким уровням за счет появления более многочисленных генераций. По-видимому, это был последний цикл локального максимума – в ближайшие пять лет «спираль уйдет влево» к минимальным значениям численности (рис. 8). Дальнейшая динамика естествен-

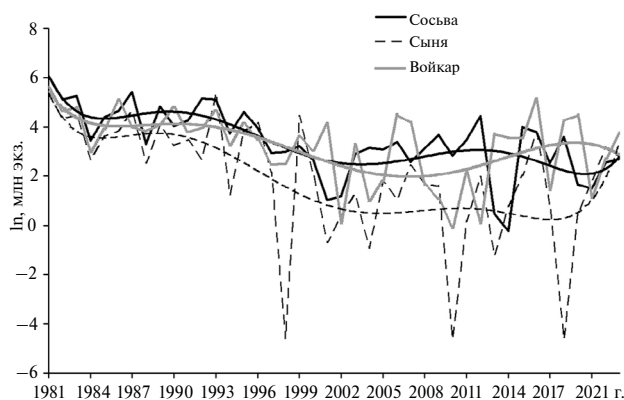


Рис. 6. Многолетняя изменчивость численности покатных личинок чира в уральских притоках Нижней Оби.

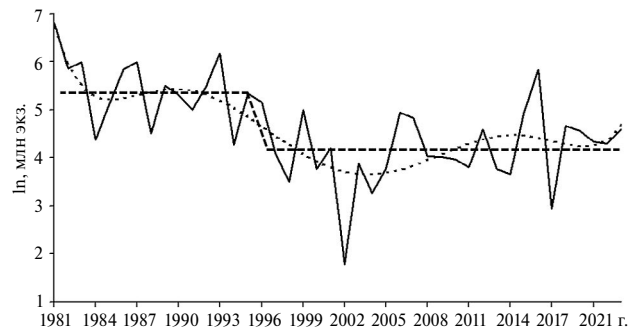


Рис. 7. Многолетняя изменчивость логарифма численности генераций чира (сплошная линия); плавная пунктирная линия – локальное сглаживание ($R = 0.88$, $t = 12.6$), длинный штрих – два различающихся уровня воспроизводства (1981–1995 и 1997–2023 гг.).

ного воспроизводства чира будет зависеть от принятия адекватных мер по охране нерестовых стад и экосистемы нерестовых притоков.

Влияние водности поймы на воспроизводство чира. Чтобы определить уровень влияния режима поемности на воспроизводство чира, ряды по водности и продолжительности затопления низкой поймы были сопоставлены с данными по численности его генераций.

Для периода 1980–2023 гг. изменения численности генераций чира не имеют статистически значимой корреляции с длительностью ($r_{sp} = -0.210$, $p = 0.182$, $n = 42$) и уровнем затопления поймы ($r_{sp} = -0.071$, $p = 0.655$, $n = 42$). Таким образом, не выявлена зависимость численности генераций чира от гидрологического режима. Некоторое увеличение численности генераций происходит только в редкие периоды повторяющихся на протяжении 6–7 лет высоких паводков (1970-е и 2014–2020 гг.).

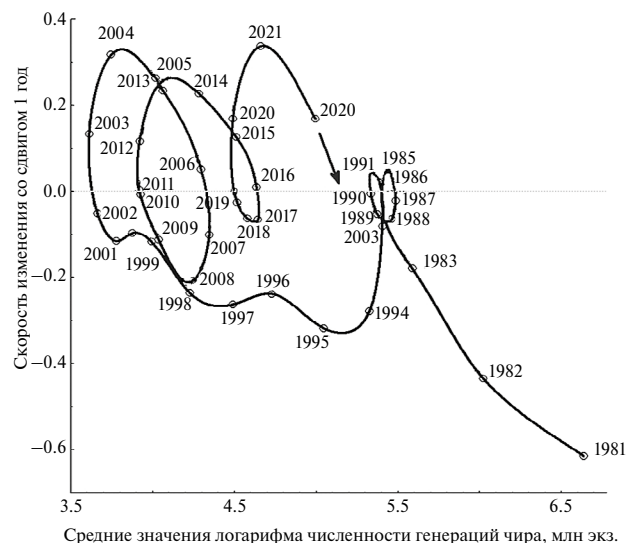


Рис. 8. Траектория состояния («фазовый портрет») популяции чира Нижней Оби в фазовом пространстве.

Продолжительное стояние пойменных вод на Нижней Оби в 2014–2020 гг. способствовало увеличению репродукционных характеристик производителей чира. За семь многоводных лет средние значения массы и длины тела чира увеличились. Однако в 2022 г. с возникновением водности ниже средних показателей произошло резкое снижение темпа роста чира (рис. 9). Это может быть связано не только с гидрологическим режимом, но и резким ухудшением условий нагула в Обской губе в связи с нарушениями, вызванными строительством газопровода «Новый Порт – Ямбург» в 2020–2021 гг. Аналогичные изменения темпа роста до минимальных значений были выявлены в этот период и у других сиговых рыб [5].

Воспроизводство чира лимитируется естественными факторами в меньшей степени, нежели антропогенными. Наиболее значимые абиотические факторы смертности – перемерзание нерестилищ, сильное ветровое волнение в период нагула ранних личинок и недостаток корма [24–26]. Такой фактор, как перемерзание нерестилищ, снижающее выживание икры, имеет решающее значение для воспроизводства чира в р. Сыня (один раз в десять лет), а также в рр. Харбей и Лонготъеган, где периодически наблюдается 100%-ная гибель икры [2, 3]. Роль этого фактора как регулятора воспроизводства снижается при высоких уровнях воды в зимнюю межень, при отсутствии сильных морозов и обильном снежном покрове.

Наиболее существенный антропогенный фактор, влияющий на численность чира, – промысел, что отмечено также А.К. Матковским [27]. Влияние загрязнения, производства горных работ и водопотребления в масштабах Нижней Оби остается второстепенным. Лишь в многоводные годы изъятие потенциальных производителей

промыслом снижается из-за высокого уровня и длительного стояния воды, что способствует проходу большего числа рыб на нерестилища. Уникальные гидрологические условия, какие были в 1979 г. и 2014–2020 г., спасают популяцию чира от уничтожения промыслом. Так, пониженная нагрузка промысла (за счет высокой водности и снижения квот) и хорошо организованная охрана на нерестовых притоках в ЯНАО в 2015 г. способствовала появлению многочисленной генерации чира в 2016 г. – в 2.5 раза больше средней многолетней величины.

Сохранение высокого уровня воспроизводства чира Нижней Оби в основном зависит от сохранения экосистем нерестовых притоков и рационального ведения промысла, обеспечивающего естественную структуру нерестовых стад и пропуск необходимого числа производителей на нерестилища. Для решения этой проблемы необходимо создавать на местах размножения сиговых рыб особо охраняемые территории (ООПТ). В настоящее время экосистемы уральских нерестовых притоков еще могут обеспечивать нормальное воспроизводство сиговых рыб. В бассейнах рек Сыня и Войкар в 2017 г. организован региональный заказник. В бассейне р. Северной Сосьвы нет ООПТ, хотя ее притоки Хулга и Манья являются уникальными нерестовыми реками, обеспечивающими высокое выживание икры чира. Нетронутость нерестилищ в уральских притоках Нижней Оби, обеспечивающих нормальное воспроизводство, оказалась основным фактором сохранения чира как биоресурса. В то же время уничтожение нерестилищ в Средней Оби ниже Новосибирской ГЭС и в р. Томь при добыче ПГС и углублении русла привело к прекращению естественного воспроизводства и в итоге к уничтожению муксуна.

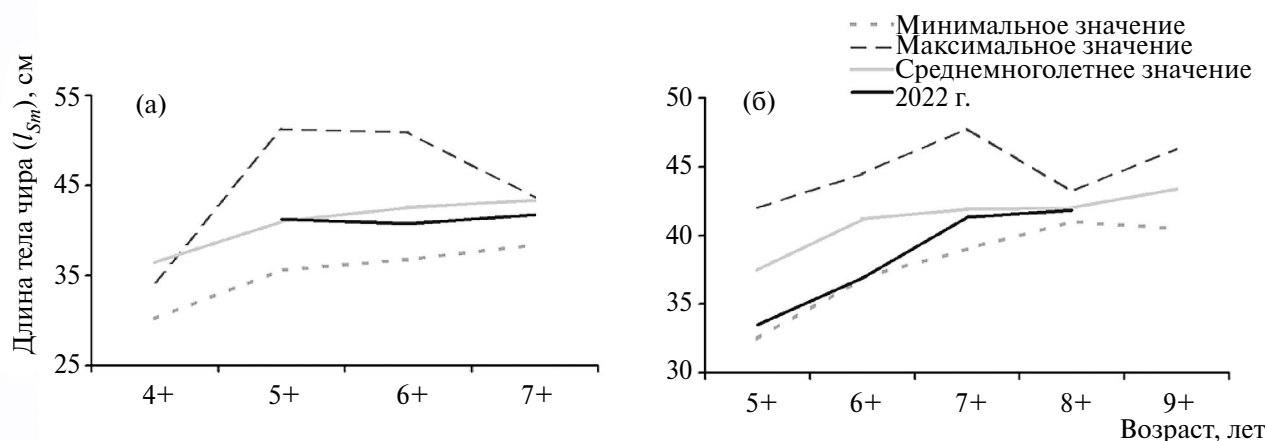


Рис. 9. Длина тела чира в основных возрастных группах: а – р. Собь, б – р. Войкар.

В последние годы для восстановления запасов сиговых рыб Оби все больше внимания уделяется их искусственному воспроизводству в ущерб мероприятиям по сохранению естественного воспроизводства. В качестве объекта искусственного воспроизводства и компенсации ущерба водным биоресурсам в бассейне Оби наряду с другими видами используется чир. Полученные данные динамики генераций за многолетний период показывают, что чир в бассейне Оби в настоящее время гораздо больше нуждается в охранных мероприятиях, нежели в искусственном воспроизводстве. Основным гарантом сохранения естественного воспроизводства чира служат ненарушенные нерестилища в уральских притоках Нижней Оби, обеспечивающие высокое выживание икры в условиях образования обильных зажоров. Для восстановления высокой численности чира необходимо полностью ликвидировать его браконьерский лов на нерестовых реках и прекратить заготовки икры для рыбоводных целей.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что численность генераций чира крайне изменчива — минимальные по численности генерации отличаются от максимальных в 150 раз. За период с 1981 г. по 2000 г. средняя численность генераций чира составляла 250 млн, за последующие годы — 80 млн. В последнем десятилетии была зафиксирована попытка возвращения к высоким уровням воспроизводства, которая в итоге не удалась.

2. Высокая синхронность динамики численности пократных личинок чира на уральских нерестовых притоках свидетельствует о стабильных условиях инкубации икры.

3. В настоящее время уральские нерестовые реки могут обеспечивать нормальное воспроизводство и зимовку чира, а пойма Оби — нагул.

4. Воспроизводство популяции чира слабо зависит от водности поймы Нижней Оби. Значительное увеличение численности генераций происходит только в периоды повторяющихся высоких паводков на протяжении 6–7 лет (1970-е и 2014–2020 гг.).

5. С 1981 г. по 2009 г. р. Северная Сосьва имела ведущее значение в воспроизводстве обского чира. В последующие годы произошло увеличение доли вклада в численность генераций северных притоков (реки Войкар и Сось). Снижение

значения р. Северной Сосьвы в воспроизводстве чира, возможно, связано как с потеплением климата в регионе, так и с увеличением промысловой нагрузки, включая изъятие для рыбоводных нужд и браконьерством.

6. Для восстановления численности чира Оби необходимо существенно изменить систему охраны нерестовых стад и организовать ООПТ в бассейне р. Хулги. Условия естественного воспроизводства чира в уральских притоках благоприятные, что сохраняет возможность восстановления высокой численности популяции без искусственного воспроизводства, но при строгой охране нерестовых стад.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ИЭРиЖ УрО РАН по теме «Состояние и динамика биоресурсов животного мира Уральского региона, разработка научных основ его мониторинга и охраны» № 122021000084-4.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность д.б.н. Л.Н. Агафонову за предоставленный материал по водности поймы Оби. Также признательны сотрудникам ИЭРиЖ УрО РАН (ИЭРиЖ УрО АН СССР), которые собирали материал, использованный в статье: С.М. Мельниченко (1981–1994 гг., р. Северная Сосьва), к.б.н. П.П. Прасолову (1986–1992 гг., р. Войкар), д.б.н. М.Г. Головатину (1986–2012 гг., р. Войкар), А.Л. Гаврилову (1991–2020 гг., р. Сыня), Л.Н. Степанову (1996–2011 гг., р. Северная Сосьва), Л.С. Горбунову и М.Ю. Ильину (2021–2023 гг., реки Сыня и Сось).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Сбор и обработка биологического материала происходили в соответствии с международным документом European Convention for the protection of Vertebrate animals used for experimental and other scientific purposes (ETS №123) (Европейская конвенция о защите позвоночных животных, используемых в экспериментах и в других научных целях [13]).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экология рыб Обь-Иртышского бассейна. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2006. 596 с.
2. Богданов В.Д., Богданова Е.Н., Госькова О.А. и др. Экологическое состояние притоков Нижней Оби (реки Сыня, Войкар, Сось). Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 135 с.
3. Богданов В.Д., Богданова Е.Н., Госькова О.А. и др. Экологическое состояние притоков Нижней Оби (реки Харбей, Лонготъеган, Шучья). Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2005. 236 с.
4. Богданов В.Д. Современное состояние воспроизводства сиговых рыб Нижней Оби // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2008. № 9. С. 33–37.
5. Bogdanov V.D., Kshnyasev I.A., Melnichenko I.P. et al. Generation Abundance Dynamics of Peled at the Lower Reaches of the Ob' River in 1981–2021 // Russ. J. of Ecology. 2024. V. 55. №1. P. 42–51.
6. Кеммерих А.О. Гидрография Северного, Приполярного и Полярного Урала. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 138 с.
7. Пахоруков А.М. Изучение распределения рыб в водохранилищах и озерах. М.: Наука, 1980. 64 с.
8. Покатная миграция молоди рыб в реках Волга и Или. М.: Наука, 1981. 320 с.
9. Богданов В.Д. Морфологические особенности развития и определитель личинок сиговых рыб р. Оби. Екатеринбург, 1998. 54 с.
10. Богданов В.Д. Изучение динамики численности и распределения личинок сиговых рыб реки Северной Сосьвы. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. 60 с.
11. Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пищепромиздат, 1966. 376 с.
12. Государственный Водный Кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1984. Т. 1. Вып. 10. 320 с.
13. European convention for the protection of vertebrate animals used for experimental and other scientific purposes. European treaty series № 123. Strasbourg, 18.03.1986. [Электронный ресурс]. – URL: <https://rm.coe.int/168007a67b> (дата обращения 17.11.2023).
14. Hammer O. PAST Paleontological Statistics. Version 3.18. Reference Manual. 2017. 259 p.
15. Weiss C.H. StatSoft, Inc., Tulsa, OK.: STATISTICA, Version 8 // AStA Advances in Statistical Analysis. 2007. V. 91. № 3. P. 339–341. <https://doi.org/10.1007/s10182-007-0038-x>
16. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Изд-во «Диалектика». 2017. 912 с.
17. Богданов В.Д., Агафонов Л.И. Влияние гидрологических условий поймы Нижней Оби на воспроизводство сиговых рыб // Экология. 2001. №1. С. 50–56.
18. Пузанов А.В., Безматерных Д.М., Ермолаева Н.И. и др. Современные водохозяйственные и экологические проблемы бассейна Оби и прогноз состояния до 2030 года // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 6. С. 45–58. https://doi.org/10.35567/19994508_2022_6_3
19. Богданов В.Д. Пространственное распределение личинок сиговых рыб по акватории Нижней Оби // Биология сиговых рыб. М.: Наука, 1988. С. 178–191.
20. Богданов В.Д. Выживание икры сиговых рыб на нерестилищах в уральских притоках Нижней Оби // Научный вестник. 2007. Вып. 2 (46). С. 42–49.
21. Богданов В.Д. Экологические аспекты размножения сиговых рыб в уральских притоках Нижней Оби // Экология. 1985. № 6. С. 32–37.
22. Богданов В.Д. Экология молоди и воспроизводство сиговых рыб Нижней Оби : Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 1997. 38 с.
23. Копориков А.Р., Богданов В.Д. Оценка изменений протяженности нерестовых миграций производителей полупроходного налима (*Lota lota* L., 1758) по многолетним данным учета покатной молоди // Экология. 2020. № 6. С. 441–449. DOI: 10.31857/S0367059720060037 [Koprikov A.R., Bogdanov V.D. Assessment of changes in the distance of spawning migrations of semianadromous burbot (*Lota lota* L., 1758) spawners based on long-term records of the abundance of downstream migrating larvae // Russ. J. Ecol. 2020. V. 51. № 6. P. 541–549. <https://doi.org/10.1134/S106741362006003X>]
24. Богданов В.Д., Богданова Е.Н. Использование факторов среды для оценки смертности личинок пеляди в условиях поймы Нижней Оби // Поведение рыб: Мат-лы IV Всерос. конф. с междунар. участием. Борок, 2010. С. 5–8.
25. Богданов В.Д., Богданова Е.Н. Трофический фактор во время перехода на активное питание личинок пеляди *Coregonus peled* (Gmelin) в нативном ареале // Экология. 2016. № 2. С. 117–129. [Bogdanov V.D., Bogdanova E.N. Trophic factor during the transition of peled (*Coregonus peled* Gmelin) larvae to active feeding in their native range // Russ. J. of Ecology. 2016. V. 47. № 2. P. 167–178]. <https://doi.org/10.1134/S1067413616020041>
26. Копориков А.Р., Богданов В.Д. Выживание ранних личинок налима (*Lota lota* L., 1758) в пойме Оби // Экология. 2021. № 6. С. 420–429. DOI: 10.31857/S0367059721060068 [Koprikov A.R., Bogdanov V.D. Survival of early burbot larvae (*Lota lota* L., 1758) in the Ob floodplain // Russ. J. of Ecology. 2021. V. 52. № 6. P. 485–494. <https://doi.org/10.1134/S1067413621060060>]
27. Матковский А.К. Изучение особенностей формирования запасов и динамики численности обского чира (*Coregonus nasus* Pallas) // Вопросы рыболовства. 2009. Т. 10. №2 (38). С. 326–361.

ABUNDANCE DYNAMICS OF BROAD WHITEFISH (*COREGONUS NASUS* (PALLAS, 1776)) GENERATIONS IN THE LOWER OB DURING 1981–2023

V. D. Bogdanov^{a,*}, A. R. Koporikov^{a,**}, I. P. Melnichenko^a, I. A. Kshnyasev^a,

O. A. Goskova^a, Y. A. Kizhevatov^a

^a*Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Russia 620144 Ekaterinburg*

^{*}*e-mail: Bogdanov@ipae.uran.ru*

^{**}*e-mail: Koporikov@mail.ru*

Abstract — The results of estimation of the number of generations of the Lower Ob broad whitefish are presented. On the basis of data on the number of larvae descending from spawning grounds, obtained in 1981–2023 on the main spawning rivers, conclusions are drawn about the current demographic situation in the Lower Ob broad whitefish population, about the influence of anthropogenic factors and water content of the Ob floodplain on reproduction. It was established that the decisive importance in the reproduction of the broad whitefish in the 80s and 90s belonged to the Severnaya Sosva River. In recent years, there has been an increase in the contribution of the more northern rivers Voykar and Sob. The decreasing role of the Severnaya Sosva River is connected both with climate warming in the region and with increased removal of producers by fishing, including for fish breeding needs. The reproduction of the broad whitefish population is weakly dependent on the water availability in the Lower Ob floodplain. In order to restore its numbers, it is necessary to significantly change the system of protection of spawning herds and organise protected areas in the Khulga River basin. Artificial reproduction of the broad whitefish is not required.

Keywords: whitefish, reproduction, larvae, generation, floodplain, spawning tributaries, water availability, temperature, limiting factors

УДК [630*561:582.475]:57.045:630*181.33(574.2)

РАДИАЛЬНЫЙ ПРИРОСТ *PINUS SYLVESTRIS* L. В ОСТРОВНЫХ БОРАХ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА В КОНТЕКСТЕ КЛИМАТА И ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

© 2024 г. М. А. Гурская^{а, *}, Л. И. Агафонов^{а, **}, В. В. Кукарских^а, А. Ю. Сурков^а,
Фенг Чен^б

^аИнститут экологии растений и животных УрО РАН,
Россия 620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202

^бИнститут трансграничных речных бассейнов и экологической безопасности, Юньнаньский университет,
КНР 650500 Юньнань Куньминг

*e-mail: marina_gurskaya@mail.ru

**e-mail: lagafonovc@ipae.uran.ru

Поступила в редакцию 06.02.2024 г.

После доработки 24.04.2024 г.

Принята к публикации 02.06.2024 г.

Исследованы древесно-кольцевые хронологии по ширине годичного кольца сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на 8 тест-полигонах в островных борах на севере Республики Казахстан от Тургайского прогиба до восточной части Казахского мелкосопочника. Анализ связей радиального прироста сосны с климатом показал, что климатический сигнал в хронологиях может изменяться в зависимости от геоморфологических условий, обусловленных эдафическим фактором, рельефом и абсолютными высотными отметками. Эти особенности необходимо учитывать при использовании древесно-кольцевых хронологий для пространственно-временных реконструкций климата.

Ключевые слова: радиальный прирост, древесно-кольцевые хронологии, сосна обыкновенная, климат, геоморфологические условия, Казахстан

DOI: 10.31857/S0367059724050056 **EDN:** WCAKWW

Древесно-кольцевые хронологии (ДКХ) из Центральной Азии показывают высокую чувствительность радиального прироста сосны к аридному климату и достоверность дендроклиматических реконструкций [1–4]. Дендроклиматические исследования в аридном климате России выполняются на Алтае и Южном Урале [5–10], на юге Красноярского края и в Забайкалье [11–14]. В работе [15] анализировали изменчивость отклика радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на климат в лесостепи Южной Сибири по мере усиления его континентальности с запада на восток на 4900-километровой трансекте. Однако такие южные территории, как северная часть Республики Казахстан, еще недостаточно изучены дендрохронологами.

В Казахстане, как и на всей территории Евразии, отмечают современное изменение климата. Здесь за последние 100 лет температура повысилась на 0.8–1.3°C с темпами роста с 1950-х годов на 0.3°C за десятилетие, в северной части стра-

ны наблюдается увеличение количества осадков, включая зимний период [16, 17]. Повышение температуры воздуха в Казахстане влияет на засушливость климата, которая, как ожидается, будет усиливаться [18]. Более высокая температура поверхности приводит к повышенному испарению и снижению влажности почвы, особенно в засушливые летние месяцы, что увеличивает риск засухи [19, 20].

Обзор дендроклиматических исследований для Казахстана приведен в работе [21]. Однако отметим, что наибольшее число работ выполнено в горах на юге и юго-востоке страны, а также в горах Казахского Алтая [21–23], где основными объектами изучения были ель Шренка (*Picea shrenkiana* Fisch.) и лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.). На севере Казахстана ДКХ сосны исследовали в национальном парке “Бурабай” [24, 25, 26], на северо-востоке и юго-западной оконечности Алтайских ленточных боров [26]. Для северных территорий в работе [4] отмечено

увеличение радиального прироста сосны при повышении температуры воздуха и росте количества атмосферных осадков в регионе. Авторы указывают на пространственные различия в реакции прироста сосны на климатические факторы между субрегионами, отмечая, что для радиального прироста сосны в восточной части летние осадки имеют большее значение по сравнению с западным и центральным регионами.

Островные массивы сосновых лесов на севере Казахстана протянулись более чем на 1500 км с запада на восток от южной оконечности Уральских гор до Алтая, и сосна произрастает здесь в различных климатических подзонах и геоморфологических условиях [27, 28]. Различия отмечаются в ландшафтах и высотных отметках над уровнем моря, подстилающих породах и почвенных условиях. Однако в основном исследовали связи прироста с климатическими факторами (температурой воздуха, атмосферными осадками, засухами) без учета других природно-экологических факторов, в частности геоморфологических особенностей территорий, на которых выполнялись работы.

В 2010–2018 гг. нами были собраны керны сосны обыкновенной на долготной трансекте протяженностью от Наурзумского государственного природного заповедника (51°29'с.ш., 64°18'в.д.) на западе до Каркаралинского государственного национального природного парка на востоке (49°25'с.ш., 75°25'в.д.). Поскольку эта территория в дендроклиматическом аспекте остается малоизученной, наше исследование на начальном этапе имело две основные задачи: 1) изучить отклик радиального прироста сосны в различных геоморфологических и климатических условиях на территории Костанайской, Северо-Казахстанской, Акмолинской, Павлодарской и Карагандинской областей Республики Казахстан; 2) оценить дендроклиматический потенциал ДКХ сосны обыкновенной на этой протяженной территории.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Район исследований представлен тремя геоморфологическими регионами — Тургайским прогибом, Северо-Казахстанской равниной и Казахским мелкосопочником, и расположен между крупными равнинами — Западно-Сибирской на севере и Туранской низменностью на западе, а на востоке примыкает к долине р. Обь. Внутриконтинентальное положение района обуславливает резко континентальный засушли-

вый климат, где ~75% территории чувствительны к аридизации и подвержены периодическим засухам [19, 29, 30].

Леса Казахстана характеризуются очень неравномерным распространением и занимают лишь 4.7% его территории [31]. В структуре лесов на хвойные виды приходится ~14%, при этом ~80% площади хвойных лесов расположены на севере и северо-востоке Казахстана [17]. Важно, что лесорастительные условия обусловлены здесь не только климатом, но и комплексом геоморфологических структур и литологическими особенностями ландшафта [32]. Предполагается [33–35], что леса Северного Казахстана — это реликтовые леса, сохранившиеся со времени позднего плейстоцена, когда они могли быть распространены полосой от Южного Урала до Алтая.

Исследования проводили на 8 тест-полигонах (ТП), где с живых деревьев сосны обыкновенной были собраны керны. Расстояние между крайними ТП по прямой >800 км (рис. 1). Сведения о природных условиях районов исследования приведены в табл. 1. Для характеристики климата ТП использовали агроклиматическое районирование, предложенное С.С. Байшолановым с соавт. [27].

ТП 1 (Аман-Карагай) и ТП 2 (Наурзум) располагаются в зоне Тургайского прогиба, рассекающего Туранскую низменность с севера на юг. Это эрозионно-тектоническая форма рельефа протяженностью более 600 км с высотами 100–120 м над ур.м., что значительно ниже поверхности Туранской низменности на 100–200 м. По геоботанической классификации это Южно-Притобольская умеренно сухая степь Тобол-Убаганской провинции равнинной степи с песчаными почвами, которые подвержены интенсивной дефляции [28]. ТП 1 — лесной массив, который частично используется в хозяйственной деятельности [36], а ТП 2 — Наурзумский государственный заповедник, который входит в состав объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО «Сары-Арка—степи и озера Северного Казахстана» (<https://whc.unesco.org/en/list/>). Оба ТП — небольшие массивы сосновых лесов среди степи на песчаных возвышенностях и дюнах.

На Северо-Казахстанской равнине в умеренно засушливой степи Ишимо-Иртышской провинции с высотами до 120 м над ур. м. [28] на супесчаных почвах располагается ТП 3 (Рошинское) — это самый северный ТП (см. табл. 1).

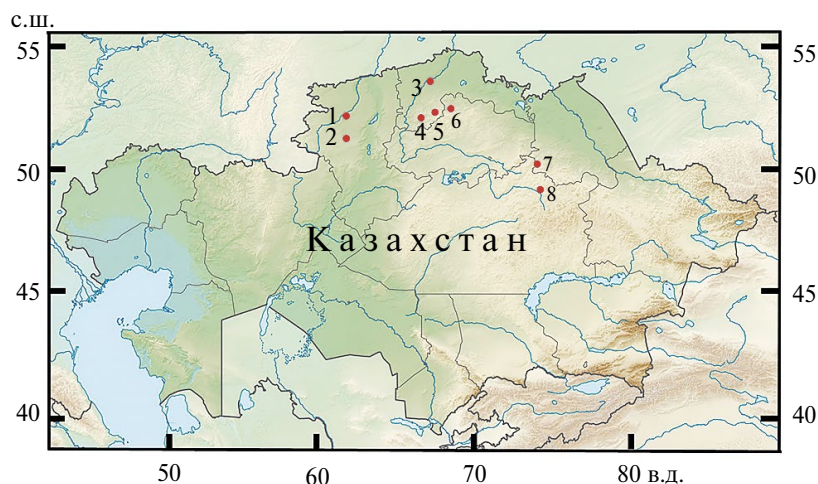


Рис. 1. Географическое расположение дендрохронологических тест-полигонов (1–8) в Северном Казахстане.

ТП 4 (Сандыктау), 5 (Малые Тюкты), 6 (Бурабай), 7 (Баянаул) и 8 (Каркаралы) располагаются в гористой части Казахского мелкосопочника (см. рис. 1 и табл. 1), одного из самых больших геоморфологических регионов Казахстана (700 тыс. км²) — с запада на восток его протяженность почти 1500 км (61–85° в.д.). Диапазон высот над уровнем моря изменяется от 200 м на западе до 1500 м на востоке. Горные породы представлены сильно метаморфизированными докембрийскими и палеозойскими толщами с гранитными интрузиями разного возраста [28]. Атмосферные осадки в этот регион поступают преимущественно с атлантическим и арктическим переносом воздушных масс. ТП 4, 5 и 6 располагаются в северо-западной части Казахского мелкосопочника. Резкая континентальность климата смягчается здесь орографическими поднятиями и сильной расчлененностью рельефа: чем более расчлененный рельеф, тем больше выпадает осадков [28]. Леса произрастают преимущественно на выходах гранитов. ТП 7 и 8 (см. рис. 1 и табл. 1) располагаются в восточной, более высокогорной части Казахского мелкосопочника — это Ерементау-Каркаралы горно-мелкосопочная умеренно сухая степь с высотами до 1350 м над ур.м. Горные массивы сложены преимущественно гранитами, на которых произрастает сосна [28]. Обе территории имеют статус национальных парков.

Древесно-кольцевые хронологии. Керны сосны обыкновенной отбирали на высоте ствола 0.3–0.4 м от поверхности почвы. Такой подход был использован, чтобы получить наиболее однородные по возрасту и максимальные по длительности ряды индивидуальных ДКХ, поскольку сосна на гранитах растет медленнее, чем на песчаных и

супесчаных почвах, и достигает возраста на высоте 1.3 м в более позднем возрасте. В исследовании использовали керны с 208 деревьев.

При подготовке и анализе образцов руководствовались методикой [37]. Общую ширину годовичных колец измеряли на LINTAB 5 в программном пакете TSAP Measuring System (Rinntech, Germany). Перекрестное датирование и проверку качества измерений проводили в программах TSAP [38] и COFESHA [39]. Программу ARSTAN [40] использовали для построения обобщенных ДКХ и стандартизации с целью устранения возрастного тренда в радиальном приросте, а также влияния на прирост местных факторов неклиматического характера. Для этих целей применялся кубический сглаживающий сплайн 67% от длины индивидуальных ДКХ.

Все полученные ДКХ имели высокий коэффициент автокорреляции. Повышенная автокорреляция предполагает более частое появление относительно высокой, но ложной статистики при выполнении климатических реконструкций, в связи с этим в последующем анализе связи радиального прироста с климатическими факторами мы использовали хронологии остатков (residuals), в которых автокорреляция устранена [40].

Для определения дендроклиматически однородных географических областей были использованы факторный анализ хронологий методом главных компонент и кластерный анализ. В программе Statistica 8.0 выполнена иерархическая классификация с объединением по методу единственной связи, выбранная мера близости — Евклидово расстояние.

Таблица 1. Природные условия дендроклиматических тест-полигонов

№ тест-полигона	Название	Территория ¹	Широта	Долгота	Высота над ур.м., м	Природная зона	Климат ²	$\Sigma T > 10^{\circ}C^3$	ВС, дни ⁴	Годовые осадки, мм	Эдафические условия
1	Аман-Карагай	ТПр	52° 48'	64° 06'	140	Степь	III-б	2600	145–150	309	Песчаные почвы
2	Наурызум	ТПр	51° 53'	64° 47'	125	Степь	III-б	2600	145–150	309	Песчаные почвы
3	Рошнское	СКр	54° 04'	69° 14'	120	Степь	I	2300	135–140	352	Супесь
4	Сандыктау	КМц	52° 57'	68° 88'	425	Лесостепь	I	2200	135–140	308	Выходы гранитов
5	Малые Тюкты	КМц	52° 83'	69° 49'	480	Лесостепь	I	2200	135–140	308	Выходы гранитов
6	Бурабай	КМц	53° 00'	70° 16'	450	Лесостепь	I	2200	135–140	308	Выходы гранитов
7	Баянаул	КМюв	50° 74'	75° 63'	600	Лесостепь	III-б	2500	150–155	323	Выходы гранитов
8	Каркаралы	КМюв	49° 45'	75° 35'	880	Лесостепь	III-б	2500	150–155	323	Выходы гранитов

Примечание. 1 – территория: ТПр – Тургайский прогиб, СКр – Северо-Казахстанская равнина, КМц – Казахский мелкосопочник, центральная часть, КМюв – Казахский мелкосопочник, юго-восточная часть; 2 – климат по [27]; 1 – умеренно влажный умеренно теплый, III-б – слабо засушливый теплый; 3 – сумма эффективных температур по [27]; 4 – продолжительность вегетационного сезона по [27].

Климатические данные. Все климатические данные взяты с сайта Королевского метеорологического института Нидерландов (KNMI) Climate Explorer (<http://climexp.knmi.nl/>). Для анализа климата использовали среднемесячные значения осадков и температуры воздуха CRU TS 4.04 [41] в координатной сетке $0.5 \times 0.5^\circ$ ($49\text{--}54^\circ$ с.ш., $64\text{--}76^\circ$ в.д.) за период 1901–2019 гг. Сравнимые в работе 30-летние подпериоды 1901–1930 и 1990–2019 гг. выбраны как наиболее удаленные во времени. Оценку значимости различий между подпериодами рассчитывали методом дисперсионного анализа в пакете ANOVA. С помощью стандартной самокалибрующей процедуры CRU PDSI 1901–2017 0.5° Global 3.26 были рассчитаны индексы суровости засух Палмера (scPDSI) для периода с мая по июль.

Согласно литературным данным [42, 43], на формирование годичных колец влияют не только климатические условия текущего, но и условия предшествующего года. В связи с этим мы использовали различные комбинации ежемесячных климатических данных от предыдущего до текущего года для выявления связи между шириной годичных колец и климатом.

Связи радиальный прирост – климат. Корреляционный (парные коэффициенты корреляции Пирсона) и регрессионный анализы были проведены для оценки климатического отклика хронологий. Постоянство/стабильность климатического сигнала (температура, осадки, индекс суровости засух Палмера scPDSI) в ДКХ во времени [44] оценивали бутстрап анализом в программе Dendroclim2002 [45] для всех ТП за 1901–2011 гг., в «окне» 40 лет с шагом 1 год. Корреляция между хронологиями и климатическими переменными (температура воздуха, осадки) была рассчитана для сезонов: апрель–июль, май–июль, май–июнь, июнь–июль, октябрь–апрель. Сравнение полученных коэффициентов регрессии выполняли в пакете ANOVA.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Особенности климата. Средняя годовая температура на ТП варьирует от $+1.3^\circ\text{C}$ (ТП 3 и ТП 6) до $+3.7^\circ\text{C}$ (ТП 2), средняя температура января от -16.0°C (ТП 7 и 8; рис. 2а) до -17.5°C (ТП 4 и 5), а в июле от $+19^\circ\text{C}$ (ТП 8; рис. 2б) до $+22.7^\circ\text{C}$ (ТП 2). Наибольшая амплитуда годовых температур характерна для западной части территории (ТП 2), а наименьшая – на юго-востоке (ТП 7 и 8). Наибольшие различия температуры харак-

терны для летнего периода (см. рис. 2б). Различия в холодный период года (октябрь – март) наименее выражены. Максимальная разница летних температур наблюдается в июле (3.7°C) между западным ТП 2 и восточным ТП 8 (см. рис. 2б).

В районе исследования осадки варьируют в достаточно широком диапазоне и $\sim 50\%$ из них приходится на период с мая по август (рис. 2в и 2г). В мае–июле наблюдается выраженный тренд увеличения количества осадков с запада на восток (см. рис. 2в). Однако при сохраняющемся тренде увеличения количества осадков на всех ТП в июле–августе на ТП 7 и 8 их меньше, чем на соседних ТП 5 и 6. Наибольшее количество осадков летнего периода характерно для ТП 3 и 6, а минимальное – для ТП 2 (см. рис. 2г).

Сравнение отклонений температуры и осадков в течение года и за май–июль в период 1990–2019 гг. относительно 1901–1930 гг. показало, что годовой ход температуры хорошо согласовывается между ТП, при этом в 1990–2019 гг. произошло увеличение температуры всех месяцев, кроме июля (рис. 3а). Наибольший рост отмечается в феврале, марте и апреле. В марте температура повысилась на $\sim 4^\circ\text{C}$ на всех ТП. В первой половине сезона вегетации температура выросла в среднем на 1.2°C в мае и 0.8°C в июне, а в июле за период 1990–2019 гг. почти не изменилась по сравнению с 1901–1930 гг. В августе–декабре температура также повысилась, особенно в западной части – на территории ТП 1 и 2.

Изменение количества осадков не имеет явной синхронности на всех ТП, за исключением июня и июля (рис. 3в). В целом на большинстве ТП в 1990–2019 гг. они уменьшились по сравнению с 1901–1930 гг. Особенно резкое и синхронное уменьшение осадков произошло в июне 1990–2019 гг. на всех ТП, а наибольшее снижение наблюдалось на ТП 3, 4, 5 и 6. Напротив, в июле произошло резкое и синхронное увеличение осадков на всех ТП, за исключением ТП 1 и 2, где их количество было сопоставимо с периодом 1901–1930 гг. (рис. 3в, г).

Древесно-кольцевые хронологии и их группировка. Полученные результаты свидетельствуют о том, что максимальный возраст деревьев не зависит от природно-климатической зоны, скорее, статус территории влияет на их возраст. На территории природных парков старые деревья встречаются чаще, чем в лесах без охранного статуса. Наиболее длительная хронология составила 273 года на ТП 8 (табл. 2).

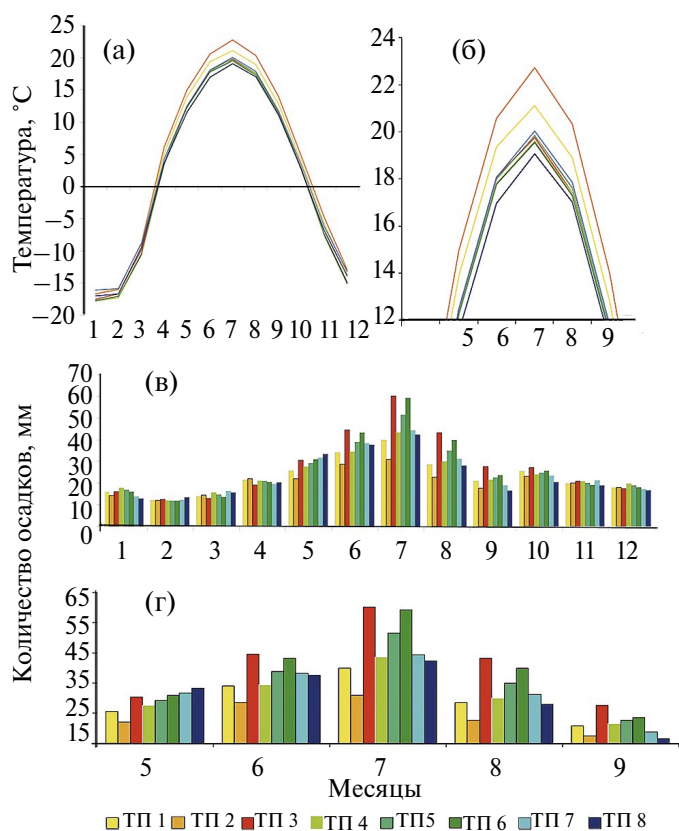


Рис. 2. Климатические данные для исследованных тест-полигонов. Средние значения для 1901–2019 гг. (по CRU TS 4.04): среднегодовая температура (а); средняя температура сезона вегетации (б); годовые осадки (в); осадки сезона вегетации (г).

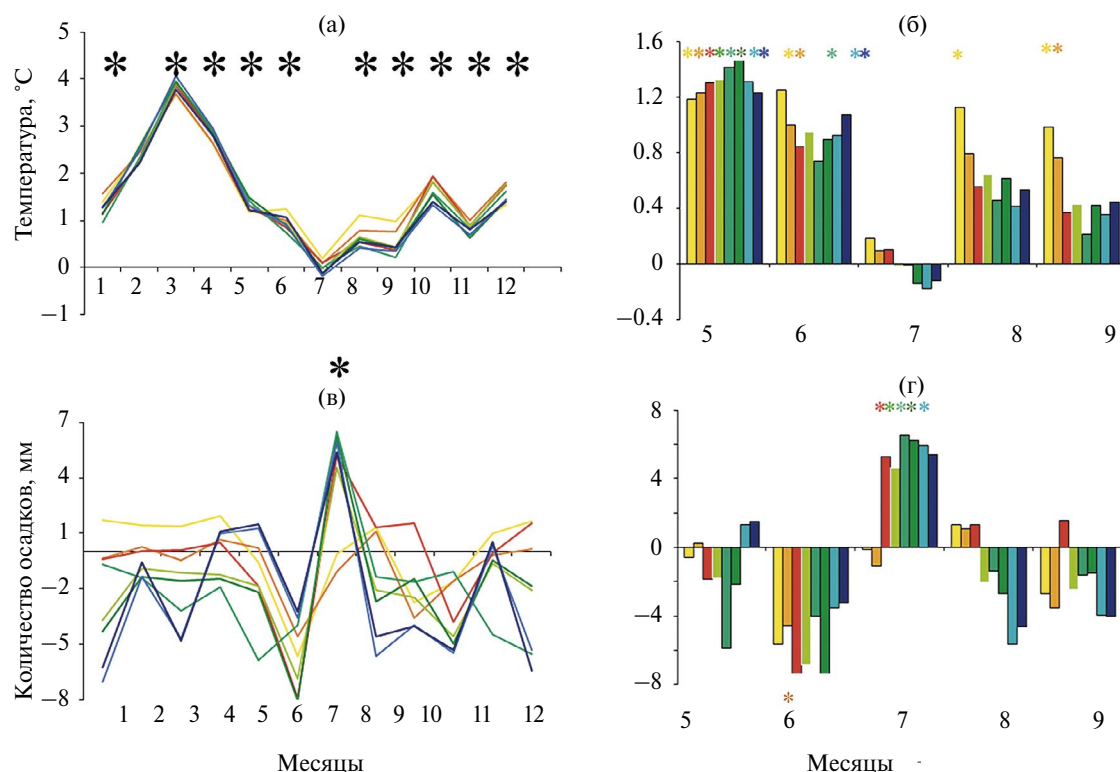


Рис. 3. Отклонения температуры воздуха в течение года (а) и в мае–сентябре (б) и атмосферных осадков (в, г) на тест-полигонах в период 1990–2019 гг. относительно 1901–1930 гг. Значимые изменения ($p < 0.05$) отмечены знаком *. Цветовое обозначение тест-полигонов см. на рис. 2.

Количество выпадающих колец в хронологиях варьирует от 0.02 до 0.62% и не зависит от природно-климатических условий, хотя деревья на ТП 1 и 2 имеют наименьшее количество выпадающих колец, а на ТП 3 и 5 — наибольшее (см. табл. 2). На общем для всех деревьев интервале 1866–2010 гг. часто выпадающие кольца отмечены в 1878, 1900, 1911, 1931, 1955, 1963, 1977, 1991, 1998 и 2004 гг. Для всех хронологий характерны высокие межсерийные коэффициенты корреляции, которые варьируют от 0.61 до 0.81. Более высокие коэффициенты отмечаются у ДКХ Казахского мелкосопочника (ТП 4–8), где деревья произрастают на гранитах. За исключением ТП 2, все хронологии имеют высокий коэффициент чувствительности (см. табл. 2), что указывает на выраженное влия-

ние климатических условий. Средняя ширина годичных колец на ТП 1–3 несколько выше, чем на остальных ТП (табл. 2, рис. 4).

Все стандартные индексированные хронологии имеют высокий коэффициент автокорреляции первого порядка (АК1), что означает зависимость величины радиального прироста от погодно-климатических условий предшествующего года [42, 43]. По величине АК1 можно заметить, что наиболее высокие значения характерны для ТП 1, 2 и 3, где АК1 варьирует от 0.79 до 0.81, и эти ТП расположены на равнинах с песчаными почвами (см. табл. 2). На остальных ТП величина АК1 варьирует от 0.61 до 0.7 — это ТП Казахского мелкосопочника, подстилаемые гранитами.

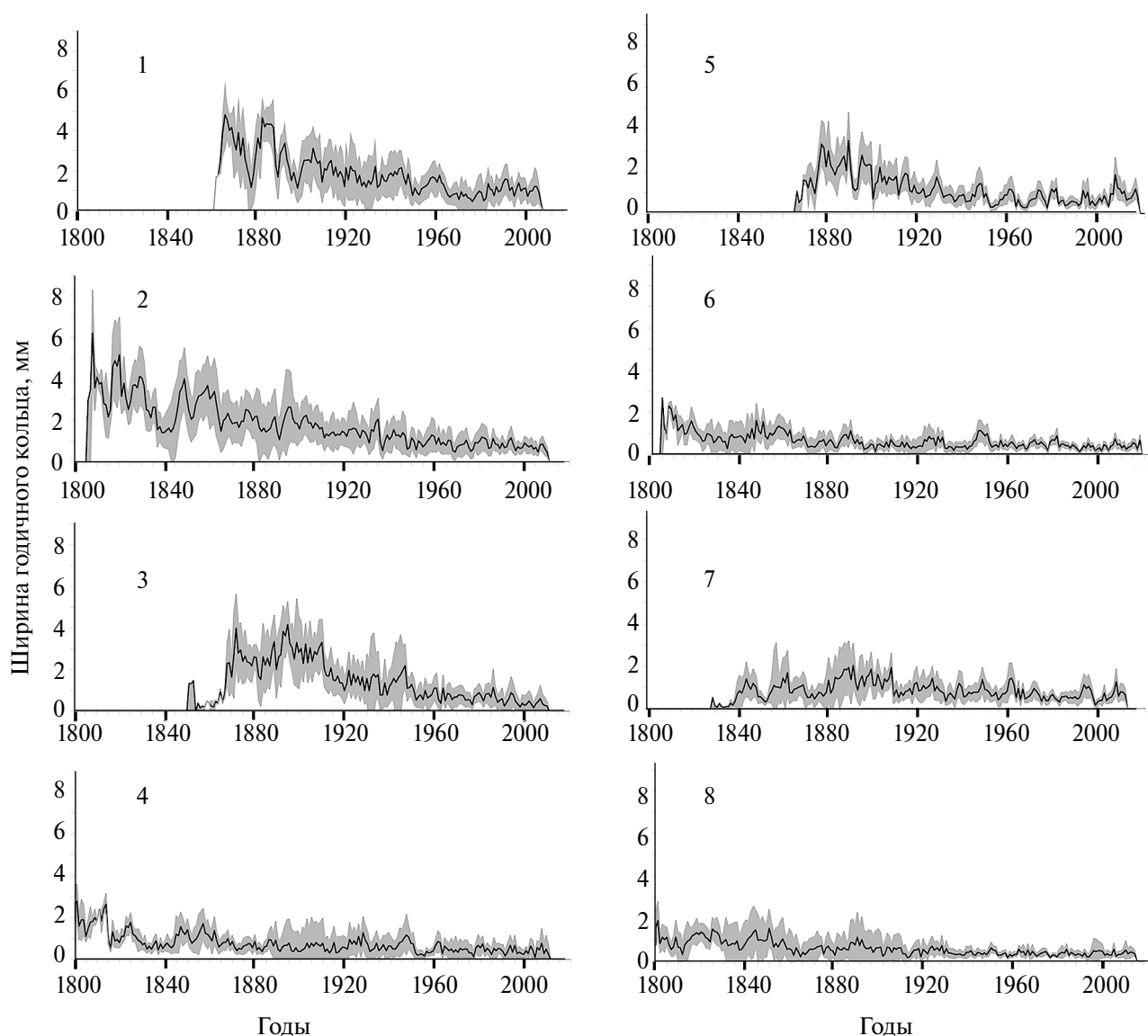


Рис. 4. Измеренные обобщенные хронологии ТП 1–8: черная линия соответствует средним значениям радиального прироста в мм, серым цветом показаны стандартные отклонения.

Таблица 2. Характеристики индексированных стандартных древесно-кольцевых хронологий

Тест-полигон	Статус территории ¹	Число деревьев	Период ДКХ, годы	Длительность хронологии, лет	Число годовичных колец	Выпадающие кольца, %	МКК ²	КЧ ³	СШГК ± СО ⁴ , мм	МШ ⁵ , мм	АКГ ⁶
1	БС	29	1863–2010	148	3709	0.08	0.69	0.27	1.77 ± 1.13	8.75	0.79
2	ГЗ	26	1806–2010	205	4450	0.02	0.61	0.18	1.64 ± 1.11	10.24	0.80
3	БС	23	1851–2010	160	2928	0.54	0.69	0.35	1.41 ± 1.16	10.26	0.81
4	БС	26	1764–2010	247	4657	0.17	0.74	0.32	0.79 ± 0.55	6.43	0.74
5	БС	19	1866–2018	152	2586	0.62	0.72	0.32	1.11 ± 0.78	6.36	0.66
6	НП	31	1805–2018	214	5492	0.22	0.81	0.35	0.62 ± 0.41	3.61	0.61
7	НП	25	1829–2011	183	3574	0.26	0.71	0.32	0.93 ± 0.6	6.77	0.54
8	НП	29	1739–2011	273	5788	0.16	0.75	0.29	0.68 ± 0.60	5.78	0.73

Примечание. 1: БС – без статуса, ГЗ – государственный заповедник, НП – национальный парк; 2 – межсерийный коэффициент корреляции; 3 – коэффициент чувствительности; 4 – средняя ширина годовичного кольца и стандартное отклонение; 5 – максимальная ширина годовичного кольца; 6 – автокорреляция первого порядка.

Таблица 3. Матрица коэффициентов корреляций Пирсона ($p < 0.05$) для индексированных хронологий между тест-полигонами (ТП) на общем интервале времени 1866–2010 гг.

ТП	1	2	3	4	5	6	7
2	0.57						
3	0.42	0.45					
4	0.44	0.35	0.48				
5	0.32	0.37	0.41	0.71			
6	0.38	0.27	0.41	0.73	0.63		
7	0.22	0.10*	0.30	0.49	0.45	0.42	
8	0.26	0.17*	0.37	0.50	0.45	0.44	0.71

* Незначимые коэффициенты корреляции. Заливкой выделены группы, объединяемые по сходным геоморфологическим условиям и наиболее высоким коэффициентам корреляции.

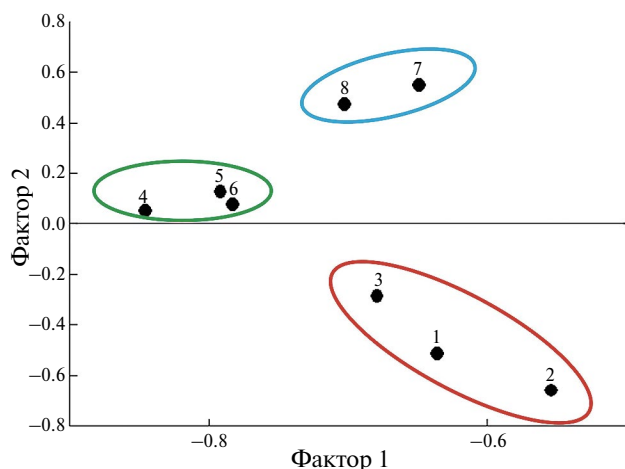


Рис. 5. Факторный анализ древесно-кольцевых хронологий с тест-полигонов 1–8 по методу главных компонент.

Географически близкие ТП показывают более высокие значения коэффициентов корреляции между ДКХ и разделяются на 3 группы (табл. 3). Самые низкие коэффициенты — между крайними группами ТП (1–3 против 7–8). Сравнение по критерию коэффициентов корреляций указывает на разделение ТП на группы со сходными геоморфологическими условиями.

Факторный анализ хронологий методом главных компонент выявил два основных фактора, объясняющих до 68% изменчивости прироста в ДКХ: первый фактор определяет 51% изменчивости, второй — 17%. Выделяются две группы ТП благодаря различию знаков факторов 1 и 2 (рис. 5): первая группа — ТП 1, 2 и 3, во вторую группу вошли ТП 4–8. Однако вторую группу ТП можно представить двумя подгруппами — ТП 4–6 и ТП 7–8.

Кластерный анализ хронологий также показал разделение всех ТП на группы. Восточные ТП 7 и 8 образуют отдельный кластер (рис. 6), аналогич-

но обособляются центральные ТП 4–6 и западные ТП 1 и 2, к которым тяготеет ТП 3. Заметим, что при этом ТП также группируются в соответствии с геоморфологическими условиями.

Связи радиальный прирост — климат. На всех ТП связь радиального прироста сосны с температурой и осадками имеет классический вид, характерный для внутриконтинентальных областей Евразии с аридным и семиаридным климатом: отрицательная — с температурой и положительная — с осадками в сезон вегетации (рис. 7). Такой характер связи отмечается для Южного Урала [5, 10, 46], Северного Казахстана [2, 4, 25], Алтая [6–8], Хакасии и Тувы [10–13]. Поскольку значимых связей прироста ранее сентября предшествующего года не выявлено, на рис. 7 анализируемый интервал времени представлен с сентября предшествующего года.

В мае–июле хронологии на всех ТП различаются в отклике на температуру. Наибольшие различия наблюдаются в мае и июле (рис. 7а). У хронологий с ТП 1, 2 и 5 нет значимой связи с температурой мая, тогда как на ТП 3, 4, 6, 7 и 8 отмечается значимая (особенно на ТП 6, 7 и 8) отрицательная связь с температурой этого месяца, при этом на ТП 7 и 8 влияние температуры максимально значимо в сезон. Температура июня оказывает значимое отрицательное влияние на ширину годичных колец сосны на всех ТП, причем на ТП 1–4 и ТП 6 это максимальные коэффициенты за сезон. В июле значимая связь ДКХ с температурой проявляется только на ТП 1–3 и ТП 7, а на ТП 4–6 и 8 влияние температуры незначимо.

Отметим некоторые выявленные особенности связи ДКХ с температурой. Для ТП 1–4 и ТП 6 наблюдается тенденция усиления связи от мая к

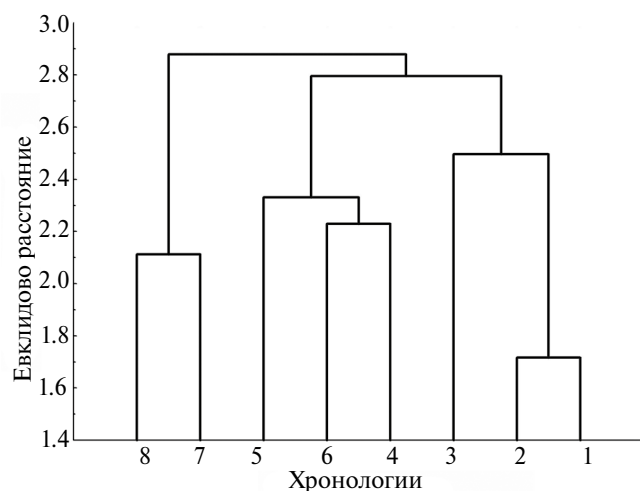


Рис. 6. Результаты кластерного анализа хронологий исследованных тест-полигонов — диаграмма Евклидовых расстояний.

июню и последующее ее ослабление в июле. На ТП 7 и 8 максимальное влияние температуры на прирост отмечается в мае и ослабевает в последующие месяцы.

Связь ДКХ с осадками имеет положительный знак практически для всех ТП в течение года (см. рис. 7б). Значимое влияние осадков на прирост наблюдается уже с апреля на ТП 6–8 и становится максимальным в июне, сохраняя свою значимость в июле на ТП 7. В мае, июне и июле связь ДКХ с осадками значима на ТП 1–3, а на ТП 4–5 только в мае и июне. Отметим тенденцию усиления значимой связи ДКХ с осадками от апреля к июлю для ТП 6–8 и для ТП 1 от мая к июлю. На остальных ТП видимые тенденции связи хронологий с осадками не проявляются.

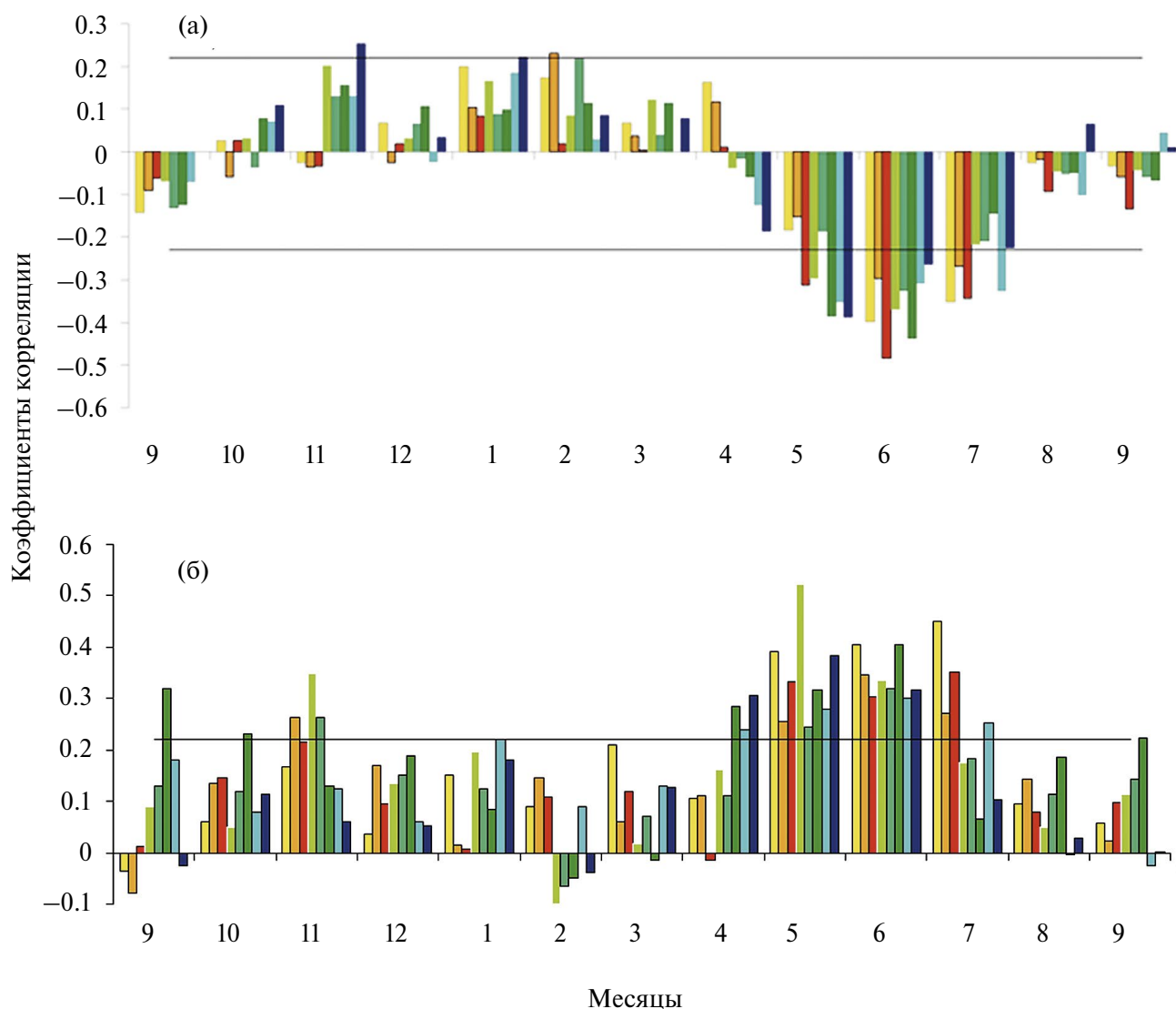


Рис. 7. Коэффициенты корреляции между обобщенными индексированными хронологиями тест-полигонов и температурой воздуха (а) и осадками (б). Горизонтальная линия — уровень значимости ($p < 0.05$). Цветовое обозначение тест-полигонов см. на рис. 2.

Множественный линейный регрессионный анализ показал, что на калибровочном интервале 1911–2015 гг. в текущий сезон вегетации осадки объясняют изменчивость ДКХ на всех ТП в большей степени, чем температура (табл. 4). Вклад температуры в изменчивость прироста варьирует от 30% (ТП 2) до 57% (ТП 3), медиана для всех ТП равна 45%. Вклад осадков в изменчивость прироста варьирует от 42% (ТП 7) до 64% (ТП 1), медиана — 51,5%. Данные табл. 4 показывают, что изменчивость прироста, обусловленная температурой, на ТП 3, 4, 6–8 начинает проявляться с начала мая, а на ТП 1, 2 и 5 позднее — с июня. Изменчивость прироста, обусловленная осадками, начинает проявляться еще раньше — с апреля на восточных ТП 6–8 и с мая — на более западных ТП 1–5. При этом модель, основанная только на осадках, описывает меньшую изменчивость прироста на восточных ТП 5–8 по сравнению с западными ТП 1, 3, 4. Совместное влияние температуры и осадков еще более усиливает изменчивость прироста на всех ТП (см. табл. 4). Следует отметить, что влияние осадков за период с мая предшествующего года по июль текущего имеет низкую значимость, а связь с температурой воздуха за этот же период отсутствует.

Постоянство связи прироста с климатом во времени. Результаты анализа показали, что связь прироста с температурой вегетационного сезона не всегда постоянно значима во времени (рис. 8а). С 1960-х гг. прослеживается общая для всех ТП тенденция усиления постоянства значимости связи прироста с температурой мая. Однако только на ТП 8 эта связь значима на всем интервале 1901–2018 гг. В июне связь прироста с температурой значимо постоянна только на ТП 3–6, при этом общая тенденция изменений не выражена. Постоянство значимой связи прироста с температурой июля 1901–2018 гг. выявлено только на ТП 1 и 3, остальные ТП не проходят этот тест.

Кривые постоянства значимой связи прироста на всех ТП с осадками мая–июля не показывают каких-либо общих тенденций (рис. 8б). Тест показал значимую связь прироста с осадками мая на ТП 1, 4, 6, 8. В июне значимо постоянная связь прироста с осадками выявлена на ТП 1–3, 5, 8. Все ДКХ (исключение ТП 1) не показали значимо постоянной связи прироста с осадками июля.

Тест на постоянство значимой связи прироста с индексом scPDSI для периода май–июль проходят все ТП, за исключением ТП 6, для которого нет значимой связи в мае и июле (рис. 8в).

Полученные результаты показывают, что климатические условия между западными (ТП 1 и 2) и восточными (ТП 8) районами исследования различаются. Для ТП 1 и 2 характерны наиболее высокие температуры воздуха в сезон активного формирования годичных колец сосны (май–июль), что обусловлено частым вторжением сухих воздушных масс из Средней Азии [47], тогда как для восточных ТП 7 и 8 температура ниже из-за высоты над уровнем моря более 600 м. Остальные ТП имеют схожие поля температуры мая–августа. Таким образом, температурные различия между ТП обусловлены географическим положением и высотой над уровнем моря.

ОБСУЖДЕНИЕ

К востоку температура сезона май–июль понижается. Небольшие различия температуры между ТП 4–7 можно объяснить гористым

Таблица 4. Изменчивость радиального прироста сосны на тест-полигонах (ТП), обусловленная влиянием температуры воздуха и атмосферных осадков за период 1911–2015 гг. (жирный шрифт — значимые коэффициенты ($p \leq 0.05$), «п» — предшествующий год)

ТП	Температура		Осадки				Температура и осадки текущего сезона вегетации
	Месяцы	Изменчивость, %	Месяцы	Изменчивость, %	Месяцы	Изменчивость, %	Изменчивость, %
1	6–7	46	5–7	64	5п-7	22	66
2	6–7	30	5–7	49	5п-7	14	50
3	5–7	57	5–7	57	5п-7	30	66
4	5–6	48	5–6	58	5п-7	18	52
5	6	35	5–6	50	5п-7	17	57
6	5–6	44	4–6	53	5п-7	19	57
7	5–7	48	4–7	42	5п-7	19	53
8	5–6	39	4–6	46	5п-7	15	53

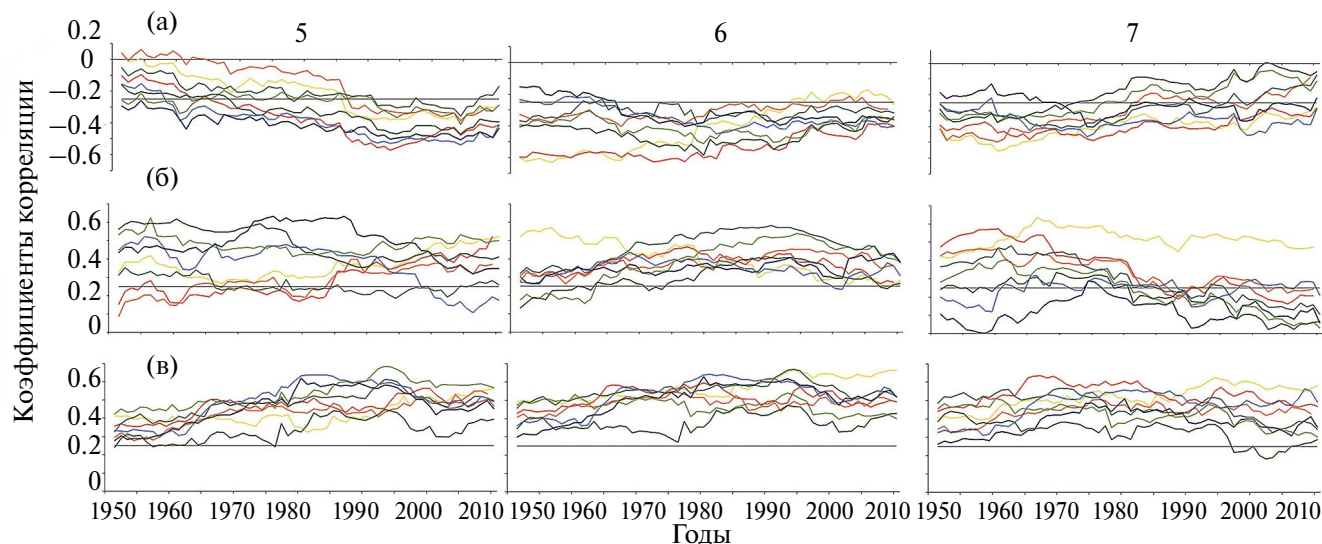


Рис. 8. Анализ стабильности связи прироста сосны на исследованных тест-полигонах за период май–июль (5, 6, 7 соответственно) с температурой воздуха (а), атмосферными осадками (б) и индексом суровости засух Палмера (в). Горизонтальные линии соответствуют уровню значимости $p < 0.05$. Цветовые обозначения тест-полигонов соответствуют рис. 2.

ландшафтом, который сглаживает градиент изменений. Возможно, в условиях равнинного ландшафта градиент температуры был бы более выраженным. Самый северный ТП 3, как и ТП 1–2, расположен в равнинной местности и на него влияют погодно-климатические условия Западной Сибири, к южной части которой этот ТП относится географически [48]. Климатические условия ТП 3 схожи с более южными, но гористыми ТП 4–6 Казахского мелкосопочника. Согласно [27], эти районы (ТП 3–6) входят в одну климатическую область, что объясняет отсутствие выраженного градиента температуры между ними.

Для осадков мая–августа характерен тренд увеличения с запада на восток (см. рис. 2). Эта особенность территории не соответствует представлению о континентальности климата Евразии, согласно которому количество осадков должно уменьшаться при движении с запада к центру континента. Вероятно, этот феномен объясняется рельефом: увеличение высоты с запада на восток от 120 до 880 м над ур. м. (см. табл. 1) вызывает рост количества осадков. Исключением из этой тенденции являются восточные ТП 7 и 8, где количество осадков уменьшается. Полагаем, что это снижение обусловлено расположением ТП в барьерной тени наиболее высоких хребтов (> 1000 м над ур.м.), которые задерживают осадки при движении воздушных масс с запада на восток.

Сравнение двух тридцатилетних периодов (1901–1930 и 1990–2019 гг.) показывает повыше-

ние температуры воздуха и снижение количества осадков во втором периоде для большинства ТП в течение года (см. рис. 3в), что можно интерпретировать как усиление аридизации климата в регионе, отмеченное ранее [19, 29, 30]. Однако для июля характерно резкое увеличение осадков (исключение – западная часть, ТП 1 и 2). На данный момент мы затрудняемся объяснить этот феномен.

Вслед за изменениями климата с запада на восток изменяется климатический сигнал в ДКХ между ТП. Разделение ТП на 3 группы мы объясняем геоморфологическими различиями и климатическими особенностями территории. Несмотря на некоторые климатические различия, в первую группу объединяются ТП 1–3, которые расположены на Тургайском прогибе и Западно-Сибирской равнине. Объединить эти ТП в одну группу позволяет эдафический фактор – песчаные и супесчаные почвы, для которых характерны глубокий вертикальный профиль и наличие горизонта грунтовых вод.

Корневая система сосны способна прорастать в глубинные горизонты таких почв на несколько метров и достигать уровня грунтовых вод. Это позволяет деревьям получать дополнительную влагу, помимо атмосферных осадков мая–июля. Дополнительной почвенной влагой можно объяснить более высокие годовичные приросты деревьев на ТП 1–3 и низкие коэффициенты чувствительности на ТП 1 и 2 по сравнению с ТП 4–8 (см. рис. 4 и табл. 2), где почвенный профиль маломощный,

а проникновение корней сосны ограничено монолитными горными породами, без аккумуляции влаги в почвенном профиле. Корневая система сосны здесь имеет поверхностное распространение и использует преимущественно атмосферные осадки текущего месяца.

Высокие коэффициенты автокорреляции на ТП 1–3 по сравнению с другими ТП также могут быть обусловлены аккумуляцией и медленной динамикой изменений глубинной влаги в почве от года к году, тогда как на каменистом субстрате межгодовая аккумуляция почвенной влаги не выражена. Косвенно на это указывает значимая положительная связь ДКХ с осадками в течение сезона (май–июль) активного роста годовых колец (см. рис. 76).

Вторая группа ТП (4–6) расположена в центральной части территории исследования, в гористых условиях Казахского мелкосопочника – на 300 км восточнее ТП 1 и 2 и на ~120 км южнее ТП 3. Расстояние с запада на восток между крайними ТП 4 и 6 около 250 км. Деревья здесь растут на маломощных почвах, подстилаемых гранитами. Эти ТП расположены по абсолютной высоте выше на 200–250 м, чем первая группа. Благодаря гористому рельефу поле температуры на территории в течение года достаточно однородное (см. рис. 2а). Негативная значимая связь ДКХ с температурой усиливается в данной группе ТП от мая к июню и становится незначимой в июле (см. рис. 7а).

Как отмечалось выше, характерная особенность территории второй группы – градиент увеличения количества осадков с запада на восток от ТП 4 к ТП 6 (см. рис. 2б). Соответственно повышается значимость связи между ДКХ и осадками с апреля по июнь (см. рис. 7б). При этом осадки апреля незначимы для хронологий ТП 4 и 5, а в мае связь хронологий ТП 4 с осадками достигает максимума. На ТП 5 и 6 максимально значимая связь ДКХ с осадками наблюдается в июне, а в июле связи становятся незначимыми на всех ТП группы. Возможно, это связано с тем, что в июле осадки достигают сезонного максимума, и их количество не оказывает значимого влияния на ДКХ. Полагаем, что своеобразие локальных условий роста деревьев в гористой местности сглаживает влияние региональных климатических условий, и это проявляется в особенностях связи ДКХ с климатом.

Третья группа ТП (7, 8) также расположена в гористой местности на маломощных почвах,

подстилаемых гранитами, но отличается еще большей абсолютной высотой, которая здесь достигает 880 м над ур.м. Связь ДКХ с температурой на этих ТП значима на протяжении мая–июля: максимально значимая связь наблюдается в мае и ослабевает к июлю (см. рис. 7а). Значимая связь ДКХ с осадками наблюдается с апреля по июнь, достигая в июне максимальных сезонных значений. При этом на ТП 7 значимое влияние осадков сохраняется и в июле. Отметим тренд усиления связи ДКХ с осадками от апреля к июню, который согласуется с сезонным трендом увеличения их количества. Поскольку это гористая местность, разнообразие условий роста деревьев здесь также может быть обусловлено локальными условиями. Известно, что выходы горных пород могут создавать благоприятный микроклимат за счет снижения средней температуры и повышения средней влажности воздуха. Здесь снижается амплитуда суточных изменений температуры и влажности воздуха, что способствует дополнительному снабжению деревьев влагой, образующейся на скалах в результате конденсации в ночное время [49, 50]. Названные особенности сближают условия на ТП 7 и 8.

Результаты сравнения двух климатических периодов (1901–1930 и 1990–2019 гг.) и теста на постоянство связи ДКХ с климатическими переменными согласуются с современным усилением аридизации климата Казахстана [19, 25, 29, 30]. Действительно, с конца 1980-х гг. наблюдается усиление негативного влияния температуры мая на радиальный прирост сосны на всех ТП (см. рис. 8а), которое сохраняется и в июне. Повышение температуры мая – июня происходило на фоне снижения количества осадков 1990–2019 гг., особенно в июне (см. рис. 3б), что приводило к увеличению влияния осадков на прирост: значимость связи прироста с осадками июня возросла в 1970–1990-х гг.

Температура июля в 1990–2019 гг. практически сохранилась на уровне 1901–1930 гг. (см. рис. 3а), а количество осадков заметно увеличилось (см. рис. 3в). Соответственно постоянство связи ДКХ с температурой на большинстве ТП сохранялось на всем исследуемом интервале времени (см. рис. 8а), а связь с осадками после 1980-х гг. перестала быть значимой на всех ТП, за исключением ТП 1 (см. рис. 8б).

Индекс scPDSI показывает, хотя и незначимые, тенденции аридизации климата в мае–июне на большинстве ТП (см. рис. 8в). Увеличение осадков

в июле не ослабляет связь этого индекса с ДКХ (за исключением ТП 6) и сохраняет свою значимость на всех ТП на протяжении сезона май–июль.

Связи ДКХ с климатическими переменными также можно рассматривать в контексте геоморфологических особенностей территорий. Связь с осадками апреля на ТП 6–8 можно объяснить ранним прогреванием склонов скальных пород, на которых растут деревья, и соответственно ранним началом сезонного роста, когда наличие влаги является необходимым условием данного процесса. При этом температура воздуха не достигает критических значений, чтобы негативно сказываться на формировании клеточных структур годичного кольца (см. рис. 2а). Нагрев почвы в мае–июне и увеличение физического испарения влаги с поверхности обуславливают негативное влияние температуры на радиальный прирост сосны. Особенно это проявляется в мае, поскольку количество осадков меньше, чем в июне и июле (см. рис. 2г и 7а). Небольшое увеличение осадков в июне усиливает их положительную роль в формировании годичного прироста на всех ТП (см. рис. 7б).

Для равнинных ТП на песках и супесях (ТП 1–3) связь прироста с температурой и осадками апреля отсутствует. Возможно, радиальный прирост деревьев здесь еще не начался из-за более позднего прогрева почвенного профиля по сравнению с горными склонами. Негативное влияние температуры в мае, связанное с эвапотранспирацией, также незначимо по той причине, что на песчаных почвах деревья формируют глубокую корневую систему, обеспечены глубинными запасами почвенной влаги, и в этом случае высокие температуры воздуха не вызывают водного стресса.

Влияние осадков и температуры остается значимым для ДКХ на ТП 1–3 и 7 в июле (см. рис. 7). На первых трех равнинных ТП с песчаными и супесчаными почвами, на которых при увеличении температуры (см. рис. 2б) и количества осадков июля (см. рис. 2г) сохраняется значимое влияние обоих факторов, осадки пополняют запас почвенной влаги (положительный эффект), а повышение температуры увеличивает эвапотранспирацию (негативное влияние). На ТП 4–6 и 8 отсутствие значимой связи ДКХ с температурой и осадками июля может быть объяснено благоприятным микроклиматом – снижением средней температуры и повышением средней влажности воздуха в гористой местности, а также

дополнительным обеспечением конденсационной влагой на скалах в ночное время [49]. Из этого контекста выпадает ТП 7, что, вероятно, связано с его особенностями орографии и/или почвенных условий. При этом модель линейной регрессии, основанная только на осадках, описывает меньшую изменчивость прироста на восточных ТП 6–8 (в среднем 47%, см. табл. 4) в сравнении с западными равнинными ТП 1–3 (56.7%). Вероятно, это обусловлено более высокими температурами и меньшим количеством осадков на западных ТП по сравнению с восточными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показали, что в направлении от Тургайского прогиба на западе до восточной части Казахского мелкосопочника происходит увеличение количества осадков, обусловленное повышением высоты над уровнем моря в этом направлении.

При сравнении двух климатических периодов – 1901–1930 и 1990–2019 гг. – обнаружено, что во втором периоде произошло синхронное увеличение температуры воздуха на всех исследуемых ТП. Количество осадков в 1990–2019 гг. на большинстве ТП снизилось без выраженной синхронности, за исключением июня и июля: в июне количество осадков резко снизилось на всех ТП, тогда как в июле резко и синхронно увеличилось. Общее снижение количества осадков подтверждает отмеченную ранее тенденцию аридизации климата Республики Казахстан.

Тест на постоянство климатического сигнала в ДКХ выявил, что не все ТП и хронологии могут быть использованы для реконструкции температуры или осадков, поскольку климатический сигнал в них непостоянен. По результатам исследования только связь ДКХ с индексом суровости засух Палмера (PDSI) сохраняла значимую стабильность во времени на всех ТП.

Все исследованные ТП разделяются на три группы в соответствии с почвенными условиями и высотой над уровнем моря. Основное разделение – на равнинные ТП на песчаных почвах и ТП в гористых условиях на маломощных почвах, подстилаемых горными породами. Последние в свою очередь подразделяются на две группы в зависимости от высоты над уровнем моря. Полагаем, что геоморфологические и почвенные условия могут в большей степени обуславливать различия в отклике радиального прироста годичных колец

сосны между ТП, чем климатические различия территорий. Эту особенность необходимо учитывать при выполнении пространственно-временных реконструкций климата на основе древесно-кольцевых хронологий. В целом островные боры северного Казахстана имеют достаточно высокий дендроклиматический потенциал и могут быть использованы для анализа климатических условий территории и выполнения климатических реконструкций.

ФИНАНСИРОВАНИЕ И БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по государственному заданию № 122021000093-6 в лаборатории дендрохронологии Института экологии растений и животных УрО РАН. Авторы благодарят двух анонимных рецензентов за высказанные замечания, что позволило улучшить понимание и восприятие статьи.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит исследований с участием людей или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davi N.K., D'Arrigo R., Jacoby G.C. et al. A long-term context (931–2005 C.E.) for rapid warming over Central Asia // *Quaternary Science Reviews*. 2015. V. 121. P. 89–97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.05.020>
2. Akkemik U., Köse N., Kopabayeva A., Mazarzhanova K. October to July precipitation reconstruction for Burabai region (Kazakhstan) since 1744 // *Int. J. Biometeorol.* 2020. V. 64. P. 803–813. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01870-8>
3. Ljungqvist F.C., Piermattei A., Seim A. et al. Ranking of tree-ring based hydroclimate reconstructions of the past millennium // *Quaternary Science Reviews*. 2020. V. 230. Art. 106074. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.106074>
4. Zhao X., Chen F., Seim A. et al. Global warming leads to growth increase in *Pinus sylvestris* in the Kazakh steppe // *Forest Ecology and Management*. 2024. V. 553. Art. 121635. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121635>
5. Кучеров С.Е. Реконструкция летних осадков на Южном Урале за последние 375 лет на основе анализа радиального прироста лиственницы Сукачева // *Экология*. 2010. № 4. С. 248–256. [Kuchеров С.Е. Reconstruction of summer precipitation in the Southern Urals over the last 375 years based on analysis of radial increment in the Siberian larch // *Russ. J. of Ecology*. 2010. V. 41. № 4. С. 284–292. DOI: 10.1134/S1067413610040028]
6. Рыгалова Н.В., Быков Н.И. Пространственно-временная изменчивость климатического сигнала древесно-кольцевых хронологий ленточных и Приобских боров // *Журнал Сибирского федерального ун-та. Сер. биол.* 2015. Т. 8. № 4. С. 394–409. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-2015-8-4-394-409>
7. Taynik A.V., Barinov V.V., Myglan V.S. et al. Growth coherency and climate sensitivity of *Larix sibirica* at the upper treeline in the Russian Altai-Sayan mountains // *Dendrochronologia*. 2016. V. 39. P. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.12.003>
8. Баринов В.В., Мыглан В.С., Тайник А.В. Экстремальные климатические события в Центральном Алтае за последние 1500 лет по данным древесно-кольцевой хронологии JELO // *Изв. РАН. Сер. географическая*. 2017. № 1. С. 91–102. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-1-91-102>
9. Баринов В.В., Мыглан В.С., Тайник А.В. и др. Экстремальные климатические события в Алтае-Саянском регионе как индикатор сильных вулканических извержений // *Геофизические процессы и биосфера*. 2018. Т. 17. № 3. С. 45–61. <https://doi.org/10.21455/GPB2018.3-3>
10. Агафонов Л.И., Гурская М.А., Кукарских В.В. и др. Островные боры Южного Урала и ленточные боры Алтая как объекты дендроклиматических исследований // *Экология*. 2021. № 5. С. 325–334. DOI: 10.31857/S0367059721050036 [Agafonov L.I., Gurskaya M.A., Kukarskih V.V. et al. Insular pine forests of the Southern Urals and ribbon pine forests of the Altai as objects of dendroclimatic research // *Russ. J. Ecol.* 2021. V. 52. P. 349–357.] <https://doi.org/10.1134/S1067413621050039>
11. Babushkina E.A., Zhirnova D.F., Belokopytova L.V. et al. Response of four tree species to changing climate in a moisture-limited area of South Siberia // *Forests*. 2019. V. 10. № 11. 999. <https://doi.org/10.3390/f10110999>
12. Белокопытова Л.В., Бабушкина Е.А., Жирнова Д.Ф. и др. Климатический отклик радиального прироста хвойных лесостепи юга Сибири: сравнение трех подходов // *Сибирский экологич. журн.* 2018. Т. 25. № 4. С. 411–424. DOI: 10.15372/SEJ20180403 [Belokopytova L.V., Babushkina E.A., Zhirnova D.F. et al. Climatic response of conifer radial growth in forest-steppe of South Siberia: comparison of three approaches // *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. V. 11. № 4. P. 366–376.] <https://doi.org/10.1134/S1995425518040030>

13. Kostyakova T.V., Babushkina E.A., Belokopytova L.V., Touchan R. Precipitation reconstruction for the Khakassia region, Siberia, from tree rings // The Holocene. V. 28. P. 377–385.
<https://doi.org/10.1177/0959683617729450>
14. Zhirnova D.F., Belokopytova L.V., Meko D.M. et al. Climate change and tree growth in the Khakass-Minusinsk Depression (South Siberia) impacted by large water reservoirs // Scientific Reports. 2021. V. 11. 14266.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-93745-0>
15. Tabakova M.A., Arzac A., Martinez E., Kirdyanov A.V. Climatic factors controlling *Pinus sylvestris* radial growth along a transect of increasing continentality in southern Siberia // Dendrochronologia. 2020. V. 62.
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125709>
16. Climate Change in Central Asia. A visual synthesis // Zoi Environment Network. 2009. 80 p.
17. Kazakhstan's Second National Communication to the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Ministry of Environment Protection, Astana, 2009. 164 p.
18. Farooq I., Shah A.R., Salik K.M., Muftaba I. Annual, seasonal and monthly trend analysis of temperature in Kazakhstan during 1970-2017 using non-parametric statistical methods and GIS technologies // Earth Systems and Environment. 2021. V. 5. P. 575–595.
<https://doi.org/10.1007/s41748-021-00244-3>
19. Hu Y., Han Y., Zhang Y. Land desertification and its influencing factors in Kazakhstan // Journal of Arid Environments. 2020. V. 180. Art. 104203.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104203>
20. Zhang P., Jeong J.-H., Yoon J.-H. et al. Abrupt shift to hotter and drier climate over inner East Asia beyond the tipping point // Science. 2020. V. 370. P. 1095–1099.
<https://doi.org/10.1126/science.abb3368>
21. Zubairov B., Lentschke J., Schroder H. Dendroclimatology in Kazakhstan // Dendrochronologia. 2019. V. 56.
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.05.006>
22. Jiang S., Zhang T., Yuan Y. et al. Drought reconstruction based on tree-ring earlywood of *Picea obovata* Ledeb. for the southern Altay Mountains // Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography. 2020. V. 102. P. 267–286. DOI:10.1080/04353676.2020.1773060
23. Zhang R., Qin L., Shang H. et al. Climatic change in southern Kazakhstan since 1850 C.E. inferred from tree rings // Int. J. Biometeorol. 2020. V. 64. P. 841–851.
<https://doi.org/10.1007/s00484-020-01873-5>
24. Kopabayeva A., Mazarzhanova K., Kose N., Akkemik U. Tree-ring chronologies of *Pinus sylvestris* from Burabai Region (Kazakhstan) and their response to climate change // Dendrobiology. 2017. V. 78. P. 96–110.
<https://doi.org/10.12657/denbio.078.010>
25. Mazarzhanova K., Kopabaeva A., Kose N., Akkemik U. The first forest fire history of the Burabai Region (Kazakhstan) from tree rings of *Pinus sylvestris* // Turk. J. Agric. For. 2017. V. 41. P. 165–174.
<http://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/>
26. Mapitov N.B., Belokopytova L.V., Zhirnova D.F. et al. Factors limiting radial growth of conifers on their semiarid borders across Kazakhstan // Biology. 2023. V. 12. Art. 604.
<https://doi.org/10.3390/biology12040604>
27. Байшолонов С.С., Павлова В.Н., Жакиева А.Р. и др. Агроклиматические ресурсы Северного Казахстана // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 1. С. 168–184.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=35138146>
28. Казахстан. Природные условия и естественные ресурсы СССР. Т. 7. / Ред. И.П. Герасимов. М.: Наука, 1969. 482 с.
29. Deng H., Yin Y., Xiang Han. Vulnerability of vegetation activities to drought in Central Asia // Environ. Res. Lett. 2020. V. 15. Art. 084005.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab93fa>
30. Lopez Fernandez M.L., Zhumabayev D., Garcia R.M. et al. Assessment of bioclimatic change in Kazakhstan, end 20th – middle 21st centuries, according to the PRECIS prediction // PloS One. 2020. V. 15. Art. e0239514.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239514>
31. The Sixth National report on biological diversity in the Republic of Kazakhstan. Astana, 2018. 226 p.
32. Бирюков В.Н., Маланьин А.Н. Генетическая классификация лесов Северного, Центрального и Южного Казахстана // Эколого-географические и генетические принципы изучения лесов / Ред. Зубарева Р.С., Фильрозе Е.М. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. С. 69–74.
33. Гордягин А.Я. Материалы для познания почв и растительности Западной Сибири. Казань, 1900–1901. 382 с. (Тр. Об-ва естествоиспытателей при Казан. ун-те. Т. 34. Вып. 3).
34. Крашенинников И.М. Основные пути развития растительности Южного Урала в связи с палеогеографией Северной Евразии в плейстоцене и голоцене // Сов. ботаника. 1939. № 67. С. 67–99.
35. Грибанов Л.Н. К истории степных боров Западной Сибири и Северного Казахстана // Ботан. журн. 1957. Т. 42. № 4. С. 556–570.
36. Usoltsev V.A., Vanclay J.K. Stand biomass dynamics of pine plantations and natural forests on dry steppe in Kazakhstan // Scandinavian Journal of Forest Research. 1995. V. 10. № 1-4. P. 305–312.
<https://doi.org/10.1080/02827589509382897>
37. Stokes M.A., Smiley T.L. An introduction to tree-ring dating. Chicago: The University of Chicago Press, 1968. 73 p.
38. Rinn F. TSAP. Reference Manual. Version 3.0. Heidelberg, 1996. 263 p.
39. Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-Ring Bull. 1983. V. 43. № 3. P. 69–78.

40. Cook E.R., Krusic P.J. Program ARSTAN: a tree-ring standardization program based on detrending and autoregressive time series modeling, with interactive graphics. Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, N.Y., 2005.
41. Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multi-variate climate dataset // *Sci. Data*. 2020. V. 7. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-323>.
42. Fritts H. Tree rings and climate. London; N.Y.; San Francisco: Academic Press, 1976. 567 p.
43. Esper J., Schneider L., Smerdon J.E. et al. Signals and memory in tree-ring width and density data // *Dendrochronologia*. 2015. V. 35. P. 62–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2015.07.001>
44. Wilmking M., van der Maaten-Theunissen M., van der Maaten E. et al. Global assessment of relationships between climate and tree growth // *Glob. Change Biol*. 2020. V. 26. P. 3212–3220. <https://doi.org/10.1111/gcb.15057>
45. Biondi F., Waikul K. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies // *Computers & Geosciences*. 2004. V. 30. № 3. P. 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2003.11.004>
46. Агафонов Л.И., Кукарских В.В. Изменения климата прошлого столетия и радиальный прирост сосны в степи Южного Урала // *Экология*. 2008. № 3. С. 173–180. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9976741> [Agafonov L.I., Kukarskih V.V. Climate changes in the past century and radial increment of pine in the Southern Ural Steppe // *Russ. J. of Ecology*. 2008. V. 39. №3. P. 160–167. DOI:10.1134/S1067413608030028]
47. Борисов А.А. Климаты СССР. М.: Просвещение, 1959. 280 с.
48. Гвоздецкий Н.А. Физико-географическое районирование СССР. М.: Изд-во МГУ, 1968. 578 с.
49. Locosselli G.M., Cardim R.H., Ceccantini G. Rock outcrops reduce temperature-induced stress for tropical conifer by decoupling regional climate in the semiarid environment // *Int. J. Biometeorol*. 2016. V. 60. P. 639–649. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1058-y>
50. Hartl C., Duthorn E., Tejedor E. et al. Micro-site conditions affect Fennoscandian forest growth // *Dendrochronologia*. 2021. V. 65. Art. 125787. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125787>

RADIAL GROWTH OF *PINUS SYLVESTRIS* L. IN ISLAND BORES OF NORTHERN KAZAKHSTAN IN THE CONTEXT OF CLIMATE AND GEOMORPHOLOGICAL CONDITIONS

M. A. Gurskaya^{a,*}, L. I. Agafonov^{a,}, V. V. Kukarskih^a, A. Y. Surkov^a, Feng Chen^b**

^a*Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Russia 620144 Ekaterinburg*

^b*Institute of Transboundary River Basins and Ecological Security, Yunnan University,
China 650500 Kunming Yunnan*

^{*}*e-mail: marina_gurskaya@mail.ru*

^{**}*e-mail: lagafonovc@ipae.uran.ru*

Abstract — Tree-ring chronologies based on the width of the annual ring of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) were studied at 8 test sites in island forests in the north of the Republic of Kazakhstan from the Turgai trough to the eastern part of the Kazakh small hills. An analysis of the relationships between the radial growth of pine and climate showed that the climate signal in chronologies can change depending on geomorphological conditions determined by the edaphic factor, relief and absolute elevations. These features must be taken into account when using tree-ring chronologies for spatiotemporal climate reconstructions.

Keywords: radial growth, tree-ring chronologies, Scots pine, climate, geomorphological conditions, Kazakhstan