

ВЕСТНИК

ISSN 0869–7698

ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО
ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ
НАУК

3

2025



НАУКА
— 1727 —

ВЕСТНИК

Научный журнал

Учредители
РАН
ДВО РАН

Журнал основан в 1932 г.
Издание прекращено в 1939 г.,
возобновлено в 1990 г.

ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО
ОТДЕЛЕНИЯ

РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ
НАУК

3 (241). 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Науки о Земле и окружающей среде

В.А. СТЕПАНОВ, А.В. МЕЛЬНИКОВ. Сутджарская золотороссыпная система Приамурской золотоносной провинции.....	5
Е.М. ВЕРБИЦКАЯ, С.О. РОМАНСКИЙ. Оценка параметров горных волн, рассчитанных по данным численных моделей прогноза погоды высокого пространственного разрешения в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке России.....	16
А.А. ЛЕГКОДИМОВ, Г.И. МИШУКОВА, ЛЕ ДЫК АНЬ, М.А. БОВСУН, П.Д. ЖЕРДЕВ. Потоки метана на границе раздела вода–атмосфера на акватории Южно-Китайского моря по результатам экспедиционных исследований.....	29

Биологические науки

А.В. АНОХИНА, И.В. ЛЮБАВИНА. Анатомическое строение стебля и листа <i>Sanguisorba parviflora</i> и <i>S. tenuifolia</i> (Rosaceae).....	43
В.С. ПРОКОПЕНКО (ВОЛКОТРУБ), С.В. НЕСТЕРОВА. Флористические находки на особо охраняемой территории Ботанического сада-института ДВО РАН.....	52

Сельскохозяйственные науки

А.Г. КЛЫКОВ, Г.А. МУРУГОВА, О.Г. АРХИПОВА. Оценка сортов ярового ячменя (<i>Hordeum vulgare</i> L.) различного эколого-географического происхождения на продуктивность в условиях Приморского края ..	64
М.Е. ОСТЯКОВА, О.Н. ЕМЕЛЬЯНОВ. Факторы, определяющие природную очаговость лептоспироза в природно-климатических условиях Хабаровского края.....	76
О.В. СЫРМОЛЮТ, О.Н. ТЕЛИЧКО. Перспективы использования регуляторов роста на сое в условиях юга Дальнего Востока	88
Н.Ф. КЛЮЧНИКОВА, М.Т. КЛЮЧНИКОВ, Е.М. КЛЮЧНИКОВА. Влияние некоторых факторов (сезон и возраст первого отела, происхождение по отцу, продолжительность хозяйственного использования) на молочную продуктивность коров на фермах Среднего Приамурья.....	97
А.В. КОСТЮК, Е.В. ЛЯШЕНКО. Изучение эффективности гербицида Дивикстон 25 НЭО, КЭ на посевах риса в Приморском крае.....	104
В.М. КУЗНЕЦОВ, Г.Б. РЕВИНА. Изменения селекционно-генетических свойств сахалинской популяции голштинской породы за период многолетнего разведения	114
Н.М. ШАЛАГИНА, А.А. ЧЕБУРИНА. Продуктивность и кормовая ценность однолетних травосмесей при разных сроках уборки в Камчатском крае.....	126
Г.В. ТИЩЕНКО. Перспективные гибридные комбинации при селекции картофеля на фитофтороустойчивость в Магаданской области	133

Химические науки

И.С. ТРУХИН, Н.В. ПОЛЯКОВА, П.А. ЗАДОРЖНЫЙ, С.В. СУХОВЕРХОВ. Прогнозирование солеотложения в нефтяном промысле. Современное состояние, проблемы, задачи	146
<u>Р.Л. ДАВИДОВИЧ</u> . Структурная химия комплексных соединений UO_2Cl_2 с нейтральными донорными лигандами (обзор)	170

Главный редактор вице-президент РАН академик РАН Ю.Н. КУЛЬЧИН

Заместитель главного редактора В.С. ЖЕРДЕВ

Ответственный секретарь Л.А. РУСОВА

Редакционная коллегия:

акад. РАН А.В. АДРИАНОВ	– научный руководитель (президент) Национального научного центра морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, Владивосток
чл.-корр. РАН Д.Л. АМИНИН	– зав. лабораторией Тихоокеанского института биоорганической химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН, Владивосток
д. б. н. В.Ю. БАРКАЛОВ	– главный научный сотрудник Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток
акад. РАН В.В. БОГАТОВ (зам. главного редактора)	– главный ученый секретарь ДВО РАН, Владивосток
чл.-корр. РАН С.Ю. БРАТСКАЯ	– зав. лабораторией Института химии ДВО РАН, Владивосток
чл.-корр. РАН Б.А. ВОРОНОВ	– научный руководитель Института водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск
чл.-корр. РАН С.В. ГНЕДЕНКОВ	– директор Института химии ДВО РАН, Владивосток
чл.-корр. РАН А.А. ГОНЧАРОВ	– директор Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток
акад. РАН Е.И. ГОРДЕЕВ	– научный руководитель Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский
акад. РАН Н.А. ГОРЯЧЕВ	– директор Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института им. Н.А. Шило ДВО РАН, Магадан
акад. РАН М.А. ГУЗЕВ	– директор Института прикладной математики ДВО РАН, Владивосток
акад. РАН Г.И. ДОЛГИХ	– директор Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток
д.г.-м.н. О.В. ДУДАРЕВ	– главный научный сотрудник Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток
акад. РАН Ю.Н. ЖУРАВЛЁВ	– научный руководитель Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток
д.х.н. А.И. КАЛИНОВСКИЙ	– главный научный сотрудник Тихоокеанского института биоорганической химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН, Владивосток
акад. РАН А.Г. КЛЫКОВ	– зав. отделом Федерального научного центра агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, Уссурийск
акад. РАН Н.Н. КРАДИН	– директор Института истории, археологии и этнографии народов Дальнего Востока ДВО РАН, Владивосток
чл.-корр. РАН П.В. КРЕСТОВ	– директор Ботанического сада-института ДВО РАН, Владивосток
чл.-корр. РАН С.П. КРЫЖАНОВСКИЙ	– заместитель председателя ДВО РАН, Владивосток
акад. РАН В.Л. ЛАРИН	– научный руководитель Института истории, археологии и этнографии народов Дальнего Востока ДВО РАН, Владивосток
д. б. н. А.С. ЛЕЛЕЙ	– зав. лабораторией Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток
д.х.н. А.Г. МИРОЧНИК	– зав. лабораторией Института химии ДВО РАН, Владивосток
чл.-корр. РАН А.Ю. ОЗЕРОВ	– директор Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский
чл.-корр. РАН Ю.М. ПЕРЕЛЬМАН	– зам. директора по научной работе Дальневосточного научного центра физиологии и патологии дыхания, Благовещенск
чл.-корр. РАН С.В. ПРАНЦ	– зав. отделом Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток
акад. РАН В.И. СЕРГИЕНКО	– советник РАН, Владивосток
акад. РАН В.А. СТОНИК	– научный руководитель Тихоокеанского института биоорганической химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН, Владивосток
чл.-корр. РАН Е.Я. ФРИСМАН	– научный руководитель Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан
акад. РАН А.И. ХАНЧУК	– научный руководитель Дальневосточного геологического института ДВО РАН, Владивосток
д.г.-м.н. Р.Б. ШАКИРОВ	– зам. директора по научной работе Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток

© Российская академия наук, 2025

© Дальневосточное отделение РАН, 2025

VESTNIK

Scientific journal

OF THE FAR EAST BRANCH

Founders
RAS
FEB RAS

OF THE RUSSIAN
ACADEMY
OF SCIENCES

The journal was found in 1932
The publication was discontinued in 1939,
was resumed in 1990

3 (241). 2025

CONTENTS

Earth and Environment Sciences

V.A. STEPANOV, A.V. MELNIKOV. The Sugdzhaz gold deposit system of the Amur gold-bearing province	5
E.M. VERBITSKAYA, S.O. ROMANSKIY. Analysis of mountain waves' characteristics obtained by high-resolution numerical modeling on Eastern Siberia and Russian Far East.....	16
A.A. LEGKODIMOV, G.I. MISHUKOVA, LE DUC ANH, M.A. BOVSUN, P.D. ZHERDEV. Methane flows at the water-atmosphere interface in the South China Sea according to the results of expeditionary research.....	29

Biological Sciences

A.V. ANOKHINA, I.V. LYUBAVINA. Anatomical structure of the stem and leaf of <i>Sanguisorba parviflora</i> and <i>S. tenuifolia</i> (Rosaceae).....	43
V.S. PROKOPENKO (VOLKOTRUB), S.V. NESTEROVA. The floristic finds in the specially protected natural territory of the Botanical Garden-Institute, FEB RAS	52

Agricultural Sciences

A.G. KLYKOV, G.A. MURUGOVA, O.G. ARKHIPOVA. Evaluating specimens of spring barley varieties (<i>Hordeum vulgare</i> L.) of various ecological and geographical origin under the conditions of Primorsky Krai.....	64
M.E. OSTYAKOVA, O.N. YEMELYANOV. Factors determining the natural foci of leptospirosis in the natural and climatic conditions of the Khabarovsk Territory	76
O.V. SYRMOLOT, O.N. TELICHKO. Prospects of using growth regulators for soybean under the conditions of the south of the Russian Far East	88
N.F. KLYUCHNIKOVA, M.T. KLYUCHNIKOV, E.M. KLYUCHNIKOVA. The influence of some factors (season and age of the first caving, paternal origin, duration of economic use) on milk productivity of cows on farms in the Middle Amur Region	97
A.V. KOSTYUK, E.V. LYASHENKO. Study of the effectiveness of the herbicide Divixton 25 NEO, CE on rice crops in the Primorsky Territory.....	104
V.M. KUZNETSOV, G.B. REVINA. Changes in breeding and genetic properties of the Sakhalin population of the Holstein breed over the period of long-term breeding	114
N.M. SHALAGINA, A.A. CHEBURINA. Productivity and feed value of annual grass mixtures at different harvesting times in the Kamchatka Territory.....	126
G.V. TISHCHENKO. Promising hybrid combinations for potato breeding for late blight resistance in the Magadan Region	133

Chemical Sciences

I.S. TRUKHIN, N.V. POLYAKOVA, P.A. ZADOROZHNY, S.V. SUKHOVERKHOV. Prediction of scale deposits in the oilfield. Current status, problems, challenges.....	146
R.L. DAVIDOVICH. Structural chemistry of UO_2Cl_2 complexes with neutral donor ligands (review)	170

Chief Editor Yu.N. KULCHIN, Academician of RAS, Vice-President of RAS

Deputy Chief Editor V.S. ZHERDEV

Executive Secretary L.A. RUSOVA

Editorial staff:

A.V. ADRIANOV, Academician of RAS	– Research Supervisor (President), A. V. Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology, FEB RAS, Vladivostok
D.L. AMININ, Corresponding Member of RAS	– Chief of Laboratory, G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
V.Y. BARKALOV, Doctor of Biological Sciences	– Principal Researcher, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok
V.V. BOGATOV, Academician of RAS (Deputy Chief Editor)	– Chief Scientific Secretary, FEB RAS, Vladivostok
S.Yu. BRATSKAYA, Corresponding Member of RAS	– Chief of Laboratory, Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
G.I. DOLGIKH, Academician of RAS	– Director, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok
O.V. DUDAREV, Doctor of Geological-Mineralogical Sciences	– Chief Researcher, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok
E.Ya. FRISMAN, Corresponding Member of RAS	– Research Supervisor, Institute of Complex Analysis of Regional Problems, FEB RAS, Birobidzhan
S.V. GNEDENKOV, Corresponding Member of RAS	– Director, Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
A.A. GONCHAROV, Corresponding Member of RAS	– Director, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok
E.I. GORDEEV, Academician of RAS	– Research Supervisor, Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky
N.A. GORYACHEV, Academician of RAS	– Director, N. A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS, Magadan
M.A. GUZEV, Academician of RAS	– Director, Institute of Applied Mathematics, FEB RAS, Vladivostok
A.I. KALINOVSKY, Doctor of Chemistry	– Principal Researcher, G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
A.I. KHANCHUK, Academician of RAS	– Research Supervisor, Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok
A.G. KLYKOV, Academician of RAS	– Head of the Department, Federal Scientific Center of Agrobiotechnology in the Far East named after A.K. Chaika, Ussuriysk
N.N. KRADIN, Academician of RAS	– Director, Institute of History, Archaeology and Ethnology of the Peoples of the Far East, FEB RAS, Vladivostok
P.V. KRESTOV, Corresponding Member of RAS	– Director, Botanical Garden-Institute, FEB RAS, Vladivostok
S.P. KRYZHANOVSKIY, Corresponding Member of RAS	– Deputy Chairman of FEB RAS, Vladivostok
V.L. LARIN, Academician of RAS	– Research Supervisor, Institute of History, Archaeology and Ethnography of the Peoples of the Far East, FEB RAS, Vladivostok
A.S. LELEJ, Doctor of Biological Sciences	– Chief of Laboratory, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok
A.G. MIROCHNIK, Doctor of Chemistry	– Chief of Laboratory, Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
A.Yu. OSEROV, Corresponding Member of RAS	– Director, Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky
Yu.M. PERELMAN, Corresponding Member of RAS	– Deputy Director for Science, Far Eastern Scientific Center of Physiology and Pathology of Respiration, Blagoveshchensk
S.V. PRANTS, Corresponding Member of RAS	– Head of the Department, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok
V.I. SERGIENKO, Academician of RAS	– Advisor of RAS, Vladivostok
R.B. SHAKIROV, Doctor of Geological-Mineralogical Sciences	– Deputy Director for Research, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok
V.A. STONIK, Academician of RAS	– Research Supervisor, G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
B.A. VORONOV, Corresponding Member of RAS	– Research Supervisor, Institute of Water and Ecological Problems, FEB RAS, Khabarovsk
Yu.N. ZHURAVLEV, Academician of RAS	– Research Supervisor, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok

Научная статья

УДК 553.411 (571.61)

DOI: 10.31857/S0869769825030015

EDN: EBXEZN

Сугджарская золотороссыпная система Приамурской золотоносной провинции

В.А. Степанов✉, А.В. Мельников

Виталий Алексеевич Степанов

доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, профессор
Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, Россия
vitstepanov@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-7028-3662>

Антон Владимирович Мельников

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник
Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Благовещенск, Россия
melnikov_anton1972@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-5193-2938>

Аннотация. Приведено описание Сугджарской золотороссыпной системы (ЗРС) одноименного рудно-россыпного узла Северо-Становой металлогенической зоны Приамурской провинции. ЗРС приурочена к интрузивно-купольному поднятию, сложенному гнейсами и кристаллосланцами архея, частично перекрытыми вулканитами раннего мела и порванными гранитоидными интрузиями средне-позднеюрского и раннемелового возраста. Показано, что россыпи и проявления золота сконцентрированы в экзоконтактовой зоне Токско-Сиваканской интрузии гранодиоритов и сиенитов токско-сиваканского комплекса раннего мела. Установлено, что основными типоморфными признаками россыпного золота являются мелкие размеры золотинок, низкая проба (727–829‰) и наличие дендритовидных кристаллов. Источники формирования россыпей – проявления рудного золота, представленные кварцевыми жилами и зонами брекчий, сцементированных кварцем со свободным самородным золотом низкой (689–827‰) пробы. Ввиду малых параметров рудных тел и низких содержаний золота известное золотое оруденение не адекватно богатым россыпям. Предполагается наличие дополнительного, ранее не выявленного источника формирования россыпей, находящегося в пределах Токско-Сиваканской гранитоидной интрузии.

Ключевые слова: золотороссыпная система, металлогеническая зона, провинция, золоторудное проявление, самородное золото

Для цитирования: Степанов В.А., Мельников А.В. Сугджарская золотороссыпная система Приамурской золотоносной провинции // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 3. С. 5–15.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030015>

The Sugdzhar gold deposit system of the Amur gold-bearing province

V.A. Stepanov, A.V. Melnikov

Vitaly A. Stepanov

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy, Chief Researcher, Professor
Research Geotechnological Center, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
vitstepanov@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-7028-3662>

Anton V. Melnikov

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher
Institute of Geology and Natural Management, FEB RAS, Blagoveshchensk, Russia
melnikov_anton1972@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-5193-2938>

Abstract. The description of the Sugdzhar gold-scattering system (ZRS) of the ore-placer node of the same name in the North-Stanovoy metallogenic zone of the Amur province is given. The ZRS is confined to an intrusive dome uplift composed of gneisses and crystal shales of the Archean, partially overlain by volcanites of the Early Cretaceous and ruptured granitoid intrusions of the Middle-Late Jurassic and Early Cretaceous age. It is shown that placers and manifestations of gold are concentrated in the exocontact zone of the Toksko-Sivakan intrusion of granodiorites and syenites of the Toksko-Sivakan complex of the Early Cretaceous. It has been established that the main typomorphic features of placer gold are the small size of gold pieces, low sample (727–829‰) and the presence of dendritic crystals. The sources of placer formation are manifestations of ore gold, represented by quartz veins and breccia zones cemented with quartz with free native gold of low (689–827‰) sample. Due to the small parameters of ore bodies and low gold contents, the known gold mineralization is not adequate for rich placers. It is assumed that there is an additional, previously unidentified source of placer formation located within the Toksko-Sivakan granitoid intrusion.

Keywords: gold deposit system, metallogenic zone, province, gold ore manifestation, native gold

For citation: Stepanov V.A., Melnikov A.V. The Sugdzhar gold deposit system of the Amur gold-bearing province. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(3):5–15. (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030015>

Введение

Сугджарская золотороссыпная система состоит из трех взаимосвязанных элементов – геолого-структурной позиции, россыпей золота и коренных источников их формирования. Входящие в систему россыпи бассейнов рек Сугджар, Гарган, Ток и Сивакан являются аномально богатыми среди других россыпных систем Северо-Становой металлогенической зоны Приамурской провинции. Из них, начиная с 1892 г., добыто более 30 т золота. Известные коренные источники, представленные небольшими проявлениями и точками минерализации, не адекватны богатству россыпей, поэтому целью исследования являлось установление закономерностей размещения россыпей Сугджарской системы и коренных источников их формирования, а также типоморфных особенностей россыпного и рудного золота для прогнозирования и поисков золоторудных месторождений, в том числе новых типов.

Геолого-структурная позиция Сугджарской золотороссыпной системы

В геолого-структурном плане бассейн рек Сугджар, Гарган, Ток и Сивакан представляет собой интрузивно-купольное поднятие (рис. 1). Основание его сложено гнейсами и кристаллосланцами раннего, в меньшей степени позднего архея. Докембрийские образования перекрыты раннемеловыми осадочными и вулканическими комплексами. В низах разреза располагаются песчаники, конгломераты и гравелиты

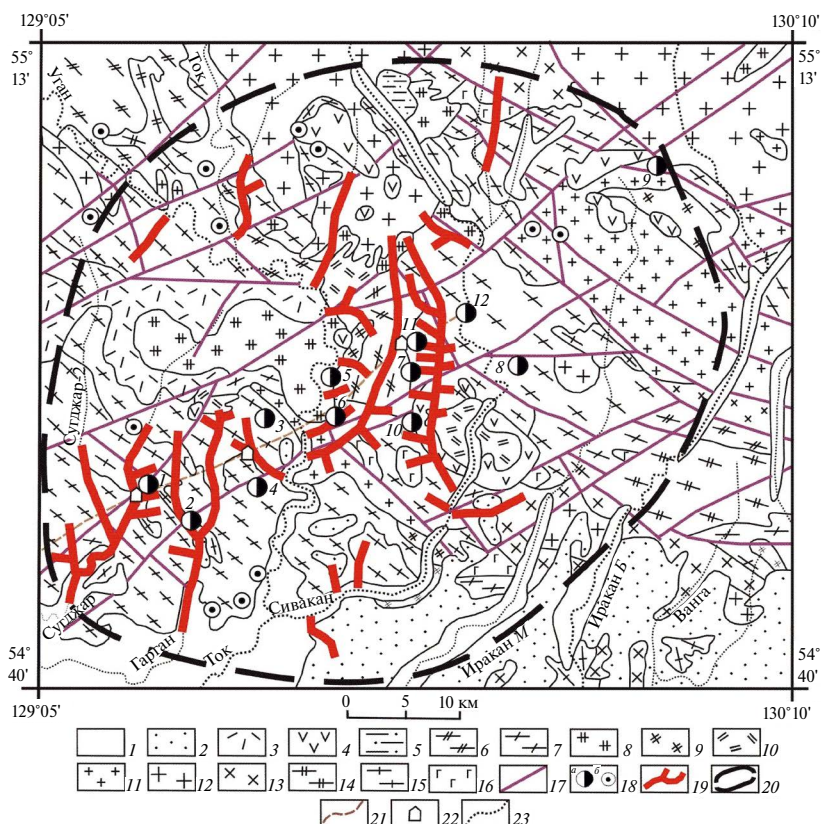


Рис. 1. Сугджарская золотороссыпная система. Геологическое строение, по: [1]. Условные обозначения: 1 – аллювиальные галечники, пески и глины квартала, 2 – пески с прослоями алевроитов, глин, лигнитов, галечников нерасчлененных темнинской и белогорской свит миоцен-неоплейстоцена, 3 – трахириолиты, трахириодациты, трахидациты верхней подсвиты бомнакской свиты нижнего мела, 4 – трахиандезиты, андезиты, андезибазальты нижней подсвиты бомнакской свиты нижнего мела, 5 – песчаники, конгломераты, гравелиты амагаласской свиты нижнего мела, 6 – плагиогнейсы с прослоями кристаллических сланцев и гнейсов марпалачской свиты верхнего архея, 7 – кристаллические сланцы и гнейсы нижнего архея нерасчлененные, 8 – гранодиориты, кварцевые сиениты второй фазы токско-сиваканского комплекса нижнего мела, 9 – кварцевые монзониты, монзониты первой фазы токско-сиваканского комплекса нижнего мела, 10 – трахириолиты, риолиты, риодациты бомнакского комплекса нижнего мела, 11 – лейкограниты, субщелочные граниты ираканского комплекса нижнего мела, 12 – гранодиориты, сиениты второй фазы тындинско-бакаранского комплекса средней-верхней юры, 13 – кварцевые диориты, монзониты первой фазы тындинско-бакаранского комплекса средней-верхней юры, 14 – граниты, гранодиориты таксакандинского комплекса верхнего архея, 15 – плагиограниты, гнейсовидные граниты древнестанового комплекса нижнего архея, 16 – метаморфизованные габбро, габбро-амфиболиты нижнего архея, 17 – разломы, 18 – проявления (а) (1 – Михайло-Семеновское, 2 – Гарган, 3 – Николаевское, 4 – Блудное, 5 – Покровское, 6 – Сергеевское, 7 – Звездное, 8 – Финальное, 9 – Иракан, 10 – Веселое, 11 – Дарюкча, 12 – Сивакан) и пункты минерализации (б) золота, 19 – россыпи золота, 20 – граница узла, 21 – автодорога, 22 – населенные пункты, 23 – водотоки

амагаласской свиты. На них залегают вулканиты бомнакской свиты раннего мела. Нижнюю подсвиту составляют трахиандезиты, андезиты и андезибазальты, верхнюю – трахириолиты, трахириодациты и трахидациты. В южной части узла отмечаются осадочные образования миоцен-неоплейстоценового возраста, представленные песками с прослоями алевроитов, глин, лигнитов и галечников.

Интрузивные образования по возрасту делятся на архейские и позднемезозойские. В металлогеническом плане наибольший интерес представляют позднемезозойские интрузивные комплексы. В северной, реже в южной, окраинах узла в средне-позднеюрское время внедрились двухфазные массивы тындинско-бакаранского комплекса. Первая фаза представлена кварцевыми диоритами и монцонитами, вторая – гранодиоритами и сиенитами. Раннемеловой этап интрузивной деятельности начинается с появления небольших интрузий лейкогранитов и субщелочных гранитов ираканского комплекса. Затем внедрились мелкие субвулканические интрузии трахириолитов, риолитов и риодацитов бомнакского комплекса. Завершается этап формированием токско-сиваканского интрузивного комплекса. Интрузии первой фазы сложены кварцевыми монцонитами и монцонитами, второй – гранодиоритами и кварцевыми сиенитами. Наиболее крупная интрузия второй фазы этого комплекса, расположенная в западной части площади, прорывает как гнейсы и кристаллосланцы архея, так и вулканиты бомнакской свиты раннего мела.

В пределах узла наиболее проявлены разрывные нарушения северо-восточного и субмеридионального простирания. Кроме того, в центральной и западной частях узла имеются фрагменты кольцевых и радиальных разломов структуры центрального типа. В эпицентре этой структуры находится крупная Токско-Сиваканская интрузия гранодиоритов и кварцевых сиенитов токско-сиваканского комплекса раннемелового возраста.

Россыпи золота

В Сугдjarской россыпной системе находится 58 промышленных россыпей золота. Россыпи аллювиального генезиса, в основном долинные, реже террасовые. Они приурочены к долинам четырех рек (с запада на восток): Сугдjar, Гарган, Ток, Сивакан – и их притоков. Сугдjar, Гарган и Ток являются правыми притоками верховьев р. Зея, Сивакан – левым притоком р. Ток. Долины рек ориентированы в субмеридиональном направлении почти параллельно друг другу, образуя своеобразную гребенчатую структуру Сугдjarской россыпной системы с основанием гребня в долине р. Зея.

Начало эксплуатации Сугдjarских россыпей датируется 1892 г. С этого времени добыто более 30 т золота (см. таблицу). Наиболее богатыми являются россыпи руч. Антониновский (добыто 3,0 т золота) и руч. Михайло-Семеновский (3,2 т) бассейна р. Сугдjar, руч. Бол. Гарган (3,4 т) и р. Гарган (2,9 т) бассейна р. Гарган, руч. Владимировский (2,6 т) бассейна р. Ток, а также руч. Утанджа-Улагир (4,7 т) бассейна р. Сивакан.

Россыпи образуют обширный ореол в экзоконтактовой зоне вокруг Токско-Сиваканского интрузивного массива, занимающего вершину водораздела рек Сугдjar, Гарган и Ток. Массив сложен гранодиоритами и кварцевыми сиенитами второй фазы токско-сиваканского комплекса раннемелового возраста. Реки Сугдjar и Гарган берут начало с южной части этого водораздела, а реки Ток и Сивакан огибают его с северо-востока, востока и юго-востока. Наиболее богатые из россыпей приурочены к долинам рек в южной и юго-восточной части экзоконтактовой зоны массива. К северу от Токского массива выявлены единичные мелкие россыпи.

Обобщенная характеристика россыпей Сугдjarской системы

№ п/п	Название россыпных бассейнов	Добыча, т	Проба золота, ‰	Размер золотин	Форма золота	Степень окатанности	Сопровождающие минералы
1	Россыпи бассейна р. Сугдjar	9,3	769 (702–800)	Мелкое, редко средней крупности, самородки до 5 г	Пластинчатая, дендритовидная, чешуйчатая, нитевидная	Окатанное и слабо-окатанное	Сростки с кварцем, шеелит, магнетит, гранат
2	Бассейн р. Гарган	8,7	727 (640–770)	Мелкое. Самородки до 1 г	Пластинчатая, лепешковидная, иногда дендритовидная и друзовидная	Слабо-, полу-окатанное и окатанное	Магнетит, ильменит, гранат, сростки с кварцем
3	Бассейн р. Ток	5,6	807 (735–856)	От мелкого до средней крупности, иногда крупное. Самородки до 30 г	Комковидная, пластинчатая, таблитчатая	От слабо- до хорошо окатанного	Сростки с кварцем, магнетит, ильменит, циркон
4	Бассейн р. Сивакан	7,8	829 (780–845)	Мелкое и средней крупности. Самородки до 85 г	Пластинчатая, лепешковидная и комковидная	Слабо-окатанное и неокатанное	Магнетит, циркон, пирит, сростки с кварцем

Примечание. Общая сумма – 31,4 т.

Самородное золото из россыпей Сугдjarской россыпной системы мелкое, реже средней крупности. Размер золотин в отдельных россыпях колеблется от 0,28 до 1,92 мм, среднее – 0,81 мм. Встречаются самородки от мелких (1–5 г) до средней крупности (10–85 г). Самородное золото отличается высокой серебристостью по сравнению россыпями других рудно-россыпных узлов Приамурской провинции. Состав его в отдельных россыпях меняется в широких пределах – от электрума (640‰) до золота средней пробы (856‰). На гистограмме пробы золота отмечаются два максимума – небольшой в районе пробы 725–750‰ и более крупный в интервале 825–850‰ (рис. 2). На участках россыпей с крупным золотом оно имеет более высокую пробу, а дендритов и друзовидных выделений не обнаружено. В качестве примесей в россыпном золоте присутствуют (в г/т): ртуть – до 593, свинец – до 124, медь – до 77, платина – до 8 [2].

По типоморфным особенностям самородного золота выделяются две группы россыпей. В первую входят россыпи бассейна рек Сугдjar и Гарган, а также руч. Николаевский (правый нижний приток р. Ток), берущие начало с южной окраины Токско-Сиваканского интрузивного массива. Во вторую – россыпи бассейнов рек Ток и Сивакан, огибающие этот гранитный массив с востока.

Самородное золото россыпей первой группы отличается преобладающими мелкими размерами зерен, редко встречающиеся самородки весом не превышают 1–5 г. Форма золотин пластинчатая, комковидная и чешуйчатая, иногда дендритовидная, друзовидная и нитевидная (рис. 3). Как подчеркивает Н.В. Петровская [3], дендритовидные кристаллы наиболее характерны для «эпитермальных» руд

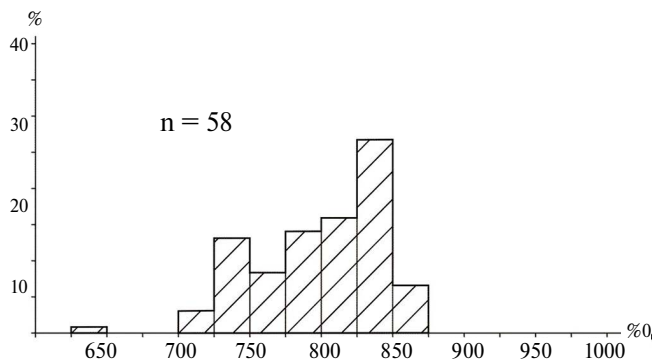


Рис. 2. Гистограмма пробы россыпного золота Сугдjarской системы

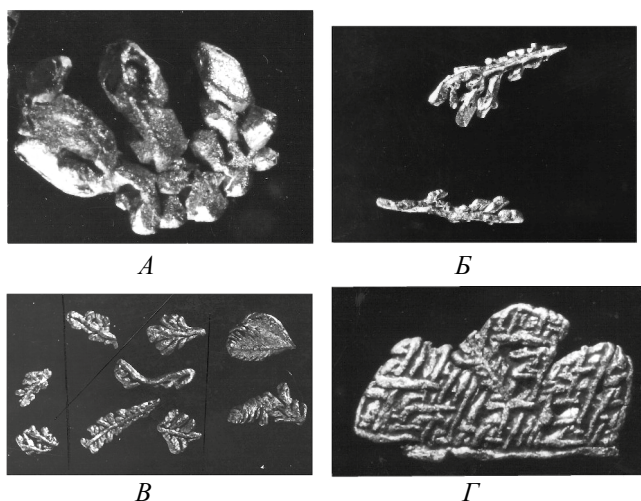


Рис. 3. Дендритовидные формы самородного золота россыпей бассейнов рек Сугдjar и Гарган [5]: *A* – друзовидный сросток кристаллов золота из россыпи руч. Антониновский (Сугдjar-3). Ув. 20; *Б* – ветчковидные дендриты из россыпи руч. Антониновский (Сугдjar-3). Ув. 20; *В* – плоские ветчковидные и листовидные дендриты из россыпи руч. Гарган. Ув. 15; *Г* – плетеный дендрит золота из россыпи р. Сугдjar-2. Ув. 40

малоглубинных месторождений, таких как Балеи, Белая Гора, Бая Сприе и др. Нами дендритовидные выделения золота отмечались в рудах вулканогенного близповерхностного месторождения Кубака золотосеребряной формации [4]. Проба золота в россыпях этой группы меняется от электрума 625–655 пробы (руч. Константиновский – приток р. Гарган) до низкопробного золота (проба от 700 до 800‰). Среди сопутствующих минералов часто отмечаются магнетит, гранат и сростки золота с кварцем.

Во второй группе россыпей бассейнов рек Ток и Сивакан отмечается самородное золото более крупных размеров с самородками весом до 85 г. Преобладающая форма золотин пластинчатая, лепешковидная и комковидная. Проба золота выше, чем в россыпях первой группы, и колеблется от низкопробного (735–750‰) до умеренно высокопробного (830–861‰). Сопутствующие минералы – магнетит, циркон, пирит, встречаются сростки золота с кварцем и сульфидами.

Коренные источники формирования россыпей

В качестве коренных источников россыпей выступают немногочисленные золоторудные проявления. Они расположены в полосе северо-восточного простираения, приуроченной к разрывным нарушениям, пересекающим по диаметру интрузивно-купольную структуру Сугджарского узла. Четыре из проявлений располагаются на юго-западном фланге этой полосы, в верховьях долин рек Сугджар и Гарган, семь – на северо-восточном ее фланге, в бассейне рек Ток и Сивакан, и одно – за пределами россыпной системы, на северо-восточном фланге рудно-россыпного узла (РРУ). Выше отмечалось, что россыпи обрамляют площадь Токско-Сиваканского интрузива, создавая впечатление, что именно в его пределах находятся главные источники формирования россыпей. Но ни одного проявления или точки минерализации в пределах массива не обнаружено.

Проявления бассейнов рек Сугджар и Гарган располагаются среди гнейсов и кристаллосланцев нижнего архея, прорванных интрузиями гранитов и габбро нижнего и верхнего архея. Наиболее изучено проявление Гарган, находящееся в верховьях р. Гарган. Вмещающими породами служат гнейсы и кристаллосланцы, прорванные интрузиями гранитов и габбро архейского возраста. Отмечаются дайки кварцевых порфиров и диоритовых порфиров раннего мела. Рудными телами являются кварцевые, кварц-полевошпатовые и кварц-карбонатные жилы, зоны окварцевания и кварцевых прожилков. Отмечаются также жилы и прожилки халцедоновидного кварца гребенчатой структуры, содержащего вкрапленность сульфидов. Они приурочены к мощной зоне рассланцевания и диафтореза северо-восточного простираения (рис. 4). Содержание золота в пробах меняется от 0,1 до 10, изредка достигают 20 г/т. Золото свободное, низкой (700–710‰) пробы.

Остальные проявления слабо изучены. Они представлены мелкими кварцевыми жилами (проявление Михайло-Семеновское) или обломками кварца, дробленых, окварцованных и пиритизированных пород (проявления Николаевское, Блудное) с низкими содержаниями золота (1–2 г/т). По составу золото этих проявлений относительно низкопробное [3]. Проба его колеблется в нешироких пределах: Михайло-Семеновское – 733–745‰, Гарган – 700–710‰, Николаевское – 689–722‰ и Блудное – 709–715‰. Состав золота проявлений коррелирует с относительно низкой пробой золота в россыпях бассейнов рек Сугджар и Гарган.

Проявлений в бассейнах рек Ток и Сивакан ненамного больше. Из них наиболее полно изучено проявление Звездное. Оно располагается на водоразделе рек Ток и Сивакан. Вмещающими породами служат кристаллосланцы и гнейсы нижнего архея, прорванные на юго-западном фланге проявления вулканитами жерловой фации и субвулканическими интрузиями андезитов, а также дайками риолитов и гранит-порфиров бомнакского комплекса раннемелового возраста. Среди гнейсов и кристаллосланцев выявлена зона хлоритизированных и окварцованных диафторитов северо-восточного простираения с параметрами 15×2 км. В ней расположены рудные тела, представленные золотоносными брекчиями, сцементированными кварцем. Содержание золота в наиболее золотоносных из них меняется, по данным бороздового опробования, от 1,3 до 7,6 г/т при мощности рудного тела в 7,5 м. Примесь серебра в рудах достигает 1 г/т, меди – 0,003–0,5%, свинца – 0,003–0,1%. Золото свободное, мелкое. Проба его низкая, меняется от 720 до 744‰ (11 определений). В такой же структурной позиции, в краевой части раннемеловой вулканоструктуры находится проявление Веселое. Здесь выявлены участки окварцевания и пиритизации с невысоким содержанием золота (до 5 г/т).

Другие проявления бассейнов рек Ток и Сивакан представлены кварцевыми жилами и зонами окварцованных брекчий среди гнейсов и кристаллосланцев архея.

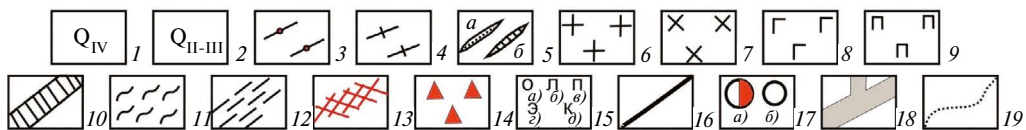
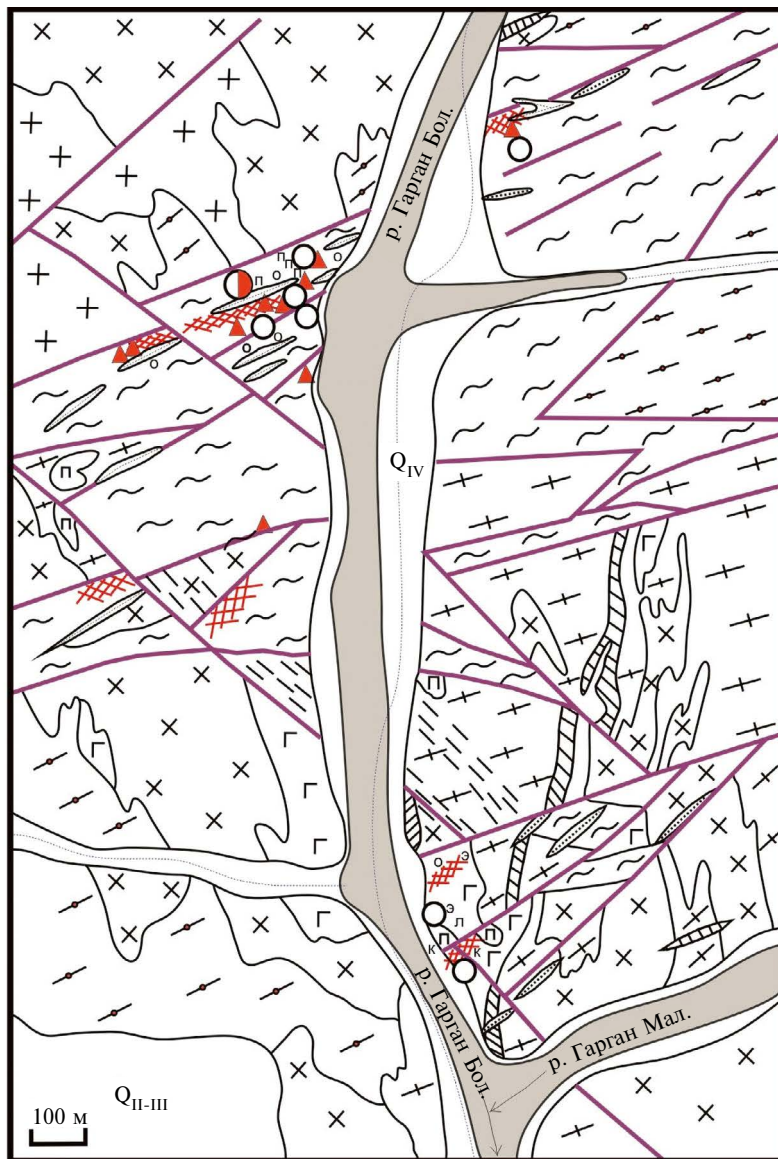


Рис. 4. Рудопоявление Гарман, по: [6]. Условные обозначения: 1 – современные аллювиальные отложения (пески, галечники, супеси); 2 – средне-верхнечетвертичные отложения (пески, супеси с галькой); 3 – амфиболиты, реже кристаллосланцы нижнего архея; 4 – кристаллосланцы, прослои и линзы амфиболитов, кварцитов нижнего архея; 5 – дайки кварцевых порфиров (а), диоритовых порфиров (б) раннего мела; 6 – граниты лейкократовые аляскитовые позднего архея; 7 – амфиболовые и биотит-амфиболовые гнейсовидные граниты позднего архея; 8 – амфиболизированное габбро, габбро-амфиболиты позднего архея; 9 – пироксениты, габбро-пироксениты, актинолитовые и тремолит-актинолитовые породы мезозоя; 10 – прослои гранат-пироксеновых гнейсов и кварцитов позднего архея; 11 – диафториты и бластомилониты позднего архея; 12 – зоны рассланцевания и диафтореза; 13 – зоны брекчирования; 14 – высыпки кварцевых брекчий и жильного кварца; 15 – гидротермальные изменения пород (а – окварцевание, б – лимонитизация, в – пиритизация, г – эпидотизация, д – карбонатизация); 16 – разломы; 17 – рудопоявление Гарман (а), пункты минерализации золота (б); 18 – россыпи золота; 19 – водотоки

В отличие от них на проявлении Иракан присутствуют зоны пиритизации среди диоритов раннего мела. Содержания золота в этих проявлениях обычно низкие (до 1–2 г/т), лишь в проявлениях Дерюкча и Сивакан они возрастают до 10–20 г/т.

Золото на всех проявлениях бассейна рек Ток и Сивакан свободное, мелких размеров. Проба его в целом несколько выше, чем в проявлениях бассейна рек Сугджар и Гарган. Она составляет в проявлениях (в ‰): Гарган – 720–740, Покровское – 803–827, Сергеевское – 756–777, Финальное – 727–765, Дарюкча – 765–779, Веселое – 770–789, Сивакан – 803–812. Состав золота этих проявлений в целом коррелирует с пробой золота из россыпей, хотя в целом и несколько ниже. Эти проявления, несомненно, являются одними из источников золота в россыпях, но, вероятно, не единственными, о чем свидетельствуют небольшие параметры рудных тел, низкие содержания золота, а также то, что золото в проявлениях рудного золота в основном низкопробное (720–789‰), а в россыпях преобладает золото со средней пробой 825–850‰.

Обсуждение результатов

Своеобразие россыпной системы Сугджарского РРУ состоит в приуроченности россыпей и проявлений золота к экзоконтактной зоне Токско-Сиваканского массива гранодиоритов и сиенитов раннемелового возраста, занимающего водораздел рек Сугджар, Гарган, Ток и Сивакан. Россыпи концентрируются в экзоконтактной зоне массива. На южном его склоне располагаются россыпи долин рек Сугджар и Гарган. Восточный фланг водораздела, сложенный гранитным массивом, обрамляют россыпи долин рек Ток и Сивакан и их притоков. К северу от массива выявлены лишь небольшие бедные россыпи в притоках р. Ток и р. Уган (также притоке р. Ток). В россыпях содержится самородное золото преимущественно мелких фракций. Одной из типоморфных особенностей является наличие дендритных кристаллов золота, часто встречающихся к югу от Токского массива, в россыпях рек Сугджар и Гарган. На гистограмме состава россыпного золота выделяются два типа – небольшой в пределах 725–750‰ и более крупный в рамках 800–850‰.

Обнаруженные проявления рудного золота образуют вытянутый в северо-восточном направлении ореол на юго-восточном обрамлении Токско-Сиваканского массива. Они представлены кварцевыми жилами и зонами брекчирования, цементированными кварцем. Параметры рудных тел, за исключением проявления Звездное, незначительные при низких содержаниях золота, обычно не превышающих 1–2 г/т. Состав рудного золота несколько отличается от россыпного. Россыпное среднепробное – с интервалом 825–850‰. В отличие от него рудное золото в основном низкопробное (689–789‰). По-видимому, имеется дополнительный коренной источник сноса золота средней пробы. Он может располагаться в пределах Токско-Сиваканского массива гранитоидов, предположительно в его восточной части, которую обрамляют россыпи с более высокопробным золотом.

Предполагается, что прогнозируемое золотое оруденение в пределах Токско-Сиваканского гранитоидного массива представляет собой штокверк слабо измененных, легко разрушающихся при выветривании гидротермально измененных гранитов с вкрапленностью свободного самородного золота. Примером месторождений подобного типа служит месторождение Саншандао провинции Цзяодун Китая. Месторождение Саншандао приурочено к одноименному гранодиоритовому массиву Саншандао позднеюрского возраста, прорывающего гнейсы и мигматизированные амфиболиты архея [7]. Здесь выявлен крупномасштабный штокверк сильно трещиноватых и измененных гранодиоритов, повергнутых

окремнению, серицитизации и сульфидизации. Самородное золото встречается в виде вкрапленности в гидротермально измененных (березитизированных) породах. Выявлены две генерации золотого оруденения [8]. Ранняя генерация золота ассоциирует с березитизированными гранитами и кварц-пиритными прожилками, в которых видимые зерна золота ассоциируют с пиритом и характеризуются пробой в широком интервале 729–961‰. Поздняя генерация золота содержится в кварцево-полисульфидных прожилках. Зерна золота ассоциируют с пиритом, галенитом, халькопиритом, арсенопиритом и сфалеритом. Оно характеризуется низкой пробой до электрума (549–719‰).

Заключение

Установлено, что Сугдзарскую систему составляют богатые россыпи рек Сугдзар, Гарган, Ток, Сивакан и их притоков. Они располагаются зонально вокруг Токско-Сиваканского гранодиорит-сиенитового массива раннемелового возраста, внедренного в гнейсы и кристаллосланцы архейского возраста. Типоморфными признаками самородного золота россыпей являются низкая проба золота в интервале 725–750‰ и средняя в интервале 800–850‰, а также наличие дендритов.

Источником золота россыпей выступают небольшие проявления, представленные кварцевыми жилами и зонами брекчирования, сцементированными кварцем. По размеру выделений и составу рудное золото в целом отвечает россыпному, хотя проба золота в рудных проявлениях несколько ниже, чем в россыпях. Ввиду небольших параметров рудных тел и низких содержаний золота установленные проявления могут быть лишь дополнительным, а не основным источником формирования россыпей.

Предполагается, что основным источником может быть золотое оруденение в пределах Токско-Сиваканского гранодиорит-сиенитового массива раннемелового возраста, представленное гидротермально измененными интрузивными породами с вкрапленностью самородного золота. Примером оруденения такого типа служит крупное месторождение Саншандао провинции Цзяодун Китая.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Петрук Н.Н., Беликова Т.В., Дербекко И.М. Геологическая карта Амурской области. Масштаб 1:500 000. Благовещенск: ФГУП «Амurgeология», 2001. 236 с.
2. Неронский Г.И. Типоморфизм золота месторождений Приамурья. Благовещенск: АмурНЦ, 1998. 320 с.
3. Петровская Н.В. Самородное золото. М.: Наука, 1973. 347 с.
4. Степанов В.А., Шишакова Л.Н. Кубакинское золото-серебряное месторождение. Владивосток: Дальнаука, 1994. 198 с.
5. Неронский Г.И., Добрая В.Т. Геохимические особенности самородного золота из россыпей Сугдзарского района // Геохимия и методы исследования минерального сырья Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ, 1975. С. 85–92.
6. Мельников А.В., Степанов В.А. Сугдзарский рудно-россыпной узел Приамурской золотоносной провинции // Отечественная геология. 2017. № 2. С. 42–50.
7. Groves D.I., Santosh M. The giant Jiaodong gold province: the key to a unified model for orogenic gold deposits? // Geoscience Frontiers. 2016. Vol. 7. P. 409–417.
8. Li L., Santosh M., Li S.R. The “Jiaodong-type” gold deposits: Characteristics, origin and prospecting // Ore Geology Reviews. 2015. Vol. 65. P. 589–611.

REFERENCES

1. Petruk N.N., Belikova T.V., Derbeko I.M. Geologicheskaya karta Amurskoj oblasti. Masshtab 1:500 000. Blagoveshhensk: FGUGP "Amurgeologiya"; 2001. 236 s. (In Russ.).
2. Neronskij G.I. Tipomorfizm zolota mestorozhdenij Priamur'ya. Blagoveshhensk: AmurNCz; 1998. 320 s. (In Russ.).
3. Petrovskaya N.V. Samorodnoe zoloto. Moscow: Nauka; 1973. 347 s. (In Russ.).
4. Stepanov V.A., Shishakova L.N. Kubakinskoe zoloto-serebryanoe mestorozhdenie. Vladivostok: Dal'nauka; 1994. 198 s. (In Russ.).
5. Neronskij G.I., Dobraya V.T. Geoximicheskie osobennosti samorodnogo zolota iz rossy`pej Sugdzharskogo rajona. In: Geoximiya i metody` issledovaniya mineral'nogo sy`r`ya Dal'nego Vostoka. Vladivostok: DVNCz; 1975. S. 85–92. (In Russ.).
6. Mel'nikov A.V., Stepanov V.A. Sugdzharskij rudno-rossy`pnoj uzel Priamurskoj zolotonosnoj provincii. Otechestvennaya Geologiya. 2017;(2):42–50. (In Russ.).
7. Groves D.I., Santosh M. The giant Jiaodong gold province: the key to a unified model for orogenic gold deposits? Geoscience Frontiers. 2016;7:409–417.
8. Li L., Santosh M., Li S.R. The "Jiaodong-type" gold deposits: Characteristics, origin and prospecting. Ore Geology Reviews. 2015;65:589–611.

Научная статья

УДК 551.511.31:551.509.329

DOI: 10.31857/S0869769825030028

EDN: PLRGNS

Оценка параметров горных волн, рассчитанных по данным численных моделей прогноза погоды высокого пространственного разрешения в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке России

Е.М. Вербицкая✉, С.О. Романский

Евгения Митрофановна Вербицкая

кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник

Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Владивосток, Россия

werbaem@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-5776-9736>

Станислав Олегович Романский

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Владивосток, Россия

khvrom@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6613-6881>

Аннотация. Прогнозирование местоположения возможного возникновения горных волн (ГВ), их интенсивности и вертикального развития – весьма актуальная задача обеспечения безопасности полетов воздушных судов. Это особенно важно в условиях полного отсутствия методов прогнозирования ГВ на территории РФ вообще и Дальневосточного региона в частности. Основной сложностью решения задачи прогнозирования ГВ является практически полное отсутствие наблюдений за ГВ и инструментальных измерений их параметров. В статье представлен подход к оценке степени соответствия прогнозируемых по данным численной модели прогноза погоды параметров ГВ (местоположения, интенсивности, вертикального развития и горизонтального распространения) реальным значениям, которые предлагается приближенно определять по космическим снимкам чечевицеобразной облачности (Sc и Ac lenticularis) и данным радиозондирования. Показано, что расчетные параметры ГВ, полученные по модели Weather Research and Forecasting (WRF) на сетке с горизонтальным шагом 1 км, близки к реальным. Обсуждается возможность калибровки значений параметров ГВ, рассчитанных по оперативной модели WRF на сетке с горизонтальным шагом 5 км, данными, рассчитанными на сетке с шагом 1 км.

Ключевые слова: горные волны, подветренные волны, метеорологические прогнозы для авиации, Дальний Восток

Для цитирования: Вербицкая Е.М., Романский С.О. Оценка параметров горных волн, рассчитанных по данным численных моделей прогноза погоды высокого пространственного разрешения в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке России // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 3. С. 16–28. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030028>

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы 1.4.4.2 Плана научно-исследовательских и технологических работ Росгидромета на 2020–2024 годы.

Original article

Analysis of mountain waves' characteristics obtained by high-resolution numerical modeling on Eastern Siberia and Russian Far East

E.M. Verbitskaya, S.O. Romanskiy

Eugenia M. Verbitskaya

Candidate of Sciences in Geography, Leading Researcher

Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia

werbaem@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-5776-9736>

Stanislav O. Romanskiy

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Senior Researcher

Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia

khvrom@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6613-6881>

Abstract. Forecasting of possible locations, intensity, vertical and horizontal propagation of mountain waves (MW) is one of the main problems to ensure flight safety. This is very important in the complete absence predictions' methods on the territory of Russia in generally and, especially, in Far-Eastern region. Main problem of the MW forecasting is almost complete absence of MW observations and instrumental measurement of their characteristics. In the article, approach to conformity assessment of simulated MW parameters (location, intensity, vertical and horizontal propagation) to real characteristics which are approximately determined by satellite images of lenticular clouds (Sc и Ac lenticularis) and atmospheric sounding is presented. It is shown that characteristics of simulated MW by the Weather Research and Forecasting model with grid spacing of 1 km are close to actual values. Possibilities to calibrate parameters of simulated MW calculated on the 5-km grid by values obtained on 1-km grid are discussed.

Keywords: mountain wave, lee wave, meteorological forecasts for aviation, Far East

For citation: Verbitskaya E.M., Romanskiy S.O. Analysis of mountain waves' characteristics obtained by high-resolution numerical modeling on Eastern Siberia and Russian Far East. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(3):16–28. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030028>

Funding. The work is supported as a part of the theme 1.4.2.2 of the Plan of research and technological works of Roshydromet for 2020–2024.

Введение

Горные волны (ГВ) – это одно из наиболее опасных для авиации атмосферных явлений [1]. Простого взгляда на физическую карту Восточной Сибири и Дальнего Востока России достаточно, чтобы понять, что здесь при устойчивой стратификации атмосферы горные волны [1–3] могут формироваться практически еже-

дневно, так как горная и холмистая местность занимает большую часть рассматриваемой территории. Следовательно, прогнозирование местоположения возможного возникновения ГВ, их интенсивности и вертикального развития – весьма актуальная задача для обеспечения безопасности полетов воздушных судов над рассматриваемой территорией. Кроме того, ГВ являются одной из причин возникновения шквалистых и даже ураганных ветров у земли, а также интенсивной турбулентности орографического происхождения в горной и холмистой местности [1–4].

В этой связи была поставлена задача разработки методов и технологии прогнозирования наличия и интенсивности ГВ на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России. Эта задача особенно важна в условиях полного отсутствия методов прогнозирования ГВ на территории России вообще и в Дальневосточном регионе в частности. Основной сложностью решения поставленной задачи является практически полное отсутствие наблюдений за горной волной и инструментальных измерений ее параметров. Горную волну невозможно наблюдать визуально, за исключением случаев, когда она порождает специфическую облачность чечевицеобразной формы. Параметры горной волны (длину волны, скорость вертикальных движений, высоту вертикального развития и ареалы горизонтального распространения) трудно измерить инструментально, и такие измерения не выполняются. К сожалению, и в бортовых сообщениях воздушных судов сведений о наличии и интенсивности ГВ практически нет. Это обстоятельство является основной причиной отсутствия методов прогнозирования ГВ, поэтому в рамках темы 1.4.2.2 Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 годы авторами была разработана методология прогнозирования ГВ по данным численных моделей прогноза погоды (ЧПП) высокого пространственного разрешения [5].

Цель данной работы заключается в оценке параметров горных волн, рассчитанных по данным численных моделей прогноза погоды высокого пространственного разрешения в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке России, на примере случая формирования горной волны от вулкана Алаид (о-в Атласова, Курильские острова) 9 марта 2021 г.

Материалы и методы исследования

В статье использованы снимки облачного покрова в окрестности влк. Алаид с комического аппарата (КА) “Aqua” (США), которые доступны в интерактивном веб-интерфейсе NASA Worldview (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>), и геостационарного КА “Himawari-8” (Япония), представленные в JAXA Himawari Monitor (<https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index.html>).

Фактические данные о погоде вблизи влк. Алаид были получены с ближайшей станции радиозондирования атмосферы, расположенной в Северо-Курильске, примерно на расстоянии 45 км от вулкана.

Для оценки степени устойчивости стратификации атмосферы рассчитывался параметр Lifted Index [6] (LI), который представляет собой разность температур на изобарической поверхности 500 гПа, полученных с кривых стратификации и состояния. При значениях LI выше 6° полагается, что в данной точке атмосфера стратифицирована очень устойчиво.

Моделирование процесса образования и развития горных волн вблизи влк. Алаид было выполнено с использованием мезомасштабной негидростатической численной модели прогноза погоды Weather Research and Forecasting (WRF) с динамическим ядром Advanced Research WRF (WRF-ARW) [7]. Численные эксперименты выполнялись по модели в конфигурации с двумя вложенными сетками,

центры которых расположены в точке с координатами 50,9° с.ш., 155,6° в.д. (о-в Атласова, влк. Алайд). Горизонтальный шаг по внешней сетке установлен в 3 км (666×666 узлов), по вложенной сетке – 1 км (664×664 узлов). Горизонтальный шаг сетки модели существенно влияет на качество моделирования динамики ГВ: так, согласно [4, 8–12], шаг сетки порядка 1 км позволяет обеспечить приемлемое качество моделирования. По вертикали в модели задан 51 уровень от поверхности Земли до высоты 50 гПа с наиболее подробным разрешением в планетарном пограничном слое. Шаг по времени при интегрировании модели по внешней сетке 15 с, по внутренней сетке – 5 с. В качестве начальных и граничных данных для внешней сетки использованы прогнозы модели Global Forecasting System (NCEP, США) разрешением 0,5° и дискретностью 6 ч. В модели использовалась параметризация микрофизических процессов по схеме Томпсона. Процессы в приземном и планетарном пограничном слое рассчитывались по схемам Revised MM5 и Yonsei University соответственно. Расчеты выполнялись от срока 0 ч ВСВ 9 марта 2021 г. на 24 ч вперед. Выходные данные модели фиксировались с интервалом 10 мин для построения вертикальных профилей модельных полей потенциальной температуры и ветра и карт-слайдов линий тока.

Данные численного моделирования высокого пространственного разрешения используются для верификации расчетов модели WRF–ARW с горизонтальным шагом 5 км, предназначенной для выпуска прогноза погоды по территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России в региональном специализированном метеорологическом центре (PCMЦ) Хабаровск. Это необходимо для оценки степени достоверности расчета параметров ГВ [5], полученных на сетке с шагом 5 км.

Результаты исследования и их обсуждение

Оценка степени успешности модельных прогнозов. В [5] представлено описание методологии определения наличия ГВ по данным численной модели прогноза погоды WRF–ARW на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока, в том числе предложены подходы к оценке параметров прогнозируемых горных волн. Показано, что по полю высот узлов модельной сетки (орографии) модели WRF–ARW с горизонтальным шагом 5 км можно достаточно точно определить ареалы возможного возникновения ГВ, а по модельным значениям параметров текущего состояния атмосферы (вертикальным профилям температуры, влажности, скорости и направления ветра) – оценить наличие ГВ в конкретной географической локализации. Оценка степени адекватности определения местоположения ГВ в прогнозируемые сроки выполнялась путем сравнения модельных расчетов с данными наблюдений из космоса за чечевицеобразной облачностью, порождаемой ГВ.

Существенно сложнее оценить степень соответствия значений параметров ГВ, рассчитанных по модельным данным, их фактическим значениям при отсутствии инструментальных измерений. В [3] приводится ряд формул теории горных волн, по которым предлагается приблизительно оценивать параметры ГВ: высоту вертикального развития, длину волны и скорость вертикального движения. Эти формулы были адаптированы к расчетным данным модели WRF–ARW для определения характеристик волнового процесса в заданных точках сетки прогноза [5].

На снимках с чечевицеобразной облачностью можно визуально определить местоположение ГВ, направление горизонтального распространения волновых возмущений, примерно оценить горизонтальное распространение от источника генерации и приблизительно определить длину волны. Высоту возможного вертикального развития, полученную по модельным данным, можно проверить с по-

мощью данных радиозондирования, если пункт радиозондирования расположен достаточно близко к месту наблюдаемой ГВ. Наиболее сложной является задача оценки степени достоверности прогнозируемой интенсивности ГВ (максимальной скорости вертикальных движений за счет волнового возмущения).

На космических снимках достаточно часто встречаются случаи с хорошо просматриваемой облачностью чечевицеобразной формы от ГВ, генерируемых хребтами и отдельными вершинами малых островов дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана. Эти снимки использовались для оценки степени достоверности модельных прогнозов параметров ГВ. Они позволяют достаточно точно определить орографический источник генерации ГВ, так как влажный морской воздух способствует формированию чечевицеобразной облачности на гребне ГВ при подъеме воздушной массы в устойчиво стратифицированной атмосфере. Кроме того, в связи с распространением волн над морской поверхностью, т.е. при отсутствии препятствий для их горизонтального распространения, имеется возможность оценить дальность распространения.

Здесь следует отметить, что прогноз ГВ на обширной территории Восточной Сибири и Дальнего Востока в оперативные сроки на имеющихся в РСМЦ Хабаровск вычислительных ресурсах возможен при горизонтальном шаге модельной сетки не менее 5 км. Но для оценки успешности прогноза ареалов возникновения и времени существования ГВ по модели с горизонтальным шагом 5 км вышеупомянутые снимки облачности мало пригодны из-за слишком малых горизонтальных размеров объектов, порождающих ГВ, в сравнении с горизонтальным шагом модели. По таким снимкам можно определить даты, время и местоположение ГВ для численных экспериментов по модели с шагом 1 км по ограниченной территории и далее сравнить расчетные значения параметров ГВ, полученные по модели с шагом 1 км, с параметрами ГВ, полученными на сетке с шагом 5 км. Такой подход опирается на авторский опыт численного моделирования реальных случаев процесса возникновения, развития и затухания ГВ, наблюдавшихся 13 июня и 14 августа 2014 г. на юге о-ва Сахалин при обтекании воздушным потоком Су-сунайского хребта [4]. Численные эксперименты по модели WRF–ARW с горизонтальным шагом 1 км показали, что модель вполне адекватно воспроизводит процессы формирования, развития и затухания горных волн. Получено также, что при увеличении горизонтального шага от 1 до 3 км общая структура волн в целом сохраняется, а интенсивность вертикальных движений снижается.

В этой связи для оценки степени достоверности расчета параметров ГВ выполнялось сравнение расчетов по модели WRF–ARW с горизонтальным шагом 5 км с результатами моделирования отдельных ярко выраженных случаев ГВ на сетке с горизонтальным шагом 1 км. Для этого по спутниковым снимкам подбирались случаи облачности, порождаемой горной волной в местах, близко расположенных к пунктам радиозондирования. Данные радиозондирования позволяют оценить степень близости модельных значений параметров состояния атмосферы (вертикальное распределение температуры, влажности и ветра) в окрестности пункта радиозондирования к данным наблюдений. Числовые характеристики параметров ГВ, рассчитанных по модели с шагом 1 км, можно оценить по косвенным характеристикам, определенным по данным радиозондирования. Ниже в статье приведен пример такого расчета и сравнения для ГВ, порожденной при обтекании воздушным потоком влк. Алайд (о-в Атласова).

Анализ спутникового снимка чечевицеобразной облачности в северной части Курильских островов 9 марта 2021 г. На рис. 1 представлен фрагмент снимка, сделанного около 3 ч Всемирного скоординированного времени (ВСВ) 9 марта 2021 г. КА “Aqua”. Облачность чечевицеобразной формы на снимке указывает



Рис. 1. Фрагмент снимка КА “Аква” (США) около 3 ч ВСВ 9 марта 2021 г. Черной точкой обозначен Северо-Курильск

на наличие горной волны, распространившейся более чем на 100 км в юго-восточном направлении. Поскольку о-в Шумшу (ближайший к южной оконечности Камчатки остров Курильской гряды) имеет максимальную высоту 198 м, то он не может быть источником ГВ. Обтекание воздушным потоком хребта Вернадского (о-в Парамушир), судя по его расположению и направлению, породило бы шлейф облаков иного местоположения и направленности. Следовательно, зафиксированная на спутниковом снимке облачность чечевицеобразной формы порождена ГВ, возникшей при обтекании влк. Алаид (о-в Атласова) набегающим с северо-запада воздушным потоком.

По данным Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, высота влк. Алаид составляет 2339 м¹. Он является высочайшей точкой Курильских островов и находится в 45 км к северо-западу от Северо-Курильска (о-в Парамушир), где имеется пункт радиозондирования. Радиус о-ва Атласова, образованного вулканом, около 14 км.

Фактическая ситуация и явление. По данным радиозондирования в Северо-Курильске от 00 ч ВСВ 9 марта 2021 г. (табл. 1) наблюдалась высокая устойчивость стратификации атмосферы (значение индекса LI составило 13°).

Северный ветер со скоростью 6 м/с у земли с высотой менял свое направление на северо-западное и усиливался до 16 м/с на высоте 2811 м. Таким образом,

Таблица 1

Фрагмент данных радиозондирования в Северо-Курильске от 00 ч ВСВ 9 марта 2021 г.

Высота, м	Давление, гПа	Температура, °С	Дефицит точки росы, °	Направление ветра, °	Скорость ветра, м/с
134	1000	–6,5	8	0	6
735	925	–12,5	6	320	9
1374	850	–18,3	2,5	300	10
2811	700	–23,7	16	305	16
5190	500	–38,9	12	315	24
6680	400	–50,5	12	305	27
8520	300	–58,1	12	295	25

метеорологические условия в районе о-ва Атласова соответствовали условиям

формирования ГВ [2], распространяющейся в юго-восточном направлении. Распределение температуры и дефицита точки росы по высотам показывает, что при орографическом переваливании влажной воздушной массой конуса вулкана быстро достигается уровень конденсации, и в восходящем потоке образуется облачность. В нисходящем потоке дефицит точки росы растет и облачность рассеивается.

На снимках КА “Himawari-8” (Япония) (рис. 2) облачность при ГВ от влк. Алаид возникла около 2 ч ВСВ 9 марта 2021 г. и просуществовала примерно до 6 ч 30 мин ВСВ. К 5 ч ВСВ в облачности заметно 14 выраженных гребней с расстоянием между ними порядка 7 км.

Моделирование процесса образования горных волн высокого разрешения.

Численные эксперименты высокого пространственно-временного разрешения выполнялись по негидростатической модели WRF–ARW [6] в конфигурации с двумя вложенными сетками, центры которых расположены в точке с координатами 50,9° с.ш., 155,6° в.д. (о-в Атласова, влк. Алаид). Горизонтальный шаг по внешней сетке установлен в 3 км (666×666 узлов), по вложенной сетке – 1 км (664×664 узлов). Подробное описание модели для численных экспериментов приведено выше в разделе «Материалы и методы исследования».

На рис. 3, а представлено поле приземного ветра в форме линий тока в 3 ч ВСВ 9 марта 2021 г. Направление приземного ветра со скоростями 10–15 м/с практически перпендикулярно о-ву Атласова, что при устойчивой стратификации атмос-



Рис. 2. Облачный покров по данным КА “Himawari-8” (Япония) 9 марта 2021 г.

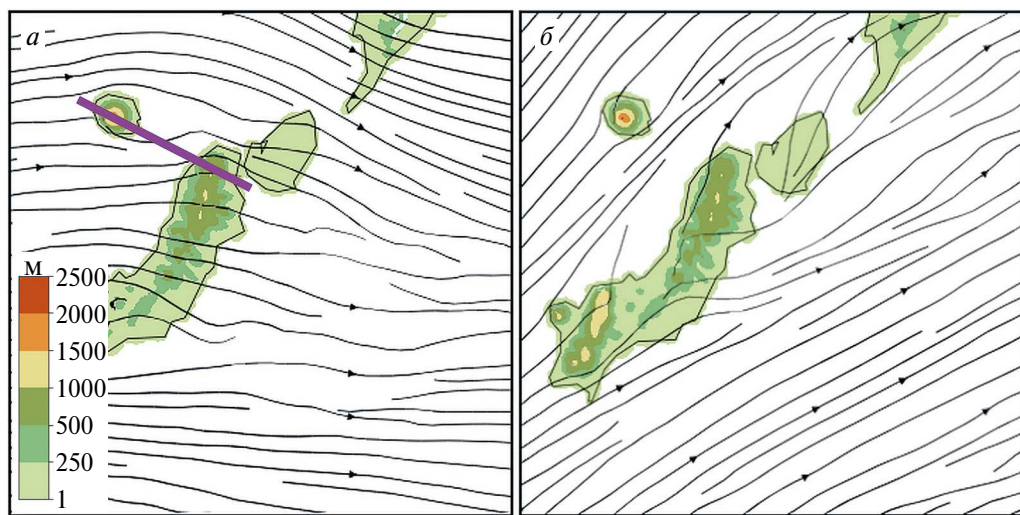


Рис. 3. Модельное поле линий тока на сетке с шагом 1 км: а – в 3 ч ВСВ, б – в 10 ч ВСВ 9 марта 2021 г. Жирной прямой линией указано направление разреза через вершину влк. Алаид (высота в модели 2066 м), по которому построены вертикальные профили полей потенциальной температуры и ветра, представленные ниже

феры (модельное значение индекса LI составляет 14°C) приводит к образованию горной волны. Воздушный поток при обтекании вулкана вынужден измениться (что отражается в искривлении линий тока) из-за необходимости подъема части набегающего воздуха с наветренной стороны препятствия и последующего опускания с подветренной стороны. Далее эти вертикальные колебания частиц воздуха распространяются в горизонтальной плоскости по направлению ветра.

Первые волновые движения воздуха образуются к концу первого часа моделирования (рис. 4, а), амплитуда колебаний сопоставима с высотой горного препятствия (2066 м по модельной топографии), что является одним из признаков ГВ. К 3 ч ВСВ (рис. 4, б) вертикальное развитие ГВ достигает 7000 м, с подветренной стороны препятствия формируется несколько гребней волны, скорость вертикальных движений находится в пределах от 3 до 5 м/с. Явление приобретает наибольшее развитие между 4 и 6 ч ВСВ, так, на рис. 4, в (в 5 ч 50 мин ВСВ) насчитывается 9 гребней волны. В этот период модуль максимальных скоростей восходящих и нисходящих движений воздуха достигает 10 м/с. Затем волновой процесс затухает и практически полностью завершается к 10 ч ВСВ при повороте приземного ветра к юго-западу (рис. 3, б).

В соответствии с теорией горных волн [3] образование ГВ оказывает существенное влияние на температуру воздуха: подъем воздушной массы (ВМ) при устойчивой стратификации приводит к падению температуры, а при опускании ВМ ее температура возрастает. На рис. 4 это хорошо иллюстрируется пилообразными колебаниями изолиний потенциальной температуры.

Хотя в теории горных волн получены значительные результаты [2, 3], но для части задач, особенно в трехмерной постановке [13], возможно получить лишь приближенное численное решение. Вулкан Алаид имеет правильную коническую форму, поэтому при образовании ГВ можно выявить некоторые дополнительные черты волнового процесса. Во-первых, всей набегающей на препятствие воздушной массе нет необходимости переваливать через остров, большая ее часть обтекает вулкан (исходя из структуры линий тока, см. рис. 3, а), при дальнейшем распространении ГВ это приводит к уменьшению амплитуды и к более быстрому затуханию волнового процесса. Во-вторых, на рисунках 4, б, в, где представлен разрез в плоскости трехмерного явления, расстояние между гребнями волн изменяется. Это можно объяснить тем, что части разделившегося воздушного потока взаимодействуют с подветренной стороны, т.е. могут как усилить, так и погасить друг друга с учетом деформаций, вызываемых северной оконечностью о-ва Парамушир.

При построении вертикальных профилей потенциальной температуры и ветра по другим разрезам (также проходящим через вершину Алаида, но под другими углами) было выявлено формирование узловой поверхности [3], т.е. тонкого слоя атмосферы, в котором значения возмущений скорости практически равны нулю, а линии тока выше и ниже этого слоя зеркально симметричны. Это происходит потому, что волна распространяется не строго перпендикулярно к поверхности земли, а под наклоном. При максимальном развитии модельного явления узловая поверхность находилась на высоте около 7 км, а вертикальные движения прослеживались до 14 км.

После поворота приземного ветра к северо-востоку модельная ГВ существенно ослабевает, но возле вулкана продолжают сохраняться вертикальные восходящие и нисходящие движения воздуха.

Расчет параметров горных волн по оперативной версии модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 5 км. Расчеты современной гидродинамической модели прогноза погоды на сетке с горизонтальным шагом 1 км для всей территории Восточной Сибири и Дальнего Востока с готовностью продукции в оперативные сроки в настоящее время невозможны. Текущая конфигурация вычислительных

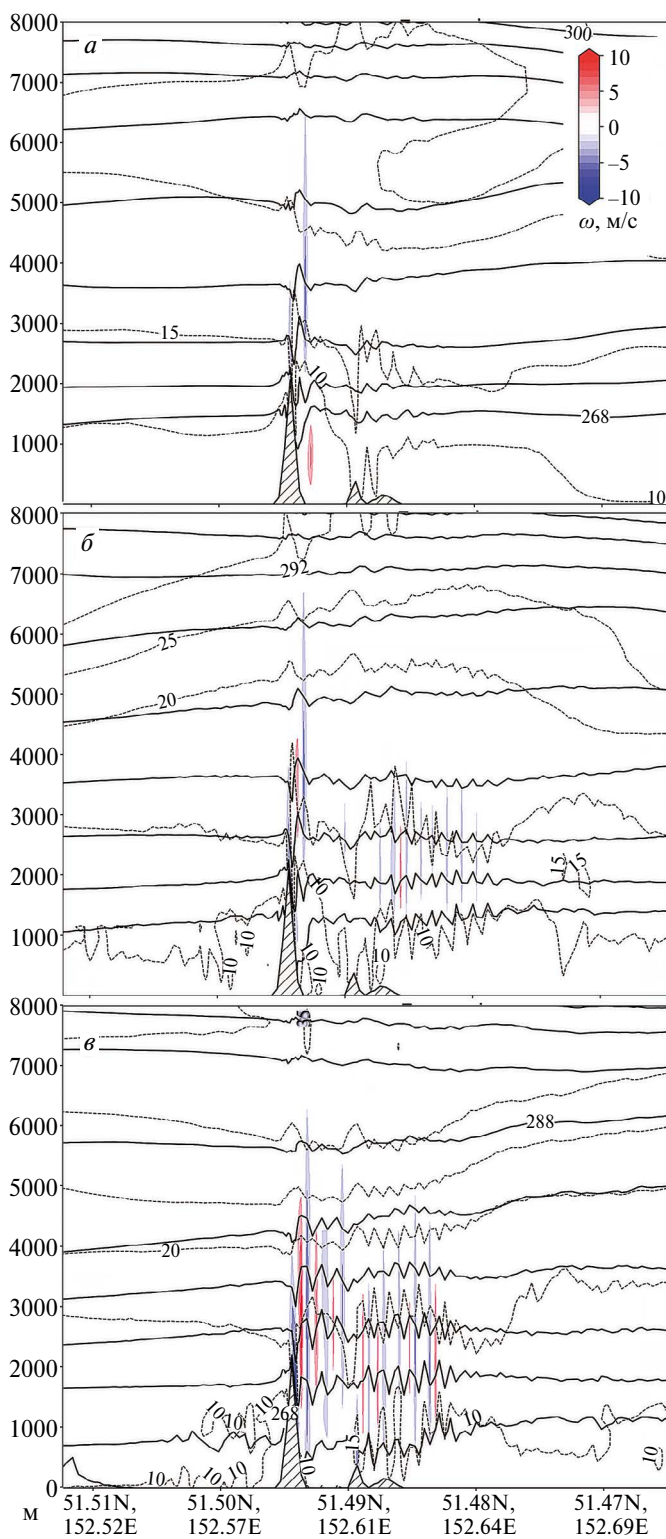


Рис. 4. Вертикальные профили модельной потенциальной температуры (К), скорости ветра (м/с) и вертикальной скорости (ω , м/с) в слое до высоты 8000 м: *а* – в 0 ч 50 мин ВСВ, *б* – в 3 ч ВСВ, *в* – 5 ч 50 мин ВСВ. Сплошной линией указана потенциальная температура, пунктирной – скорость ветра. Штриховкой обозначен рельеф местности

средств РСМЦ Хабаровск позволяет в оперативные сроки выпускать численный прогноз на сетке с горизонтальным шагом не менее 5 км.

Максимальная высота узла модельной сетки с шагом 5 км (из совокупности всех узлов, попавших на территорию о-ва Атласова) составляет всего 683 м – это и есть высота влк. Алаид в оперативной версии модели. Конечно, если бы центр сетки модели с шагом 5 км был установлен в те же координаты, что и в версии модели с шагом 1 км, то высота вулкана в сетке 5 км была бы такой же, как и в модели с шагом 1 км. Но центральная точка области прогноза в оперативной версии модели выбирается из условий полного охвата необходимой территории с учетом расширения границы области расчета, так чтобы самые крайние районы прогноза располагались на достаточном расстоянии от границы.

По версии модели с шагом 5 км при расчете от срока 0 ч ВСВ 9 марта 2021 г. формируется достаточно слабый волновой процесс во второй половине дня. Высота вертикального развития волн составила около 10 000 м, длина волны около 5 км, максимальная вертикальная модельная скорость достигает 3–5 м/с. Основной причиной несовпадения времени начала процесса формирования ГВ является слишком малая модельная высота вершины вулкана и недостаточно малый шаг сетки, так как с ним сопоставима длина волны.

Несмотря на то что для генерации горной волны отдельно стоящей вершины нет ограничений по направлению набегающего воздушного потока, из-за малой высоты модельного узла, соответствующего вершине влк. Алаид, заметное возмущение воздушного потока на сетке с шагом 5 км воспроизводится слабо. Для сравнения расчетов по модели WRF–ARW с горизонтальными шагами сетки 1 км и 5 км в табл. 2 приводятся значения параметров, определяющих условия возникновения и существования ГВ, и расчетные волновые характеристики в фиксированные моменты времени, соответствующие периоду развития и затухания явления, определенному по модельным данным с шагом 1 км и снимкам облачности КА “Himawari-8” (Япония).

Как видно из данных табл. 2, индекс LI по обеим версиям модели показывает очень устойчивое состояние атмосферы во все рассматриваемые сроки. Хотя по модели в 1 км значения индекса LI несколько выше (13–14°), чем по модели 5 км (11–12°), тем не менее все они близки к значениям, рассчитанным по данным радиозондирования. С учетом разницы во времени и расстояния до пункта радиозондирования от вершины влк. Алаид можно считать, что модельные значения индекса LI и тенденции его изменения соответствуют факту.

Горизонтальная скорость приземного ветра в 3 ч ВСВ по обеим версиям модели примерно одинаковая (21 и 20 м/с) и на 6 и 5 м/с выше (для сеток с шагом 1 и 5 км соответственно), чем на уровне 700 гПа по радиозонду (где высота уровня 700 гПа близка к вершине вулкана, см. табл. 1). Более высокую скорость по модели в сравнении с данными радиозондирования легко объяснить: пункт радиозондирования находится на относительно большом острове и прикрыт от северного и северо-западного ветра небольшим хребтом, а вулкан расположен практически в открытом море.

По состоянию на 6 ч ВСВ в модели с шагом 1 км ветер в окрестности вершины вулкана усилился до 30 м/с (время максимального развития ГВ), а в модели 5 км этого не случилось, и ГВ в этот срок не сформировалась (расчетная вертикальная скорость составила 2 м/с).

К 9 ч ВСВ по обоим вариантам расчета получено снижение скорости приземного ветра в окрестности вулкана до 14 м/с (на сетке с шагом 1 км) и 10 м/с (на сетке с шагом 5 км). Снижение скорости показывает и радиозонд: на уровне 700 гПа – с 15 до 12 м/с, на высоте 1000 гПа – с 6 до 3 м/с.

Расчетные характеристики горной волны 9 марта 2021 г. вблизи о-ва Атласова

Шаг сетки, км	BCB	Метеорологические параметры			Расчетные характеристики ГВ [3, 5]		
		LI, °	Скорость ветра, м/с	Направление ветра, румб	Длина волны, м	Высота распространения, м	Максимальная вертикальная скорость, м/с
1 км	3 ч	14	21	СЗ	813	6878	15
	6 ч	14	30	СЗ	739	8641	13
	9 ч	13	14	ЮЗ	2311	4782	3
5 км	3 ч	12	20	СЗ	5298	7257	4
	6 ч	11	13	СЗ	8792	9267	2
	9 ч	11	10	ЮЗ	3458	4224	1
Значения по данным радиозондирования в Северо-Курильске							
Уровень, гПа	BCB	LI, °	Скорость ветра, м/с	Направление ветра, румб	Длина волны, м	Высота распространения, м	Максимальная вертикальная скорость, м/с
1000	0 ч	13	6	С	703	5190	13
850			10	СЗ			
700			15	СЗ			
500			22	СЗ			

Длина волны, рассчитанная по данным модели с шагом 1 км, составляла 813 м в 3 ч, 739 м – в 6 ч, а к 9 ч BCB она увеличилась до 2311 м, что отражает затухание процесса. Оценка высоты вертикального развития по значениям вертикальной скорости составила до 7 км на 3 ч, более 8 км – на 6 ч и снизилась до высоты менее 5 км к 9 ч BCB. При этом максимальные скорости вертикальных движений (восходящих и нисходящих) оценены в 15, 13 и 3 м/с соответственно. Эти же характеристики, определенные по данным модели 5 км, показывают существенно большую длину волны (5300, 8800 и 3500 м) при весьма малых скоростях вертикальных движений (4, 2 и 1 м/с), т.е. полученный модельный волновой процесс значительно слабее (по сути, ГВ отсутствует), чем по модели с шагом 1 км. Около 9 ч BCB приземный ветер по обоим вариантам расчета меняет направление на юго-западное, что соответствует данным наблюдений.

Если использовать для расчета параметров ГВ данные радиозондирования от срока 00 ч BCB 9 марта 2021 г., условно полагая, что они близки к значениям параметров состояния атмосферы на о-ве Атласова в 3 ч BCB, то длина волны составит 703 м, высота вертикального развития – до 5190 м и максимальная скорость вертикальных движений – 13 м/с. Эти результаты близки к модельным данным, полученным на сетке с горизонтальным шагом 1 км в 3 и 6 ч BCB.

Заключение

В статье представлен способ оценки степени соответствия значений параметров ГВ, рассчитанных по методологии [5], предполагаемым реальным

значениям этих параметров, оцененным по спутниковым снимкам и данным радиозондирования. Такой подход используется в связи с отсутствием инструментальных измерений требуемых параметров (местоположения ГВ, интенсивности, вертикального и горизонтального развития).

Сравнение результатов численных экспериментов по модели WRF–ARW с горизонтальным шагом 1 км (выполненных по ограниченному району) показывает хорошее совпадение со спутниковыми снимками чечевицеобразной облачности и данными радиозондирования. К сожалению, такие расчеты невозможно выполнять в оперативной практике по всей территории Дальневосточного региона России, так как они слишком объемны для современных вычислительных систем (не только в РСМЦ Хабаровск, но и по текущему состоянию развития вычислительной техники в мире в целом). Их можно выполнить только по ограниченной территории в окрестности заданной точки (конкретного аэродрома или орографического объекта).

Тем не менее, как показано в [5], для крупных горных хребтов местоположение ГВ по модели с шагом 5 км определяется вполне адекватно спутниковым снимкам чечевицеобразной облачности, и при небольших различиях модельных и реальных высот рельефа значения параметров ГВ, рассчитанных по модельным данным, могут быть достаточно близки к фактическим. Кроме того, значения параметров ГВ по данным модели с шагом 5 км могут быть откалиброваны данными, рассчитанными по модели с шагом 1 км, при достаточно большом количестве численных экспериментов, выполненных постфактум.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sharman R.D., Lane T. (Eds.). *Aviation turbulence: processes, detection, prediction*. Springer International Publishing, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-23630-8.
2. Barry R.G. *Mountain weather and climate*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. DOI: 10.1017/CBO9780511754753.
3. Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шметер С.М., Шур Г.Н. *Турбулентность в свободной атмосфере*. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 288 с.
4. Романский С.О., Вербицкая Е.М. Сильные шквалистые ветры в Южно-Сахалинске летом 2014 г. // *Геосферные исследования*. 2023. № 4. С. 141–154. EDN: LZBUBM.
5. Вербицкая Е.М., Крохин В.В., Романский С.О. Прогноз опасных для авиации явлений погоды на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России // *Труды ДВНИГМИ*. 2024. Вып. 157. С. 18–40.
6. Galway J.G. The lifted index as a predictor of latent instability // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1956. Vol. 37. P. 528–529. DOI: 10.1175/1520-0477-37.10.528.
7. Skamarock W.C., Klemp J.B. A time-split non-hydrostatic atmospheric model for research and NWP applications // *Journal of Computational Physics*. 2007. Vol. 227 (7). P. 3465–3485. DOI: 10.1016/j.jcp.2007.01.037.
8. Fritts D.C., Lund A.C., Lund T.S., Yudin V. Impacts of limited model resolution on the representation of mountain wave and secondary gravity wave dynamics in local and global models. 1: Mountain waves in the stratosphere and mesosphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2022. Vol. 127. e2021JD035990. DOI: 10.1029/2021JD035990.
9. Fritts D.C., Lund A.C., Lund T.S., Yudin V. Impacts of limited model resolution on the representation of mountain wave and secondary wave dynamics in local and global models. 2: Mountain wave and secondary wave evolutions in the thermosphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2022. Vol. 127. e2021JD036035. DOI: 10.1029/2021JD036035.
10. Feltz W.F., Bedka K.M., Otkin J.A., Greenwald T., Ackerman S.A. Understanding satellite-observed mountain-wave signatures using high-resolution numerical model data // *Weather and Forecasting*. 2009. Vol. 24. P. 76–86. DOI: 10.1175/2008WAF2222127.1.

11. Wilms H., Bramberger M., Dörnbrack A. Observation and simulation of mountain wave turbulence above Iceland: turbulence intensification due to wave interference // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146. P. 3326–3346. DOI: 10.1002/qj.3848.
12. Xia G., Draxl C., Raghavendra A., Lundquist J.K. Validating simulated mountain wave impacts on hub-height wind speed using SoDAR observations // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 163. P. 2220–2230. DOI: 10.1016/j.renene.2020.10.127.
13. Eckermann S.D., Lindeman J., Broutman D., Ma J., Boybeyi Z. Momentum fluxes of gravity waves generated by variable Froude number flow over three-dimensional obstacles // *Journal of Atmospheric Sciences*. 2010. Vol. 67. P. 2260–2278. DOI: 10.1175/2010jas3375.1.

REFERENCES

1. Sharman R.D., Lane T. (Eds.). *Aviation turbulence: processes, detection, prediction*. Springer International Publishing; 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-23630-8.
2. Barry R.G. *Mountain weather and climate*. Cambridge: Cambridge University Press; 2008. DOI: 10.1017/CBO9780511754753.
3. Vinnichenko N.K., Pinus N.Z., Shmeter S.M., Shur G.N. *Turbulentnost' v svobodnoj atmosfere* = [Turbulence in free atmosphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1976. (In Russ.).
4. Romanskij S.O., Verbickaja E.M. Sil'nye shkvalistye vetry v Juzhno-Sahalinske letom 2014 g. = [Strong gusty wind in Yuzno-Sakalinsk in summer of 2014]. *Geosfernye Issledovaniya*. 2023;4:141–154. EDN: LZBUBM. (In Russ.).
5. Verbickaja E.M., Krohin V.V., Romanskij S.O. Prognoz opasnyh dlja aviatsii javlenij pogody na territorii Vostochnoj Sibiri i Dal'nego Vostoka Rossii = [Forecasting of severe weather events for aviation on the territory of Eastern Siberia and Russian Far East]. *Trudy DVNIGMI*. 2024;157:18–40. (In Russ.).
6. Galway J.G. The lifted index as a predictor of latent instability. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1956;37:528–529. DOI: 10.1175/1520-0477-37.10.528.
7. Skamarock W.C., Klemp J.B. A time-split non-hydrostatic atmospheric model for research and NWP applications. *Journal of Computational Physics*. 2007;227(7):3465–3485. DOI: 10.1016/j.jcp.2007.01.037.
8. Fritts D.C., Lund A.C., Lund T.S., Yudin V. Impacts of limited model resolution on the representation of mountain wave and secondary gravity wave dynamics in local and global models. 1: Mountain waves in the stratosphere and mesosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2022;127. e2021JD035990. DOI: 10.1029/2021JD035990.
9. Fritts D.C., Lund A.C., Lund T.S., Yudin V. Impacts of limited model resolution on the representation of mountain wave and secondary wave dynamics in local and global models. 2: Mountain wave and secondary wave evolutions in the thermosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2022;127. e2021JD036035. DOI: 10.1029/2021JD036035.
10. Feltz W.F., Bedka K.M., Otkin J.A., Greenwald T., Ackerman S.A. Understanding satellite-observed mountain-wave signatures using high-resolution numerical model data. *Weather and Forecasting*. 2009;24:76–86. DOI: 10.1175/2008WAF2222127.1.
11. Wilms H., Bramberger M., Dörnbrack A. Observation and simulation of mountain wave turbulence above Iceland: turbulence intensification due to wave interference. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020;146:3326–3346. DOI: 10.1002/qj.3848.
12. Xia G., Draxl C., Raghavendra A., Lundquist J.K. Validating simulated mountain wave impacts on hub-height wind speed using SoDAR observations. *Renewable Energy*. 2021;163:2220–2230. DOI: 10.1016/j.renene.2020.10.127.
13. Eckermann S.D., Lindeman J., Broutman D., Ma J., Boybeyi Z. Momentum fluxes of gravity waves generated by variable Froude number flow over three-dimensional obstacles. *Journal of Atmospheric Sciences*. 2010;67:2260–2278. DOI: 10.1175/2010jas3375.1.

Научная статья

УДК 550.46

DOI: 10.31857/S0869769825030032

EDN: PLSSRC

Потоки метана на границе раздела вода–атмосфера на акватории Южно-Китайского моря по результатам экспедиционных исследований

А.А. Легкодимов, Г.И. Мишукова, Ле Дык Ань, М.А. Бовсун, П.Д. Жердев✉

Алексей Александрович Легкодимов

младший научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,

Владивосток, Россия

legkodimov.aa@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1768-8222>

Галина Ивановна Мишукова

кандидат географических наук, старший научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,

Владивосток, Россия

gmishukova@poi.dvo.ru

<http://orcid.org/0000-0002-2806-3834>

Ле Дык Ань

кандидат компьютерных наук

Институт морской геологии и геофизики Вьетнамской академии наук и технологий,

Ханой, Вьетнам

leducanh010282@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-2995-9752>

Мария Александровна Бовсун

младший научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,

Владивосток, Россия

bovsun.ma@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1916-3566>

Павел Дмитриевич Жердев

старший инженер

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,

Владивосток, Россия

zherdev.pd@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0009-0008-5739-7543>

<http://orcid.org/0000-0001-9828-5929>

Аннотация. В статье приведены результаты исследований пространственно-временного распределения рассчитанных потоков метана на границе раздела вода–атмосфера на акватории Приветнамского континентального шельфа, склона и открытой части моря по данным рейса № 88 НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (LV88) в период с 1 по 29 ноября 2019 г. В результате исследований установлена высокая изменчивость от равновесия и слабой эмиссии 0–1 моль/(км²×сут) до потока очень высокой интенсивности 29 моль/(км²×сут). Активность газообмена на границе дно–вода–атмосфера обусловлена активным выходом CH₄ из донных отложений и контролируется комплексом геологических и гидрологических факторов.

Ключевые слова: метан, источник, концентрация, морская вода, атмосфера

Для цитирования: Легкодимов А.А., Мишукова Г.И., Ле Дык Ань, Бовсун М.А., Жердев П.Д. Потоки метана на границе раздела вода–атмосфера на акватории Южно-Китайского моря по результатам экспедиционных исследований // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 3. С. 29–42.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030032>

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-47-04001, <https://rscf.ru/project/24-47-04001/>.

Original article

Methane flows at the water–atmosphere interface in the South China Sea according to the results of expeditionary research

A.A. Legkodimov, G.I. Mishukova, Le Duc Anh, M.A. Bovsun, P.D. Zherdev

Alexey A. Legkodimov

Junior Researcher

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

legkodimov.aa@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1768-8222>

Galina I. Mishukova

Candidate of Sciences in Geography, Senior Researcher

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

gmishukova@poi.dvo.ru

<http://orcid.org/0000-0002-2806-3834>

Le Duc Anh

Candidate of Sciences in Computer

Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

leducanh010282@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-2995-9752>

Maria A. Bovsun

Junior Researcher

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

bovsun.ma@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1916-3566>

Pavel D. Zherdev

Senior Engineer

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

zherdev.pd@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0009-0008-5739-7543>

Abstract. The article presents the results of studies of the spatiotemporal distribution of calculated methane flows at the water-atmosphere interface in the waters of the Vietnam continental shelf, slope and open part of the sea according to flight № 88 of the SRV Academician M.A. Lavrentiev (LV88) in the period from November 1 to November 29, 2019. As a result of the research, high variability was established from equilibrium and weak emission of 0–1 mole/(km²×day) to a very high intensity flux of 29 mole/(km²×day). The activity of gas exchange at the bottom–water–atmosphere boundary is due to the active release of CH₄ from bottom sediments and is controlled by a complex of geological and hydrological factors.

Keywords: methane, source, concentration, seawater, atmosphere

For citation: Legkodimov A.A., Mishukova G.I., Le Duc Anh, Bovsun M.A., Zherdev P.D. Methane flows at the water–atmosphere interface in the South China Sea according to the results of expeditionary research. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(3):29–42. (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030032>

Funding. The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-47-04001, <https://rscf.ru/project/24-47-04001/>.

Введение

Различными исследованиями признается, что открытые океаны представляют собой источник поступления метана в атмосферу, хотя лежащий в их основе механизм производства метана остается неясным и является дискуссионным. По некоторым оценкам, глобальная морская эмиссия метана лежит в диапазоне от 11 до 18 млн т/год, причем 75% этого потока приходится на шельфовые районы [1]. Важный источник метана в атмосферу – эстуарии. При этом основным источником метана является метаногенная деградация обогащенных органическими веществами донных отложений [2]. В устье р. Жемчужная потоки метана на границе вода–атмосфера изменялись в широком диапазоне со средним значением 314,3±464,9 моль/(км²×сут) осенью и 184,2±187,5 моль/(км²×сут) летом [3]. В дельте р. Меконг потоки метана на границе вода–атмосфера составляли 118 моль/(км²×сут) [4]. Другие исследователи полагают, что континентальные шельфы являются более интенсивным источником. По данным разных исследователей, на континентальном склоне и шельфе среднее значение составляло 8,6±6,4 моль/(км²×сут) [5]; 15,6±8,0 моль/(км²×сут) [6]; 8,0±4,3 моль/(км²×сут) осенью; 4,1±5,2 моль/(км²×сут) летом; 1,1±0,8 моль/(км²×сут) зимой [3]; 8,3±4,1 моль/(км²×сут) [5]. В связи с тем, что метан – активный «парниковый» газ, концентрация которого в атмосфере возрастает, то исследование зон его эмиссии, особенно в нефтегазоносных районах, является одной из важных задач современной океанографии. В целом низкосейсмичное Южно-Китайское море в этом аспекте изучено недостаточно.

Цель статьи – на основе экспериментальных данных рассмотреть распределения потоков метана на границе раздела вода–атмосфера на континентальном Приветнамском шельфе, склоне и в открытой части Южно-Китайского моря.

Материалы и методы

Непрерывный забор воды осуществлялся насосом из носового кингстона (уровень забора воды 4 м от поверхности моря) на ходу судна. Отбор проб воды производился с временной дискретностью 2–4 ч. При пробоотборе фиксировались время отбора и навигационная привязка к маршруту движения судна. Концентрация метана в пробах из проточной системы определялась методом “HeadSpace”, температура и соленость – с помощью термосалинографа SBE 45, метеорологические

наблюдения велись метеостанцией Davis Vantage Pro 2. В качестве газовой фазы применялся гелий, который напускался в склянки с помощью газового мешка “Tedlar Bag Dual Valve” (USA) с двумя клапанами. Через один клапан мешка, снабженный иглой, производился напуск гелия во время вытягивания 12 мл водного раствора шприцем через другой клапан. Пробы интенсивно встряхивались не менее 4 ч на перемешивающем устройстве LS 110 (Россия), затем газовая фаза извлекалась шприцем с соблюдением равновесных условий, и проба газа вводилась в хроматограф. Для хроматографического анализа газового состава использовался газовый хроматограф «КРИСТАЛЛЮКС-4000М», снабженный пламенно-ионизационным детектором, двумя детекторами по теплопроводности и двумя металлическими набивными колонками (сорбенты HayeSep D и NaX). Газ-носитель – гелий. Погрешность измерений составляет не более 5.

Анализ газа. Для анализа газового состава использовался газовый хроматограф «Кристаллюкс-4000М» (ЗАО «МЕТАХРОМ», г. Йошкар-Ола), оснащенный пламенно-ионизационным детектором и двумя детекторами по теплопроводности. Минимальный объем вводимой в прибор газовой фазы составлял 5 мл. Пламенно-ионизационный детектор (ПИД) использовался для качественного и количественного анализа метана и других углеводородов с точностью 10–6%. Неорганические газы (азот, кислород, углекислый газ), а также метан с концентрацией более 1% анализировались на детекторе по теплопроводности (ДТП), чувствительность которого составляет 0,01%.

Условия газохроматографического анализа:

ПИД: колонка металлическая, 2 м, заполненная HayeSep SD, 0,2–0,3 мм.

ДТП: колонка металлическая, 1 м, заполненная молекулярными ситами 5А, 0,2–0,3 мм, температура колонок в изотермическом режиме – 50°; с программированием температуры – 50–175°, 10 град./мин.; температура детекторов – 190°, газ-носитель – гелий. Для калибровки прибора применяются сертифицированные поверочные газовые смеси производства ООО «ПГС-Сервис». Расчет концентраций метана, растворенного в морской воде, производился по методике S. Yamamoto et al. [7] в модификации D. Wiesenburg and N. Guinasso [8] с использованием расчетных констант растворимости метана.

Дополнительно для анализа распределения климатически активных газов в приводной атмосфере Южно-Китайского моря авторы изучали данные, полученные с помощью лазерных анализаторов на борту НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в 2019 г. Основной задачей являлось исследование распределения и динамики парниковых газов в приводном слое атмосферы в рейсе LV88 на основе сбора и анализа данных по содержанию метана и углекислого газа на двух уровнях высот относительно водной поверхности согласно движению судна. Измерение эмиссии CO_2 , CH_4 и паров воды производилось с помощью двух лазерных анализаторов потоковых концентраций газов Picarro G2311-f (Picarro, США). Данный газоанализатор предназначен для измерения эмиссии диоксида углерода (CO_2), метана (CH_4) и паров воды (H_2O) при скорости передачи данных 10 Гц для каждого газа (общая скорость передачи 30 Гц), что позволяет делать до 2000 измерений в минуту, с точностью до $1 \cdot 10^{-14}$ для CH_4 и $1 \cdot 10^{-12}$ для CO_2 . Погрешность прибора составляет 200 ppb для CO_2 , 3 ppb для CH_4 и 6 ppb + 0,3% показаний для водяного пара при небольшой подвижности прибора.

Установка газоанализаторов производилась в лаборатории научно-исследовательского судна, находящейся в его носовой части. Поступление анализируемого воздуха к газоанализатору осуществлялось камерами забора воздуха, соединенными с газоанализатором при помощи воздухозаборных трубок. Камеры с воздухозаборными трубками из помещения лаборатории через иллюминатор были выведены на палубу и расположены на двух уровнях высот. Камера забора воздуха одного из газоанализаторов была установлена на высоте 7 м (G7) над уровнем моря, а камера

второго – на высоте 14 м (G14) над уровнем моря. Для поддержания оптимального давления внутри газоанализатора к каждому из них был подключен мембранный вакуумный насос MD 4 NT (Vacuubrand, Германия).

Потоки метана были рассчитаны для каждой точки отбора проб по экспериментальным данным концентраций растворенного метана в поверхностном слое морской воды, содержаний метана в приводном слое атмосферы, температуры, солености и реальных скоростях ветра.

Результаты и обсуждение

В процессе исследований установлено, что на всей изучаемой акватории происходит эмиссия метана в атмосферу, значения потоков метана отличаются неравномерным распределением: от равновесия и слабой эмиссии 0 моль/(км²×сут) до потоков очень высокой интенсивности 29 моль/(км²×сут) (рис. 1).

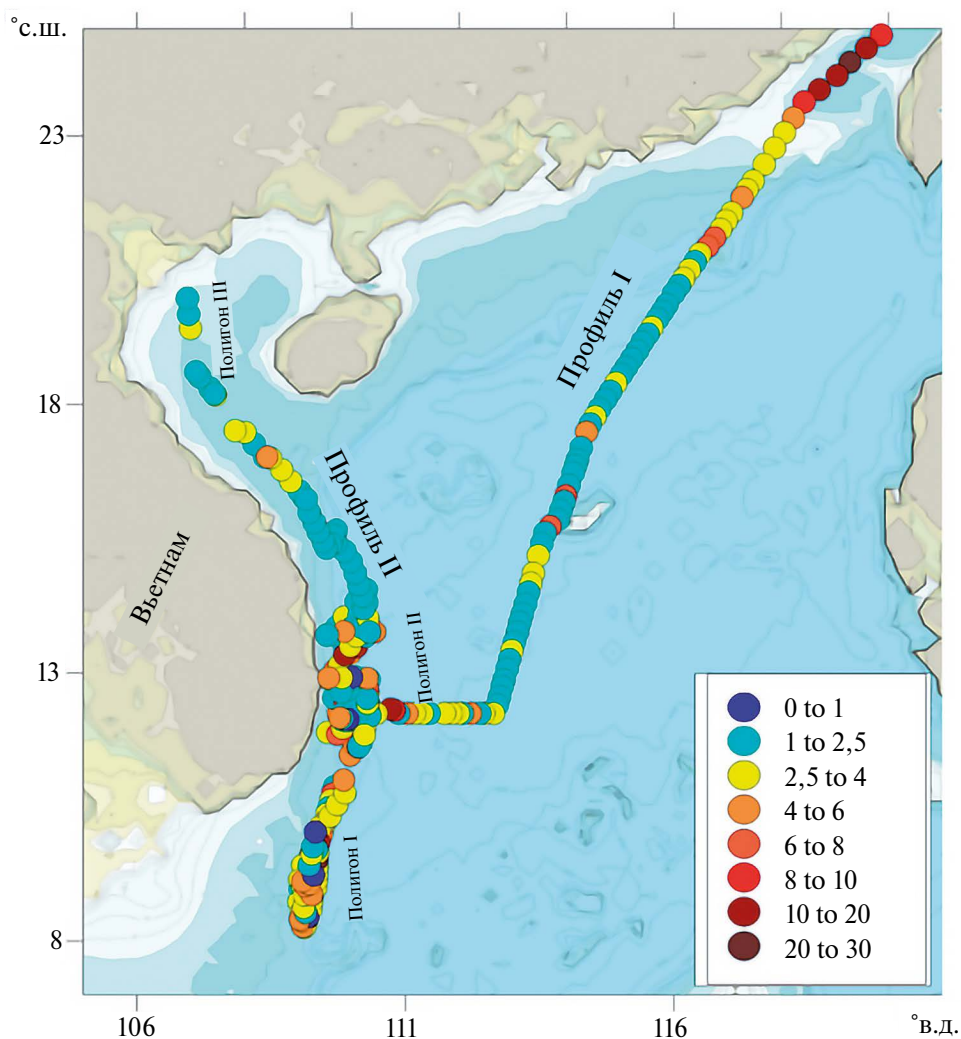


Рис. 1. Распределение потоков метана на границе раздела вода–атмосфера для рейса № 88 НИС «Академик М.А. Лаврентьев»

В предыдущий период исследований (2017 г.) в рамках комплексной экспедиции на НИС «Академик Борис Петров» (рейс № 42) авторами проанализировано распределение метана и его поток на региональном трансекте газогеохимических исследований (3180 км, 140 точек) в Южно-Китайском море в период 10–16 января 2017 г. [9]. Измерения концентрации метана (газовый хроматограф ЭХО-EW-ПИД), а также температуры и солёности (термосалинограф SBE 45) в 4-метровом поверхностном слое морской воды и метеорологические наблюдения (метеостанция Davis Vantage Pro 2) для расчета потока метана на границе вода–атмосфера проведены от Тайваньского пролива до шельфа Маллакского полуострова (рис. 2). Расчет газообмена выполнен по [8]. Получены знакопеременные значения с преобладанием эмиссии метана в атмосферу. Суммарное значение величин потока метана по профилю составило $663 \text{ моль/км}^2 \times \text{сут}$ при интервале $-1,45 \div 28,4 \text{ моль/км}^2 \times \text{сут}$ (медиана 3,65) и концентрациях метана $0,6 \div 9 \text{ нмоль/л}$. Содержание метана в приводном слое атмосферы составило $1,43 \div 1,72 \text{ ppm}$ (30 измерений). Эти данные согласуются с результатами исследований в 2019 г.

Потоки метана на границе раздела вода–атмосфера на изучаемой акватории в 2019 г. по региональному газогеохимическому профилю I с средним значения $3,8 \text{ моль/(км}^2 \times \text{сут)}$ по предложенной нами градации относятся к эмиссии умеренной интенсивности от 1 до $4 \text{ моль/(км}^2 \times \text{сут)}$. После прохождения Тайваньского пролива на профиле фиксируются единичные значения эмиссии средней интенсивности. К этому диапазону относится и значение медианы по совпадающей части профиля 2017 г., которое составляло $3,7 \text{ моль/(км}^2 \times \text{сут)}$ [10]. Немного выше, но к этому же диапазону относится и среднее значение $4 \text{ моль/(км}^2 \times \text{сут)}$ на профиле II, поток при этом изменялся от $0 \text{ моль/(км}^2 \times \text{сут)}$ до $24 \text{ моль/(км}^2 \times \text{сут)}$.

Значения потоков метана на границе раздела вода–атмосфера зависят от концентраций метана в поверхностном водном слое, приводном слое атмосферы, температуры и солёности воды, скорости ветра. Анализ распределения потоков метана для данного рейса № 88 показал, что на поток метана определяющее влияние оказывают скорость ветра и процент пересыщения. Скорость ветра усиливает газообмен на границе вода–атмосфера.

Изучение распределений потоков метана, рассчитанных в каждой точке отбора проб воды на больших акваториях за непродолжительный промежуток времени, выявило ряд важных закономерностей. Как было показано ранее, выделение метана в атмосферу происходит пульсациями и сопровождается изменением концентрации метана в морской воде как в пространстве, так и во времени, в зависимости от гидрометеорологического режима акватории [11, 12]. Зависимость потоков метана на границе вода–атмосфера от концентраций, температуры воды и скорости ветра была получена при обработке 760 значений потоков по данным рейса НИС «Академик М.А. Лаврентьев» № 52. На рис. 3 приведены результаты рассчитанных максимальных скоростей выделения метана на границе вода–атмосфера в зависимости от скорости ветра и разности между измеренными концентрациями метана в морской воде и его равновесными с атмосферой значениями.

При выбранном значении скорости ветра и перепаде концентраций наблюдается диапазон потоков метана от минимальных до максимальных значений. При повышении скорости ветра и увеличении потока метана концентрация газа в морской воде быстро падает до равновесных значений, и, соответственно, поток метана уменьшается до минимальных значений. При малых скоростях ветра и небольших потоках метана в атмосферу концентрация метана в приповерхностных водах повышается за счет его переноса из глубинных источников. На скорость газообмена при низких скоростях ветра $1,5 \div 4 \text{ м/с}$ основное влияние оказывает термическая конвекция, имеющая зависимость от температуры и солёности воды. При более

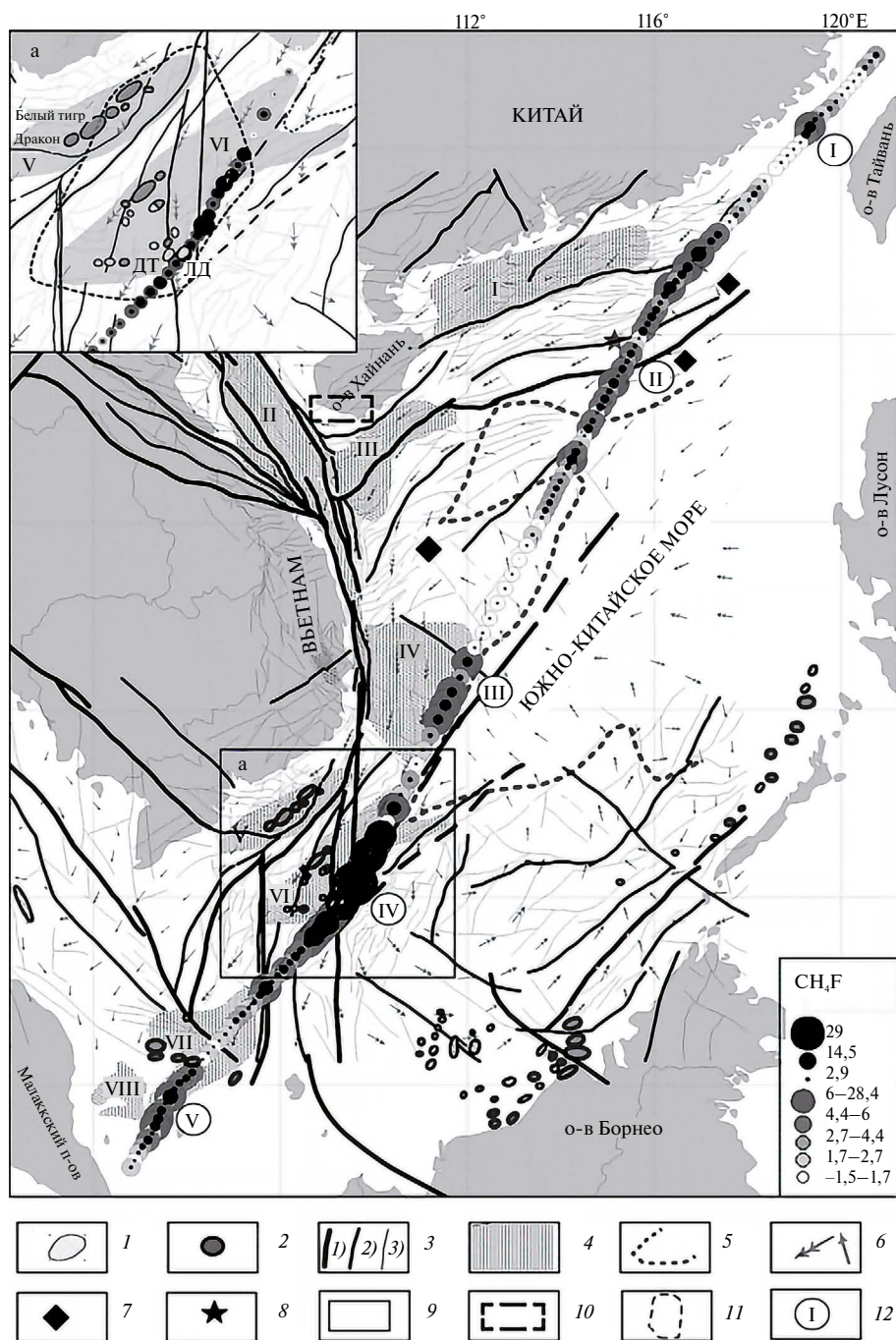


Рис. 2. Распределение потока метана в атмосферу по региональному газогеохимическому профилю на тектонической карте Южно-Китайского моря. Условные обозначения: 1 – газовые залежи, 2 – нефтяные залежи, 3 – разломы (1) первого порядка; 2) второго порядка; 3) третьего порядка), 4 – основные осадочные бассейны (палеоген, синрифтовые осадочные толщи с высоким содержанием углерода) (I – дельты р. Жемчужной, II – Шон Хон, III – Кионгдонгнан, IV – Фухань, V – Ку Лонг, VI – Нам Кон Шон, VII – Натунский, VIII – Малайский), 5 – схематичный контур границ блока океанической коры, 6 – направление поверхностных течений в зимний период, 7 – участки нефтегазопоискового бурения КНР, 8 – газогидратоносный участок, 9 – врезка, 10 – район с активными выходами углеводородных газов на дне шельфа о-ва Хайнань [9], 11 – аномальное поле метана в придонном слое (100–250 нл/л), обнаруженное в 1983 г., 12 – обозначения и порядковый номер зон эмиссии метана в атмосферу. Месторождения газа: ДТ – Дан Тай, ЛД – Лан До. CH₄F – поток метана (моль/км²×сут). Проекция WGS 84

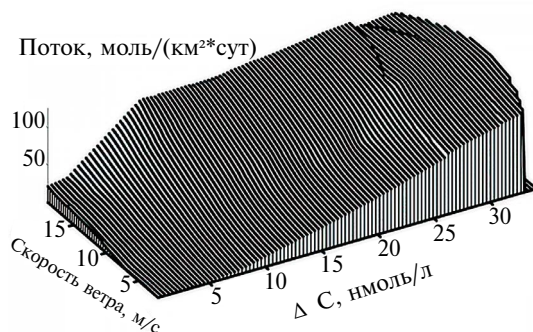


Рис. 3. Изменение максимального потока метана на границе раздела вода–атмосфера в зависимости от скорости ветра и разности концентрации метана в морской воде и его равновесного с атмосферой значения

высоких скоростях ветра определяющее влияние на величину потока метана оказывают обрушение волн и схлопывание газовых пузырьков.

В таблице приведены осредненные характеристики на трех полигонах: Намконсон-I, Фухань-II, Шонхон-III.

Потоки метана, показатель пересыщения вод метаном, измеренные концентрации метана были выше всего на южном полигоне I. На акватории шельфа и склона Вьетнама на момент измерений преобладали ветра 3 м/с и 2 м/с, хотя наблюдался и ветер 11–12 м/с. На северном полигоне III скорости ветра были до 7 м/с. Самые низкие потоки также были в северной части профиля II.

Средние и минимальные значения потоков на трех полигонах были близки, но выделяется центральный участок на полигоне I. Полигон расположен в зоне перехода

Осредненные характеристики на полигонах потоков метана на границе вода–атмосфера (F, моль/км²×сут); измеренных концентраций метана (C, нмоль/л); равновесных концентраций метана (C*, нмоль/л); температуры (°C); солёности (S, ‰) в 4-метровом поверхностном слое воды; показателей пересыщения вод метаном (N, ‰); скорости ветра U, м/с

LV88	F	C	C*	ΔC	N	C _{air}	U	t	S
I – бассейн Намконсон									
Среднее	4	6	2,1	4	202	2,0	3	27,9	33,3
Максимум	24	41	2,5	39	1841	2,3	11	30,0	34,5
Минимум	1	3	1,8	1	37	1,7	1	27,1	22,4
II – бассейн Фухань									
Среднее	3	5	2,0	3	142	1,8	3	27,2	33,5
Максимум	16	9	2,0	7	358	1,9	12	28,8	33,9
Минимум	0	3	1,7	1	38	1,6	1	26,2	28,8
III – Шонхон									
Среднее	3	5	2,0	3	167	1,9	2	26,7	33,5
Максимум	5	9	2,1	7	314	2,0	7	27,6	33,8
Минимум	1	3	1,9	1	30	1,8	1	25,0	32,5

от континентального шельфа к глубоководному осадочному бассейну Намконсон. По нашим расчетам, на траверзе р. Меконг наблюдается эмиссия от слабой до очень высокой интенсивности (максимум 24 моль/(км²×сут). Отбор проб воды был выполнен на гидрологических станциях в шельфовой – st02 (156 м), st04 (262 м), st06 (249 м), st08 (196 м), st10 (156 м), st11 (267 м), st12 (267 м), st13 (264 м), st14 (256 м), st15 (242 м); склоновой st03 (430 м), st05 (707 м), st07 (866 м), st09 (682 м) – и глубоководных частях профиля – st11 (1004 м), st16 (1796 м). Концентрации метана для CTD станций в поверхностном водном слое составили от 2,9 до 6,5 нмоль/л, среднее 3,5 нмоль/л; процент пересыщения изменялся от 37 до 240%, среднее значение 71%. Высокие концентрации метана на промежуточных глубинах 120–170 м (18 нмоль/л – st07; 11 нмоль/л – st09), на 200–300 м (7–8 нмоль/л – st11; 6–12 нмоль/л – st15), на 50 м (5 нмоль/л – st16) и максимальные значения концентраций в придонном слое (185 нмоль/л, – st06 и 81 нмоль/л – st10), вероятно, обусловлены поступлением газов в водную толщу из донных отложений. Максимальные концентрации метана в донных осадках приходятся на разные горизонты керна, но наблюдается тенденция увеличения концентрации метана в верхней части до 100 см. Самые большие концентрации метана, отмеченные на полигоне I, наблюдаются для шельфовой станции LV88-03/GC, глубина моря 263 м.

Вероятно, метан из донных отложений поступает в воды придонного слоя и переносится за счет турбулентного перемешивания, выносятся в вышележащие водные массы, что в некоторых случаях может приводить к образованию органических пленок на поверхности морской воды [10, 13].

На центральном полигоне (западная часть осадочного бассейна Фухань) эмиссия метана высокой интенсивности (максимум 16 моль/(км²×сут) при глубинах 200–600 м наблюдается как на континентальном склоне, так и в шельфовой области. Распределение концентраций метана в водной толще на акватории полигона II, включая шельф, континентальный склон и глубоководную котловину, было изучено на 14 гидрологических станциях: st17 (2314 м), st18 (2360 м), st19 (1905 м), st20 (685 м), st21 (1645 м), st22 (1416 м), st23 (700 м), st24 (235 м), st25 (825 м), st26 (660 м), st27 (123 м), st28 (2280 м), st29 (870 м), st30 (167 м). Несмотря на то что на втором полигоне большинство станций относятся к глубоководным, средние значения концентраций метана в поверхностном водном слое на CTD станциях были такими же, как на первом полигоне, и составили 3,5 нмоль/л, диапазон изменения от 2,7 до 5,3 нмоль/л; а средний процент пересыщения был выше, чем на первом полигоне и составил 83%, диапазон от 38 до 181%. На горизонте максимального зондирования около 600 м для глубоководных станций концентрации метана были 1–2 нмоль/л. Максимальные значения концентраций на шельфовых станциях около 5 нмоль/л, концентрации CH₄ на промежуточных глубинах 65–200 м составляли 3–7 нмоль/л. В центральной части на профиле II были отобраны керны донных отложений: LV88-16GC, LV88-17GC, LV88-18GC, LV88-20/1GC, LV88-21GC, LV88-22GC, LV88-23GC, LV88-25GC, LV88-27GC, LV88-28GC, LV88-29GC, LV88-30GC, LV88-31GC, LV88-32GC, LV88-33GC, LV88-34GC, LV88-35GC, LV88-36GC, LV88-37GC, LV88-38GC, LV88-40GC, LV88-41GC, LV88-42GC, LV88-43GC, LV88-46GC, LV88-47GC, LV88-48GC, LV88-49GC. Максимальные концентрации метана на полигоне II фиксируются в осадочном керне шельфовой станции LV88-42GC на горизонте 250 см, повышенные значения – на 70 см.

Распределение концентраций метана в северной части профиля II было исследовано для 5 гидрологических станций: st31 (118 м), st32 (110 м), st34 (90 м), st35 (72 м), st36 (62 м). В поверхностном водном слое на шельфовых станциях (глубина от 62 до 118 м) концентрации метана составили от 2,6 до 5,0 нмоль/л, среднее значение 3,7 нмоль/л, процент пересыщения от 30 до 156%, среднее значение 89%. Концен-

трация метана увеличивалась ко дну. Максимальные значения концентраций метана фиксировались в придонном слое от 4 до 32 нмоль/л. В северной части профиля II были отобраны керны донных отложений: LV88-50GC, LV88-51GC, LV88-55GC, LV88-56GC. Для этих станций общей тенденцией распределения концентрации метана является уменьшение к верхней части керна осадка от горизонта 100–150 см.

Таким образом, поскольку максимальные значения концентраций метана в придонном слое коррелируют с аномалиями метана в кернах донных отложений, существует вероятность того, что метан из донных осадков в шельфовой зоне привносится в вышележащие воды. Стратификация водной толщи и окисление метана в водной толще ограничивают количество метана, достигающего атмосферы.

Повышенные концентрации метана в поверхностном водном слое, на промежуточных глубинах, в придонном слое обусловлены поступлением газов в водную толщу из донных отложений и контролируются комплексом гидрологических и геологических факторов.

Полученные результаты хорошо согласуются с ранее проведенными авторами исследованиями. Было выявлено на примере трансекта через Южно-Китайское море (рейс № 42 НИС «Академик Борис Петров», 2017 г.), что не менее 2/3 (2000 км) длины газогеохимического профиля занимают зоны эмиссии метана в атмосферу, но с невысокими значениями потока. Сопоставление особенностей пространственного распределения этих зон и их характеристик с геологическими структурами, открытыми и прогнозируемыми источниками углеводородов подтверждают высокий углеводородный потенциал Южно-Китайского моря.

Дополнительно для анализа распределения климатически активных газов в приводной атмосфере Южно-Китайского моря авторы изучали данные, полученные с помощью лазерных анализаторов на борту НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в 2019 г. Основной задачей являлось исследование распределения и динамики парниковых газов в приводном слое атмосферы в рейсе LV88 на основе сбора и анализа данных по содержанию метана и углекислого газа на двух уровнях высот относительно водной поверхности согласно движению судна. Измерение эмиссии CO_2 , CH_4 и паров воды производилось с помощью двух лазерных анализаторов потоковых концентраций газов Picarro G2311-f (Picarro, США). Данный газоанализатор предназначен для измерения эмиссии диоксида углерода (CO_2), метана (CH_4) и паров воды (H_2O) при скорости передачи данных 10 Гц для каждого газа (общая скорость передачи 30 Гц), что позволяет делать до 2000 измерений в минуту, с точностью до $1 \cdot 10^{-14}$ для CH_4 и $1 \cdot 10^{-12}$ для CO_2 . Погрешность прибора составляет 200 ppb для CO_2 , 3 pp для CH_4 и 6 ppb + 0,3 % показаний для водяного пара при небольшой подвижности прибора.

Установка газоанализаторов производилась в лаборатории научно-исследовательского судна, находящейся в его носовой части. Поступление анализируемого воздуха к газоанализатору осуществлялось камерами забора воздуха, соединенными с газоанализатором с помощью воздухозаборных трубок. Камеры с воздухозаборными трубками из помещения лаборатории через иллюминатор были выведены на палубу и расположены на двух уровнях высот. Камера забора воздуха одного из газоанализаторов была установлена на высоте 7 м (G7) над уровнем моря, а камера второго – на высоте 14 м (G14) над уровнем моря. Для поддержания оптимального давления внутри газоанализатора к каждому из них был подключен мембранный вакуумный насос MD 4 NT (Vacuubrand, Германия).

Для контроля метеорологических условий, в которых проводилось измерение эмиссии газов, осуществлялось измерение температуры воздуха, давления воздуха, скорости и направления ветра, фотосинтетического активного излучения, радиации с помощью метеорологических датчиков. Метеорологические датчики были установлены на палубе в носовой части корабля рядом с камерой забора воздуха

газоанализатора G7. Определение температуры и давления воздуха, скорости и направления ветра велось портативным преобразователем метеоданных Vaisala Weather Transmitter WXT520 (Хельсинки, Финляндия). Фотосинтетическая радиация определялась с помощью датчика Li-190 (Li-Cor, США), а чистая радиация – радиометром Net Radiometer CNR4 (Kipp Zonen, Нидерланды). Сбор и вывод метеорологических данных со всех датчиков осуществлялись измерительным и контрольным модулем Data Logger CR 1000 (Campbell Scientific, США).

За время рейса исследовано более 6400 км маршрута, при этом с газоанализатора G14 было получено 5895 пятиминутных измерений по углекислому газу и 6183 пятиминутных значения по метану, с газоанализатора G7 – 2754 измерения по углекислому газу и 3042 измерения по метану. Обработка полученных данных проводилась в программах Microsoft Excel и Math Lab, а их визуализация – в геоинформационном приложении ArcGIS 10.4 (рис. 4).

Согласно полученным данным, концентрация углекислого газа за время экспедиции варьировала в пределах от 409 до 531 ppm на уровне G14 и от 368 до 519 ppm на уровне G7. Несмотря на высокие максимальные показатели, 76% от всех значений были ниже 420 ppm, что подтверждает рассчитанное среднее значение CO_2 на обоих уровнях, которое составило 418,7 ppm. Полученные данные позволяют судить о нормальном уровне концентраций в акваториях трех представленных морей. Исключение составили участки в акватории Южно-Китайского моря, расположенные в его северо-восточной части и центральной части вблизи п-ова Индокитай, однако эти аномальные значения имели единичный характер.

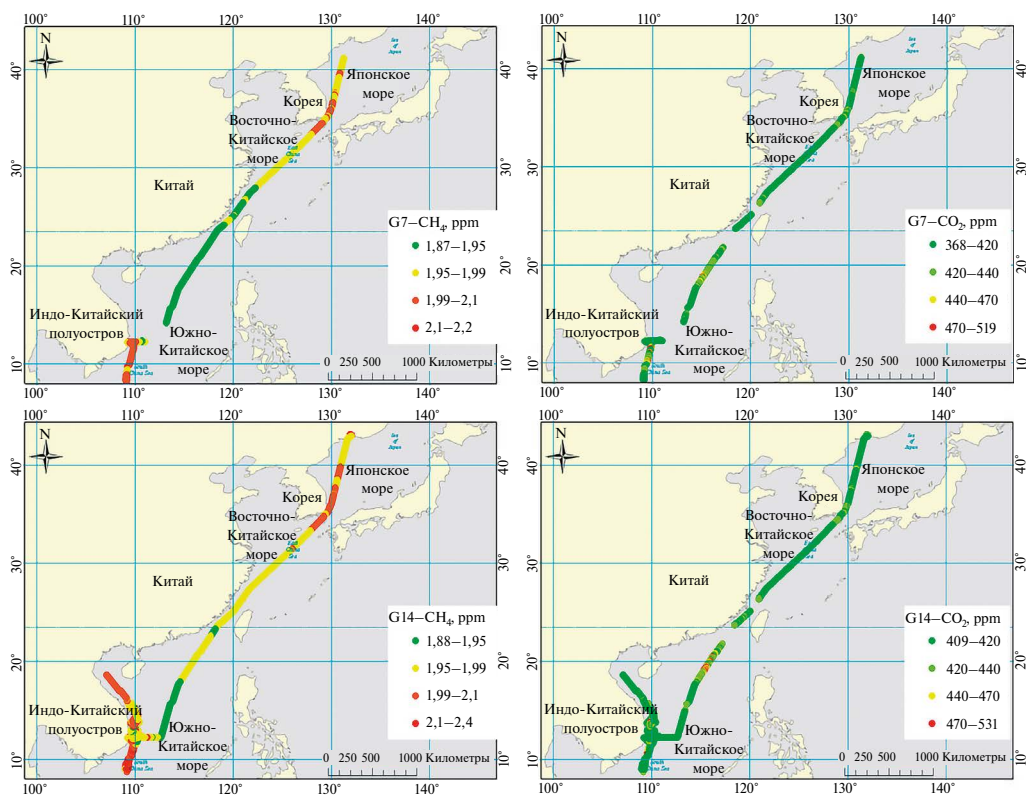


Рис. 4. Пространственная изменчивость концентрации CO_2 и CH_4 в рейсе LV88 по курсу следования НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 2019 г.

Пространственное распределение эмиссии метана имело более контрастный характер по сравнению с распределением углекислого газа и позволяет выявить различия между эмиссией газа в исследуемых морях. Наименьшее среднее значение концентраций CH_4 , равное 1,97 ppm, получено в Восточно-Китайском море. В Японском и Южно-Китайском морях среднее значение CH_4 составило 1,99 ppm, однако значения эмиссии в Японском море были наиболее стабильны и варьировали в пределах от 1,97 до 2,04 ppm, а значения эмиссии CH_4 в Южно-Китайском море были наиболее ярко выражены. Вариационный диапазон для Южно-Китайского моря составил 1,89–2,4 ppm, наименьшие значения концентрации CH_4 были зафиксированы на участке от его северо-восточной до центральной части, а повышенные аномальные значения – в прибрежной части п-ова Индокитай с максимумом, подобно единичным аномалиям CO_2 , в центральной части акватории вблизи южной части п-ова Индокитай.

Выводы

В результате исследований изучено пространственное распределение потоков метана на границе раздела вода–атмосфера. Предложенный в лаборатории ТОИ ДВО РАН метод расчета потоков метана для каждой точки отбора проб позволил выявить и объяснить зоны с повышенной эмиссией метана с акватории.

Установлена высокая изменчивость потока от равновесия и слабой эмиссии 0–1 моль/($\text{км}^2 \times \text{сут}$) до потоков очень высокой интенсивности, зависящая от наличия источника и состояния поверхности моря.

Среднее значение потоков метана на границе раздела вода–атмосфера на континентальном шельфе, склоне по региональному газогеохимическому профилю II составило 4 моль/($\text{км}^2 \times \text{сут}$). Это значение немного выше, чем среднее значение 3,8 моль/($\text{км}^2 \times \text{сут}$) в открытой части моря на профиле I, на котором после прохождения Тайваньского пролива с максимальным потоком 29 моль/($\text{км}^2 \times \text{сут}$) фиксируются единичные значения эмиссии средней интенсивности.

Средние и минимальные значения потоков на трех полигонах близки, но выделяется центральный участок на полигоне I, расположенный в зоне перехода от континентального шельфа к глубоководному осадочному бассейну Намконсон. На траверзе р. Меконг наблюдалась эмиссия от слабой до очень высокой интенсивности (максимум 24 моль/($\text{км}^2 \times \text{сут}$)).

На акватории Привьетнамского континентального шельфа и склона при глубинах моря 200–600 м существуют локальные области с высокой до 20 моль/($\text{км}^2 \times \text{сут}$) и очень высокой интенсивностью до 24 моль/($\text{км}^2 \times \text{сут}$).

Активность газообмена на границе дно–вода–атмосфера обусловлена выходом CH_4 из донных отложений и контролируется комплексом геологических и гидрологических факторов.

В целом, невысокие значения потока метана в атмосферу в Южно-Китайском море по сравнению с Охотским и Японским морями, вероятно, обусловлены в первую очередь низкой сейсмической активностью этого уникального окраинного бассейна в настоящее время. Тем не менее в условиях сейсмической активизации многих районов северо-западной части Тихого океана не исключено, что эта ситуация изменится.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bange H.W., Bartell U.H., Rapsomanikis S., Andrae O. Methane in the Baltic and the North Seas and reassessment of marine emissions of methane // *Global Biogeochem. Cycles*. 1994. Vol. 8. P. 465–480.

2. Tsurushima N., Watanabe S., Tsunogai S. Methane in the East China sea water // *J. of Oceanography* (Japan). 1996. Vol. 52, No. 2. P. 221–233.
3. Ye Wang-Wang, Zhang Guiling, Zheng Wenjing, Wu Ying. Methane distributions and sea-to-air fluxes in the Pearl River Estuary and the northern South China sea // *Deep-Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2019. Vol. 167. P. 34–45. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.06.016>.
4. Borges A.V., Abril G., Bouillon S. Carbon dynamics and CO₂ and CH₄ outgassing in the Mekong delta // *Biogeosciences*. 2018. No. 15. P. 1093–1114. <https://doi.org/10.5194/bg-15-1093-2018>.
5. Tseng Hsiao-Chun, Chen Chen-Tung Arthur, Borges Alberto Vieira, Delvalls Angel, Chang Yu-Chang. Methane in the South China Sea and the Western Philippine Sea // *Continental Shelf Research*. 2017. Vol. 135. P. 23–34. DOI: 10.1016/j.csr.2017.01.005.
6. Zhou H., Yin X., Yang Q., Wang H., Wu Z., Bao S. Distribution, source and flux of methane in the western Pearl River Estuary and northern South China Sea // *Mar. Chem*. 2009. Vol. 117. P. 21–31.
7. Yamamoto S., Alcauskas J.B., Crozier T.E. Solubility of methane in distilled water and sea water // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1976. Vol. 21, No. 1. P. 78–80.
8. Wiesenburg D.A., Guinasso N.L. Equilibrium solubility of methane, carbon monoxide, and hydrogen in water and sea water // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1979. Vol. 24, No. 4. P. 356–360.
9. Шакиров Р.Б., Яцук А.В., Мишукова Г.И. и др. О потоке метана в атмосферу в Южно-Китайском море // *ДАН*. 2019. Т. 486. № 1. С. 103–107. DOI: 10.31857/S0869-56524861103-107.
10. Мишукова Г.И., Обжиров А.И., Мишуков В.Ф. Метан в пресных и морских водах и его потоки на границе вода–атмосфера в Дальневосточном регионе. Владивосток: Дальнаука, 2007. 159 с.
11. Мишукова Г.И., Пестрикова Н.Л., Верещагина О.Ф., Окулов А.К., Мишуков В.Ф. Пространственная и временная изменчивость распределения метана и его потоков на границе вода–атмосфера на Прикурильских акваториях в районе Охотского моря и Тихого океана // *Подводные исследования и робототехника*. 2013. № 1 (15). С. 52–61.
12. Обжиров А.И., Пестрикова Н.Л., Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Окулов А.К. Распределение содержания и потоков метана на акваториях Японского, Охотского морей и Прикурильской части Тихого океана // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 3. С. 71–81.
13. Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Обжиров А.И. Особенности проявления метана в природных водах на территории Приморского края России // *Вестн. ДВО РАН*. 2009. № 6. С. 43–49.

REFERENCES

1. Bange H.W., Bartell U.H., Rapsomanikis S., Andrae O. Methane in the Baltic and the North Seas and reassessment of marine emissions of methane. *Global Biogeochem. Cycles*. 1994; 8:465–480.
2. Tsurushima N., Watanabe S., Tsunogai S. Methane in the East China sea water. *J. of Oceanography* (Japan). 1996;52(2):221–233.
3. Ye Wang-Wang, Zhang Guiling, Zheng Wenjing, Wu Ying. Methane distributions and sea-to-air fluxes in the Pearl River Estuary and the northern South China sea. *Deep-Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2019; 167:34–45. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.06.016>.
4. Borges A.V., Abril G., Bouillon S. Carbon dynamics and CO₂ and CH₄ outgassing in the Mekong delta. *Biogeosciences*. 2018;(15):1093–1114. <https://doi.org/10.5194/bg-15-1093-2018>.
5. Tseng Hsiao-Chun, Chen Chen-Tung Arthur, Borges Alberto Vieira, Delvalls Angel, Chang Yu-Chang. Methane in the South China Sea and the Western Philippine Sea. *Continental Shelf Research*. 2017;135:23–34. DOI: 10.1016/j.csr.2017.01.005.
6. Zhou H., Yin X., Yang Q., Wang H., Wu Z., Bao S. Distribution, source and flux of methane in the western Pearl River Estuary and northern South China Sea. *Mar. Chem*. 2009; 117:21–31.
7. Yamamoto S., Alcauskas J.B., Crozier T.E. Solubility of methane in distilled water and sea water. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1976; 21(1):78–80.
8. Wiesenburg D.A., Guinasso N.L. Equilibrium solubility of methane, carbon monoxide, and hydrogen in water and sea water. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1979;24(4):356–360.

9. Shakirov R.B., Yatsuk A.V., Mishukova G.I. et al. On the flow of methane into the atmosphere in the South China Sea. *DAN*. 2019;486(1):103–107. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0869-56524861103-107.
10. Mishukova G.I., Obzhirov A.I., Mishukov V.F. Methane in fresh and marine waters and its flows at the water–atmosphere boundary in the Far Eastern region. Vladivostok: Dal’nauka; 2007. 159 p. (In Russ.).
11. Mishukova G.I., Pestrikova N.L., Vereshchagina O.F., Okulov A.K., Mishukov V.F. Spatial and temporal variability of the distribution of methane and its fluxes at the water–atmosphere boundary in the Prikurilsky water areas in the Okhotsk Sea and the Pacific Ocean. *Underwater Research and Robotics*. 2013;15(1):52–61. (In Russ.).
12. Obzirov A.I., Pestrikova N.L., Mishukova G.I., Mishukov V.F., Okulov A.K. Distribution of methane content and fluxes in the waters of the Seas of Japan, Okhotsk and the Kuril Pacific Ocean. *Meteorology and Hydrology*. 2016;(3):71–81. (In Russ.).
13. Mishukova G.I., Mishukov V.F., Obzhirov A.I. Features of methane manifestation in natural waters on the territory of the Primorsky Territory of Russia. *Vestnik of the FEB RAS*. 2009;(6):43–49. (In Russ.).

Научная статья

УДК 581.845

DOI: 10.31857/S0869769825030044

EDN: PLVYAW

Анатомическое строение стебля и листа *Sanguisorba parviflora* и *S. tenuifolia* (Rosaceae)

А.В. Анохина✉, И.В. Любавина

Анна Викторовна Анохина

кандидат биологических наук, доцент

Благовещенский государственный педагогический университет, Благовещенск, Россия

annabgpu@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1113-4501>

Ирина Владимировна Любавина

старший лаборант

Амурский филиал Ботанического сада-института ДВО РАН, Благовещенск, Россия

andrina97@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0006-8314-0501>

Аннотация. С помощью световой микроскопии проведено сравнительное исследование признаков анатомического строения стебля и листа 2 морфологически сходных видов рода *Sanguisorba* L.: *S. parviflora* (Maxim.) Takeda и *S. tenuifolia* Fisch. ex Link. В строении стебля изучаемых видов диагностическим признаком является лишь число проводящих пучков на поперечном срезе. В строении листа таксономически значимых признаков нами не выявлено. Мы согласны с мнением тех систематиков, которые рассматривают *S. tenuifolia* как синоним *S. parviflora*. Условно информативными могут быть лишь количественные признаки: толщина листовой пластинки, длина клеток верхней эпидермы, число устьиц на 1 мм² листовой поверхности.

Ключевые слова: *Sanguisorba*, анатомическое строение, таксономические признаки

Для цитирования: Анохина А.В., Любавина И.В. Анатомическое строение стебля и листа *Sanguisorba parviflora* и *S. tenuifolia* (Rosaceae) // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 3. С. 43–51.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030044>

Anatomical structure of the stem and leaf of *Sanguisorba parviflora* and *S. tenuifolia* (Rosaceae)

A.V. Anokhina, I.V. Lyubavina

Anna V. Anokhina

Candidate of Sciences in Biology, Docent

Blagoveshchensk State Pedagogical University, Blagoveshchensk, Russia

annabgpu@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1113-4501>

Irina V. Lyubavina

Senior Laboratory Assistant

Amur Branch of the Botanical Garden-Institute FEB RAS, Blagoveshchensk, Russia

andrina97@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0006-8314-0501>

Abstract. Using light microscopy, a comparative study of the signs of the anatomical structure of the stem and leaf of 2 morphologically similar species of the genus *Sanguisorba* L.: *S. parviflora* (Maxim.) Takeda and *S. tenuifolia* Fisch. ex Link was carried out. In the stem structure of the studied species, the diagnostic feature is only the number of conducting beams on the cross section. We have not identified any taxonomically significant features in the structure of the leaf. We agree with the opinion of those taxonomists who consider *S. tenuifolia* as a synonym of *S. parviflora*. Conventionally, only quantitative signs can be informative: the thickness of the leaf blade, the length of the cells of the upper epidermis, the number of stomata per 1 mm² of the leaf surface.

Keywords: *Sanguisorba*, anatomical structure, taxonomical features

For citation: Anokhina A.V., Lyubavina I.V. Anatomical structure of the stem and leaf of *Sanguisorba parviflora* and *S. tenuifolia* (Rosaceae). *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(3):43–51. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030044>

Введение

Одним из важных родов в подсемействе розовые (Rosoidae) является род кровохлебка (*Sanguisorba* L.). В пределах России можно встретить около 20 видов изучаемого рода. Как следует из сводки «Сосудистые растения советского Дальнего Востока» [1, с. 228–229], в род *Sanguisorba* включены 5 видов: *S. magnifica* I. Schischk. et Kom., *S. officinalis* L., *S. parviflora* (Maxim.) Takeda, *S. stipulate* Raf., *S. tenuifolia* Fisch. ex Link. В.М. Старченко указывает для территории Амурской области 3 вида: *S. officinalis*, *S. parviflora* и *S. tenuifolia* [2, с. 90–91].

Из названных трех видов наиболее изученной является *S. officinalis*. Проанализировав литературу, мы отмечаем, что изучение этого вида проводилось по разным направлениям: исследовался биохимический состав [3, 4, 5], фармакогностическое действие [6], антимикробная активность [7, 8], биология цветения [9], проводились морфолого-анатомические исследования [10–12]. Е.А. Струпан с коллегами исследовали анатомическое строение подземных органов *S. officinalis*, произрастающей в районе южной тайги Красноярского края [12, с. 107–109]. А.Р. Казеева и К.А. Пупыкина, изучая морфолого-анатомические признаки корневищ с корнями и травы *S. officinalis*,

растущей в Башкортостане, выделяют следующие диагностические признаки для листа: клетки верхней эпидермы с четковидными утолщениями, нижней эпидермы извилистые с утолщенной стенкой, амфистоматический тип листа с устьицами аномоцитного типа, простые и головчатые волоски и вместилища с желтым содержимым на нижней стороне листа, многочисленные друзы оксалата кальция вдоль жилок [6; 10, с. 17–22].

Остальные виды рода изучены значительно меньше. Систематика рода вызывает значительные разногласия, что выражается в различиях понимания разными авторами объема рода. Трудности систематики обусловлены полиморфизмом морфологических признаков и гибридогенным характером происхождения ряда видов.

Во «Флоре СССР» С.В. Юзепчук, обрабатывая этот род, называет оба вида (*S. parviflora* и *S. tenuifolia*) «сомнительными» [13, с. 427–428]. Он выделяет *S. parviflora* как отдельный вид, а *S. tenuifolia*, по его мнению, это гибрид *S. parviflora* и *S. officinalis*. Во многотомной работе “Flora of China” авторы выделяют как вид *S. parviflora*, а *S. tenuifolia* сводят в ее синоним [14, с. 386].

У других ученых иное мнение. Во «Флоре Сибири» С.Н. Выдрина признает оба вида самостоятельными [15, с. 122–124]. В.Н. Ворошилов описывает *S. parviflora* и *S. tenuifolia* как два разных вида [16, с. 355–356]. Такого же мнения придерживается и В.В. Якубов, обрабатывая этот род для сводки «Сосудистые растения советского Дальнего Востока» [1]. Вслед за ним и В.М. Старченко для флоры Амурской области указывает эти виды в качестве самостоятельных [2].

Особи изученных нами видов имеют прямостоячий, ветвящийся в верхней части, без опушения стебель. Листья непарноперисто рассеченные с 4–15 парами сидячих или короткочерешковых листочков. У *S. parviflora* листочки узколанцетной пильчатой формы, без опушения, у *S. tenuifolia* эллиптической формы, также без опушения.

Цветки мелкие, сидячие, собраны в цилиндрические поникающие колосовидные соцветия, у *S. parviflora* бело-розовой окраски, а у *S. tenuifolia* темно-розовой окраски. Плод – орешек, коричневой окраски.

Сравнительно-анатомический метод достаточно широко используется при решении таксономических проблем, однако морфологически близкие и географически слабо обособленные виды рода *Sanguisorba* подобными исследованиями практически не охвачены. В литературных источниках описание анатомического строения стебля и листа *S. parviflora* и *S. tenuifolia* отсутствуют. В этой связи выявление анатомических признаков, имеющих таксономическое значение у близкородственных видов рода *Sanguisorba*, систематическое положение которых до сих пор остается дискуссионным, является актуальным.

Материал и методика

Материалом послужили гербарные образцы *S. parviflora* и *S. tenuifolia*, предоставленные Гербарием АВГИ (Амурский филиал Ботанического сада-института ДВО РАН).

Для анатомических исследований образцы стеблей фиксировали в смеси спирта и глицерина (1:1). Поперечные срезы изготавливали бритвой от руки и заключали в глицерин-желатиновую среду. При анализе поперечного среза стебля отмечали его форму, общую топографию тканей, толщину первичной коры, характер расположения сосудов, радиальный и тангенциальный диаметр сосудов, строение сердцевины [17]. Поперечные срезы листа готовили из его средней части в области главной жилки бритвой от руки. Анализируя поперечный срез листа, отмечали число рядов и характер расположения столбчатого и губчатого мезофилла, строение средней жилки. При описании эпидермы особое внимание обращали на форму и размеры основных

эпидермальных клеток, замыкающих клеток устьиц и трихом, число устьиц и трихом на 1 мм² поверхности листа [18]. При характеристике типов устьиц (устьичных аппаратов) использовали классификацию М.А. Барановой [19]. Устьичный индекс (V_u) определяли по формуле $V_u = \frac{унэ}{кнэ} + унэ$, где $кнэ$ – число эпидермальных клеток нижней эпидермы на 1 мм², $унэ$ – число устьиц нижней эпидермы на 1 мм².

Все измерения проведены в 30-кратной повторности. Статистическая обработка результатов измерений проводилась с использованием компьютерной программы Microsoft Excel статистика. Для каждого изучаемого признака определяли среднее значение (M) и его ошибку (m). Препараты исследовали под микроскопом Axioskop 40, фотографии сделаны цифровой видеокамерой Canon PowerShot G9.

Результаты и обсуждение

В ходе проведенного исследования установлено, что у исследуемых видов форма стебля на поперечном срезе одинаковая: стебель ребристый, не опушенный. Эпидерма представлена таблитчатыми клетками с толстыми внешними стенками, покрытыми кутикулой.

Виды различаются по толщине первичной коры в районе ребер и вне их. Все цифровые данные по анатомическому строению приведены в таблице.

Морфометрическая характеристика ($M \pm m$) стебля и листа видов рода *Sanguisorba*

Признак	<i>S. parviflora</i>	<i>S. tenuifolia</i>
Толщина первичной коры в районе ребер, мкм	143,09±15,69	128,74±15,08
Толщина первичной коры вне ребер, мкм	101,27±6,29	71,75±6,32
Радиальный диаметр крупных сосудов, мкм	45,92±2,008	50,43±2,44
Радиальный диаметр мелких сосудов, мкм	24,19±0,95	22,55±0,68
Тангенциальный диаметр крупных сосудов, мкм	41,41±1,66	41,82±2,008
Тангенциальный диаметр мелких сосудов, мкм	24,60±1,22	20,50±1,22
Толщина листовой пластинки в районе средней жилки, мкм	176,30±8,89	191,47±8,22
Толщина листовой пластинки в удаленных от жилок местах, мкм	150,88±6,10	172,20±6,55
Толщина столбчатого мезофилла, мкм	45,92±1,70	46,33±3,05
Толщина губчатого мезофилла, мкм	51,25±2,38	54,53±4,73
Верхняя эпидерма		
Длина клеток, мкм	127,10±10,21	88,97±7,58
Ширина клеток, мкм	48,79±3,74	46,33±5,43
Нижняя эпидерма		
Длина клеток, мкм	82,82±3,99	82,82±6,46
Ширина клеток, мкм	55,35±3,97	42,64±2,67
Длина устьиц, мкм	35,67±1,50	34,85±4,06
Число устьиц на 1 мм ² , шт.	137,90±7,49	128,51±4,27
V_u , %	42,57±2,36	41,15±2,33

Строение первичной коры у обоих видов сходно. В ее состав входят 2–3-слойная пластинчатая колленхима, 2–3-слойная хлоренхима и крупноклеточная паренхима, которая располагается в 2–3 слоя клеток у *S. parviflora* и в 3–4 слоя клеток у *S. tenuifolia*. В ребрах стебля находятся колленхима в 7–9 слоев клеток и крупноклеточная паренхима, состоящая из 3–5 слоев клеток. Замыкает первичную кору хорошо выраженная эндодерма, состоящая из плотно сомкнутых прямоугольных или овальных клеток со слегка утолщенными оболочками.

Центральный цилиндр начинается сплошным склеренхимным кольцом, состоящим из 4–15 слоев клеток. Стебель пучкового типа. Проводящие пучки, открытые, расположенные кольцом вокруг сердцевины. Нами отмечено, что виды различаются по числу проводящих пучков на поперечном срезе. Следовательно, этот признак можно использовать как диагностический. Так, в стебле *S. parviflora* насчитывается 25–26 проводящих пучков, а в стебле *S. tenuifolia* их всего 17–19.

Флоэма почти однородная, состоит из проводящих элементов. Клетки проводящих элементов флоэмы и флоэмной паренхимы мелкие, тонкостенные. Сосуды ксилемы в проводящих пучках располагаются радиальными цепочками по 3–6 у *S. parviflora* или по 4–7 у *S. tenuifolia*. На поперечном срезе сосуды овальные, вытянутые в радиальном направлении или округлые (рис. 1).

Между проводящими пучками образуется паренхима радиальных сердцевинных лучей. Внутреннюю обкладку проводящих пучков создает угловая колленхима, состоящая из 3–5 слоев клеток у *S. parviflora* и 2–3 слоев клеток у *S. tenuifolia*.

Сердцевина представлена тонкостенными округлыми или овальными клетками со слегка извилистыми оболочками. С возрастом сердцевина разрушается, и стебель становится полым.

По нашим данным, у изученных видов в поперечном срезе лист дорзивентральный, листовая пластинка гипостоматическая, устьичный аппарат аномоцитного типа. Эпидерма представлена таблитчатыми клетками с толстыми внешними стенками, покрытыми кутикулой. Столбчатый мезофилл 1–2-рядный; губчатый мезофилл состоит из 3–5 рядов клеток (рис. 2).

Строение средней жилки у исследуемых видов может служить условным информативным признаком на межвидовом уровне, так как топография тканей одинакова.

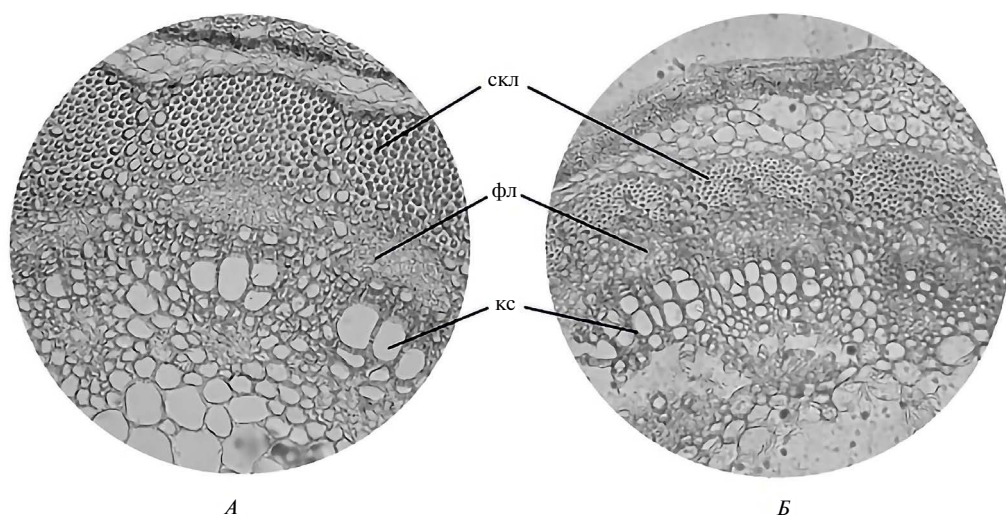


Рис. 1. Фрагмент поперечного среза стебля: А – *S. parviflora*; Б – *S. tenuifolia*. скл – склеренхима; фл – флоэма; кс – ксилема. Увел. 10×40

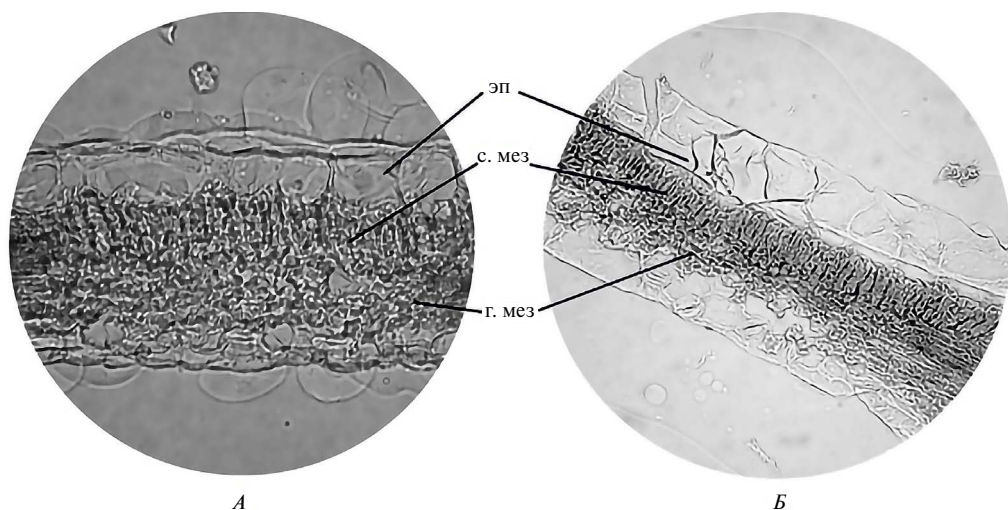


Рис. 2. Фрагмент поперечного среза через листовую пластинку: А – *S. parviflora*; Б – *S. tenuifolia*. эп – эпидерма; с. мез – столбчатый мезофилл; г. мез – губчатый мезофилл. Увел. 10×40

Под верхней эпидермой располагается 4–5-слойная склеренхима. Проводящий пучок закрытый, коллатеральный. Флоэма обращена к абаксиальной, а ксилема – к адаксиальной стороне листовой пластинки. Флоэма мелкоклеточная. Склеренхимная обкладка отсутствует. Пучок армирован колленхимой: она 3–4-слойная у *S. parviflora* и 2–4-слойная у *S. tenuifolia*. Под нижней эпидермой располагается однослойная склеренхима и 4–5-слойная крупноклеточная паренхима.

Нами установлено, что виды различаются лишь по ряду количественных признаков строения эпидермы (см. таблицу). Эпидермальные клетки *S. parviflora* и *S. tenuifolia* (рис. 3) на обеих сторонах листа сходны по форме и степени изогнутости антиклинальных стенок. Клетки верхней эпидермы у анализируемых видов округло-извилистой формы. Проекция площади эпидермальных клеток в плане эллиптическая

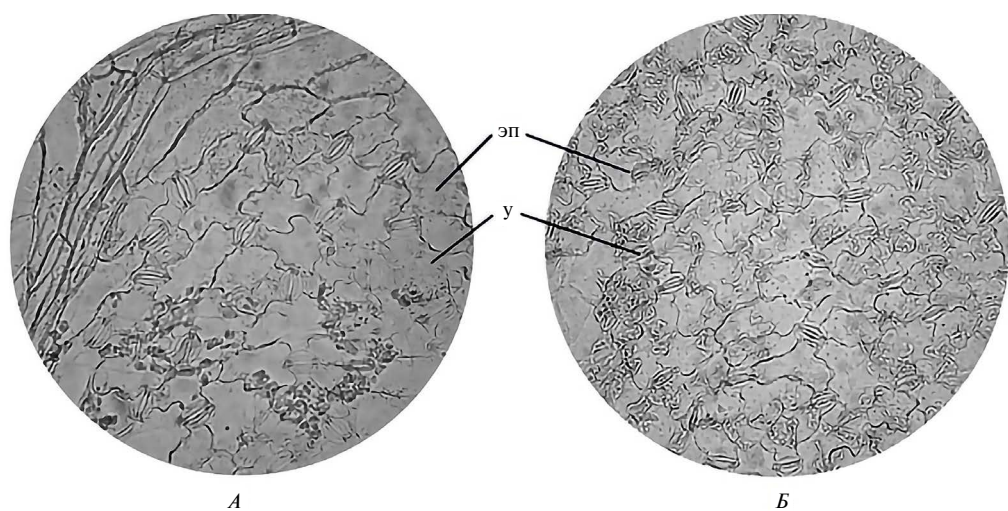


Рис. 3. Нижняя эпидерма листа: А – *S. parviflora*; Б – *S. tenuifolia*. эп – эпидермальные клетки; у – устьица. Увел. 10×40

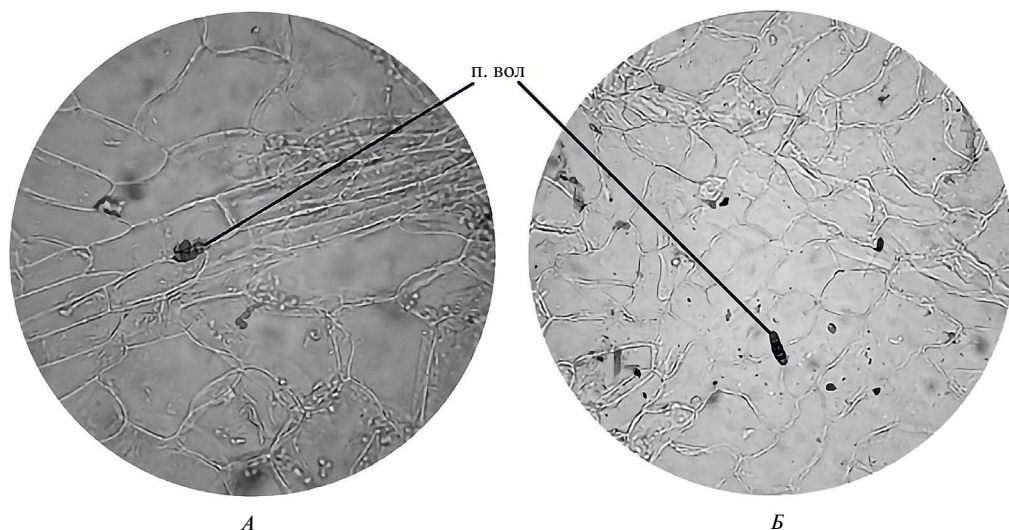


Рис. 4. Верхняя эпидерма листа: А – *S. parviflora*; Б – *S. tenuifolia*. п. вол – пельтатный волосок. Увел. 10×40

или распластанная. Углы в смежных границах закругленные и заостренные. В нижней эпидерме очертания эпидермальных клеток извилистые; проекция площади эпидермальных клеток в плане распластанная, углы в смежных границах закругленные и заостренные. Незначительные различия проявляются в размерах эпидермальных клеток и числе устьиц на 1 мм² листовой поверхности, тогда как показатели Y_u у исследуемых видов приблизительно равны (см. таблицу).

В верхней эпидерме у обоих видов встречаются пельтатные волоски, расположены группами по 2–8 клеток у *S. tenuifolia* и по 2–6 клеток у *S. parviflora* (рис. 4). Кроющие трихомы отсутствуют.

Заключение

Анатомические признаки стебля и листа могут быть использованы для диагностической характеристики видов рода *Sanguisorba*. В структуре стебля изучаемых видов диагностическим признаком является лишь число проводящих пучков на поперечном срезе. В строении листа таксономически значимых признаков нами не выявлено. Отсутствие у *S. parviflora* и *S. tenuifolia* информативных признаков позволяет авторам присоединиться к мнению тех систематиков, которые рассматривают *S. tenuifolia* как синоним *S. parviflora*. Условно информативными могут быть лишь количественные признаки: толщина листовой пластинки, длина клеток верхней эпидермы, число устьиц на 1 мм² листовой поверхности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Якубов В.В. Род *Sanguisorba* L. – Кровохлебка // Сосудистые растения советского Дальнего Востока: В 8 т. Т. 8. СПб.: Наука, 1996. 383 с.
2. Старченко В.М. Флора Амурской области и вопросы ее охраны: Дальний Восток России. М.: Наука, 2008. 228 с.
3. Акулов А.Н. Фенольные соединения культуры клеток кровохлебки лекарственной *Sanguisorba officinalis* L. // Химия растительного сырья. 2019. № 1. С. 241–250.

4. Попов И.В., Андреева И.Н., Гаврилин М.В. Определение танина в сырье и препаратах кровохлебки лекарственной методом ВЭЖХ // Химико-фармацевтический журнал. 2003. Т. 37. № 7. С. 24–26.
5. Снегирева К.Д. Количественное содержание дубильных веществ в лекарственном сырье кровохлебки лекарственной // Молодой исследователь: вызовы и перспективы: материалы CLXIX международной научно-практической конференции. М., 2020. Т. 22 (169). С. 155–157.
6. Казеева А.Р. Фармакогностическое изучение кровохлебки лекарственной (*Sanguisorba officinalis* L.) и перспективы ее использования в медицине / автореф. дис. ... канд. биол. наук. Самара, 2017. 25 с.
7. Мальцева Е.М., Егорова Н.О., Егорова И.Н., Зенина Н.А., Иванова О.А. Антимикробная активность сухого экстракта корневищ с корнями кровохлебки лекарственной // Пути и формы совершенствования фармацевтического образования. Актуальные вопросы разработки и исследования новых лекарственных средств: материалы 7-й Международной научно-методической конференции «Фармообразование-2018». Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2018. С. 508–512.
8. Сапарклычева С.Е., Чапалда Т.Л. Антимикробная активность кровохлебки лекарственной (*Sanguisorba officinalis* L.) // Аграрное образование и наука. 2020. № 2. С. 10.
9. Тюрин А.В. Биология цветения и опыления кровохлебки лекарственной // Научный лидер. 2023. Вып. 137. № 39. С. 32–39.
10. Казеева А.Р., Пупыкина К.А. Изучение морфолого-анатомических признаков корневищ с корнями и травы кровохлебки лекарственной // Вопросы обеспечения качества лекарственных средств. 2016. Вып. 11. № 1. С. 17–22.
11. Марчишин С.М., Серая Л.М., Островская Г.И., Кудря В.В. Исследование морфолого-анатомического строения травы кровохлебки лекарственной (*Sanguisorba officinalis* L.) // Украинский биофармацевтический журнал. 2015. Вып. 37. № 2. С. 85–89.
12. Струпан Е.А., Струпан О.А., Типсина Н.Н., Туманова А.Е. Анатомическое строение органов растения кровохлебки лекарственной (*Sanguisorba officinalis* L.) и локализация в них дубильных веществ // Вестник КрасГАУ. 2010. Вып. 50. № 11. С. 107–109.
13. Юзепчук С.В. Кровохлебка – *Sanguisorba* L. // Флора СССР: В 30 т. Т. 10. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1941. 673 с.
14. Lu L.-T., Crinan A. *Sanguisorba* Linnaeus // Flora of China: In 25 vols. Vol. 9. Beijing: Science Press, 2003. 496 p.
15. Выдрина С.Н. *Sanguisorba* L. – Кровохлебка // Флора Сибири: В 14 т. Т. 8. Rosaceae. Новосибирск: Наука (Сибирское отделение), 1988. 200 с.
16. Ворошилов В.Н. Определитель растений советского Дальнего Востока. М.: Наука, 1982. 672 с.
17. Лотова Л.И., Тимонин А.К. Сравнительная анатомия высших растений. М.: Изд-во Московского университета, 1989. 80 с.
18. Захаревич С.Ф. К методике описания эпидермиса листа // Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. 3. 1954. № 4. С. 65–75.
19. Баранова М.А. Классификация морфологических типов устьиц // Ботанический журнал. 1985. Т. 70. № 12. С. 1585–1595.

REFERENCES

1. Yakubov V.V. Genus *Sanguisorba* L. – Krovokhleбка. In: *Vascular plants of the Siberian Far East*: In 8 vols. Vol. 8. St. Petersburg: Nauka; 1996. 383 p. (In Russ.).
2. Starchenko V.M. Flora of the Amur region and issues of its protection: The Far East of Russia. Moscow: Nauka; 2008. 228 p. (In Russ.).
3. Akulov A.N. Phenolic compounds of blood phlebotomy cell culture of medicinal *Sanguisorba officinalis* L. *Chemistry of Plant Raw Materials*. 2019;(1):241–250. (In Russ.).
4. Popov I.V., Andreeva I.N., Gavrilin M.V. Determination of tannin in raw materials and preparations of medicinal hemophlebony by HPLC method. *Chemico-pharmaceutical Journal*. 2003;37(7):24–26. (In Russ.).

5. Snegireva K.D. Quantitative content of tannins in medicinal raw materials of medicinal hemophlebus. In: *Young researcher: challenges and prospects: materials of the CLXIX international scientific and practical conference*. Moscow; 2020. Vol. 22 (169). P. 155–157. (In Russ.).
6. Kazeeva A.R. Pharmacognostic study of medicinal hemophlebitis (*Sanguisorba officinalis* L.) and prospects for its use in medicine: abstract of the dissertation of the Candidate. Biol. Sciences. Samara; 2017. 25 p. (In Russ.).
7. Maltseva E.M., Egorova N.O., Egorova I.N., Zenina N.A., Ivanova O.A. Anti-microbial activity of dry rhizome extract with medicinal hemophlebus roots. In: *Ways and forms of improving pharmaceutical education. Topical issues of the development and research of new medicines: materials of the 7th International Scientific and Methodological Conference “Pharmaceutical Education-2018”*. Voronezh: Publishing House of the Voronezh State University; 2018. P. 508–512. (In Russ.).
8. Saparklycheva S.E., Chapalda T.L. Antimicrobial activity of medicinal hemophlebus (*Sanguisorba officinalis* L.). *Agrarian Education and Science*. 2020;(2):10. (In Russ.).
9. Tyurin A.V. Biology of flowering and pollination of medicinal hemophlebus. *Scientific Leader*. 2023;137(39):32–39. (In Russ.).
10. Kazeeva A.R., Pupykina K.A. The study of morphological and anatomical signs of rhizomes with roots and herbs of medicinal hemophlebus. *Issues of Quality Assurance of Medicinal Products*. 2016;11(1):17–22. (In Russ.).
11. Marchishin S.M., Seraya L.M., Ostrovskaya G.I., Kudrya V.V. Investigation of the morphological and anatomical structure of the herb hemophlebus officinalis (*Sanguisorba officinalis* L.). *Ukrainian Biopharmaceutical Journal*. 2015;37(2):85–89. (In Russ.).
12. Strupan E.A., Strupan O.A., Tipsina N.N., Tumanova A.E. Anatomical structure of organs of the medicinal hemophlebus plant (*Sanguisorba officinalis* L.) and localization of tannins in them. *Bulletin of KrasGAU*. 2010;50(11):107–109. (In Russ.).
13. Yuzepchuk S.V. Krovokhleбка – *Sanguisorba* L. In: *Flora of the USSR*: In 30 vols. Vol. 10. Moscow; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1941. 673 p. (In Russ.).
14. Lu L.-T., Crinan A. *Sanguisorba* Linnaeus. In: *Flora of China*: In 25 vols. Vol. 9. Beijing: Science Press; 2003. 496 p.
15. Vydrina S.N. *Sanguisorba* L. – Blood phlebotomy. In: *Flora of Siberia*: In 14 vols. Vol. 8. Rosaceae. Novosibirsk: Nauka (Siberian Branch); 1988. 200 p. (In Russ.).
16. Voroshilov V.N. Determinant of plants of the Soviet Far East. Moscow: Nauka; 1982. 672 p. (In Russ.).
17. Lotova L.I., Timonin A.K. Comparative anatomy of higher plants. Moscow: Publishing House of Moscow University; 1989. 80 p. (In Russ.).
18. Zakharevich S.F. On the method of describing the epidermis of a leaf. *Westn. Leningr. Un-ta. Series 3*. 1954;(4):65–75. (In Russ.).
19. Baranova M.A. Classification of morphological types of stomata. *Botanical Journal*. 1985;70(12):1585–1595. (In Russ.).

Научная статья

УДК 502.75:58.006

DOI: 10.31857/S0869769825030054

EDN: PMIKVZ

Флористические находки на особо охраняемой территории Ботанического сада-института ДВО РАН

В.С. Прокопенко (Волкотруб)✉, С.В. Нестерова

Вера Сергеевна Прокопенко (Волкотруб)

инженер-исследователь

Ботанический сад-институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

doc1287@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0009-3942-5093>

Светлана Владимировна Нестерова

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, доцент

Ботанический сад-институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

svnesterova@rambler.ru

<http://orcid.org/0000-0002-2532-0233>

Аннотация. В статье представлены результаты мониторинга флоры Ботанического сада-института ДВО РАН, в ходе которого было выявлено 25 видов сосудистых растений, ранее не отмечавшихся на его территории. Среди новых видов преобладают чужеродные (13) и апофиты (9). Три вида относятся к аборигенным, один из которых внесен в новый список растений «Красной книги Приморского края». Восемь видов в группе чужеродных относятся к инвазионным. Почти все они включены в «Черную книгу флоры Дальнего Востока» и представляют возможную угрозу природным сообществам Ботанического сада. С помощью анализа гербарных коллекций и полевых наблюдений были реконструированы вероятные пути заноса чужеродных видов.

Ключевые слова: флора, аборигенные виды, апофиты, чужеродные растения, ксенофиты, эргазифитофиты, особо охраняемая природная территория, ботанический сад, Приморский край

Для цитирования: Прокопенко (Волкотруб) В.С., Нестерова С.В. Флористические находки на особо охраняемой территории Ботанического сада-института ДВО РАН // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 3. С. 52–63. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030054>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме Ботанического сада-института ДВО РАН. Регистрационный номер 122040800085-4.

The floristic finds in the specially protected natural territory of the Botanical Garden-Institute, FEB RAS

V.S. Prokopenko (Volkotrub), S.V. Nesterova

Vera S. Prokopenko (Volkotrub)

Research Engineer

Botanical Garden-Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

doc1287@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0009-3942-5093>

Svetlana V. Nesterova

Candidate of Sciences in Biology, Senior Researcher, Associate Professor

Botanical Garden-Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

svnesterova@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2532-0233>

Abstract. The article presents the results of monitoring the flora of the Botanical Garden-Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (FEB RAS), during which 25 species of vascular plants previously not observed on its territory were identified. Among the new species, alien (13) and apophytes (9) prevail. Three species are native, one of which is included in the new list of plants in the “Red Book of Primorsky Krai”. In the group of alien species, eight species are invasive. Almost all of them are included in the “Black Book of Flora of the Far East” and pose a potential threat to the natural ecosystems of the Botanical Garden. By analyzing of herbarium collections and field observations, the likely pathways of introduction for the alien species were reconstructed.

Keywords: flora, native species, apophytes, alien plants, xenophytes, ergaziophygophytes, specially protected natural territory, Botanical Garden, Primorsky Territory

For citation: Prokopenko (Volkotrub) V.S., Nesterova S.V. The floristic finds in the specially protected natural territory of the Botanical Garden-Institute, FEB RAS. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(3):52–63. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030054>

Funding. The work was carried out within the framework of the state task of the BGI FEB RAS. No. 122040800085-4.

Введение

Ботанический сад-институт Дальневосточного отделения Российской академии наук (БСИ ДВО РАН), расположенный в черте г. Владивостока, был организован в 1949 г. Площадь сада 169,7 га, из них 155,4 га – это заповедный участок хорошо сохранившегося чернопихтово-широколиственного и широколиственного леса. Ботанический сад с 1995 г. имеет статус ООПТ (особо охраняемой природной территории). В результате инвентаризации флоры, анализа гербарного материала и опубликованных литературных данных был составлен список растений ООПТ БСИ ДВО РАН [1]. Список содержит 604 вида сосудистых растений: 535 аборигенных, 53 чужеродных (32 случайно занесенных, 21 вид декоративных растений,

ушедших из культуры) и 16 посаженных на лесной территории. В настоящее время на лесной территории БСИ ДВО РАН выявлены 25 видов растений, которые дополняют список флоры ООПТ.

Цель нашего исследования – проанализировать таксономический состав, географические, экологические, биологические особенности найденных видов; установить статус видов и причину их появления на территории Приморского края; выявить потенциально опасные для флоры Ботанического сада инвазионные виды.

Материалы и методы

Работа основана на гербарных сборах, сделанных авторами на территории ООПТ БСИ ДВО РАН в 2024 г., и наблюдениях с фотофиксацией растений. Оригинальные образцы хранятся в Гербарии БСИ (VBGI). Фотографии растений с географическими координатами в системе WGS 84 загружены на iNaturalist [2].

Для достижения цели исследования нами были проанализированы гербарные коллекции: Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН (VLA), Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН (LE), Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН (МНА), Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (MW), Ботанического сада-института ДВО РАН (VBGI), Тихоокеанского института биоорганической химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН (VLV), Государственного объединенного музея-заповедника истории Дальнего Востока им. В.К. Арсеньева (Vladimir K. Arseniev Museum of Far East History (AMFEN); электронные ресурсы Плантариум [3] и iNaturalist [2].

Названия семейств, родов, видов, написание авторов вида приводятся по сводке “Checklist of vascular plants of Asian Russia” [4].

Экологические особенности, распространение и статус видов (аборигенный и чужеродный) характеризуются согласно работам: «Сосудистые растения советского Дальнего Востока» [5], «Злаки России» [6], “Illustrated flora of the Primorsky Territory, Russian Far East” [7]. Дополнительные сведения получены через электронный ресурс “Plants of the World Online” [8].

При классификации видов использовали термины и понятия, предложенные О.Г. Барановой с соавторами [9], А.Н. Пузыревым [10], статус инвазионной активности – по монографии «Черная книга флоры Дальнего Востока» [11].

Результаты исследований и их обсуждение

Ниже приводим список видов, в котором все таксоны расположены в алфавитном порядке. Для каждого вида указан ID гербарного образца. В списке приняты следующие сокращения: ОСК – однолетник стержнекорневой, ДСК – двулетник стержнекорневой, ОКИК – однолетник кистекорневой, МКОКщ – многолетник короткорневищный, МДЛКщ – многолетник длиннокорневищный; КСФ – ксеофит, АПФ – апофит, ЭРФФ – эргазиофитофит.

Amaranthaceae – Амарантовые

Amaranthus retroflexus L. – Щирица запрокинутая. Чужеродный североамериканский вид. ОСК. КСФ. Внесен в «Черную книгу флоры Дальнего Востока» с инвазионным статусом «3» для Приморского края [11]. Впервые собран в Приморском крае – дер. Григорьевка (Михайловский р-н) – в 1888 г. Н.А. Пальчевским (LE). В окрестностях г. Владивостока был обнаружен в 1928 г. в долине р. Лянчихэ

(р. Богатая) М.Ф. Гришко (AMFEN), в 1931 г. на береговых валах морского залива близ ст. Океанской В. Петровым (MW0058264), в 1982 г. на железнодорожных путях ст. Санаторная Т.И. Нечаевой (МНА). На ООПТ БСИ ДВО РАН в 2024 г. несколько экземпляров найдены нами на обочине дороги (VBGI175149).

Asteraceae – Астровые

Arctium × *ambiguum* (Čelak.) Nyman – Лопух сомнительный. Чужеродный гибридогенный европейский вид (*A. lappa* L. × *A. tomentosum* Mill.). ДСК. КСФ. В Приморском крае впервые найден в 1979 г. на о-ве Попова Н.С. Пробатовой и В.П. Селедцом (VLA). В окрестностях г. Владивостока обнаружен в 1991 г. на железнодорожных путях ст. Океанской Т.И. Нечаевой (VLA). На ООПТ БСИ ДВО РАН был собран в 2022 г. и определен как *A. lappa* L. (VBGI144323) [1]. Повторно *A.* × *ambiguum* собран в 2024 г. (VBGI175151). По нашим наблюдениям, на обочине дороги образует заросли, проникая на лесную территорию.

Arctium tomentosum Mill. – Лопух паутинистый. Чужеродный западно-евразийский вид. ДСК. КСФ. Внесен в «Черную книгу флоры Дальнего Востока» с инвазионным статусом «2» для Приморского края [11]. Впервые собран в 1928 г. в Кировском р-не Приморского края И.В. Жировым (LE), во Владивостоке – в 1965 г. Д.П. Воробьевым (VLA). В ботаническом саду в 2019 г. на участке экспозиции отмечен И.Г. Богачевым¹, в 2023 г. на лесной территории А.П. Серегиным² и нами в 2024 г. у обочины дороги³.

Heliopsis scabra Dunal – Гелиопсис шероховатый. Чужеродный североамериканский вид. МДЛКШ. ЭРФФ. Внесен в «Черную книгу флоры Дальнего Востока» как *H. helianthoides* var. *scabra* (Dunal) Fern. с инвазионным статусом «4» для Приморского края, где широко культивируется. Уход из культуры отмечен с начала XXI в. [11]. Известно, что в ботаническом саду с 1948 г. начала создаваться коллекция растений открытого грунта [12], где, по данным Н.Н. Качура и В.П. Кузиной [13], проводились испытания *H. scabra* как перспективного декоративного растения для озеленения населенных пунктов, но точное время появления *H. scabra* в коллекции неизвестно. Как культивируемое растение в БСИ ДВО РАН отмечен Ю. Семейкиным в 2013 г.⁴ Первый гербарный образец одичавшего растения собран З.В. Кожевниковой в Надеждинском р-не у дороги в 2017 г. (VLA) и как *H. helianthoides* subsp. *scabra* T.R. Fisher приведен для флоры Приморского края [14]. На ООПТ БСИ ДВО РАН *H. scabra* впервые обнаружен в 2022 г., определен как *Helianthus tuberosus* L. (VBGI142848) и под этим названием приведен для флоры БСИ ДВО РАН [1]. Обследование местообитания *H. scabra* в 2024 г. (VBGI175138) показало, что популяция осталась без изменений.

Jacobaea litvinovii (Schischk.) Zuev – Якобея Литвинова. Аборигенный дальневосточный вид. МКОКШ. Растет на осоково-разнотравных лугах и в сырых лесах на юге Приморского края. Впервые на лесной территории ботанического сада несколько экземпляров найдены в 2024 г. на опушке хвойно-широколиственного леса (VBGI175152). Возможно, В.А. Недолужко встречал *J. litvinovii*, но принимал за *Senecio nemorensis* L., который приводил в списке видов для ООПТ БСИ ДВО РАН [12]. Подтверждающие гербарные образцы отсутствуют. Произрастание *S. nemorensis* на территории ООПТ сомнительно, так как этот вид распространен в северных районах Приморского края [15].

¹ Bogachev I.G. 2019. Наблюдение iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org/observations/29373417>

² Seregin A.P. 2023. Наблюдение iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org/observations/178670928>

³ Volkotrub V.S. 2024. Наблюдение iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org/observations/258705364>

⁴ Семейкин Ю. 2013. Изображение *Heliopsis helianthoides* ssp. *scabra* (Dun.) Fisch. // Плантариум. URL: <https://www.plantarium.ru/page/image/id/206861.html>

Senecio vulgaris L. – Крестовник обыкновенный. Чужеродный западно-евразийский вид. ОСК. КСФ. Внесен в «Черную книгу флоры Дальнего Востока» с инвазионным статусом «2» для Приморского края [11]. В Приморском крае впервые найден во Владивостоке Ф.М. Августинovichем, 1880 г. (LE), позднее Ю.Д. Гусевым и А.Л. Тахтаджаном на ст. Океанской в лесу, 1971 г. (LE). В БСИ ДВО РАН отмечен в 2012 г. без уточнения места произрастания Ю. Семейкиным⁵. Нами единичные экземпляры обнаружены в 2024 г. у лесной тропы (VBGI175153).

Sonchus asper (L.) Hill – Осот шероховатый. Чужеродный западноевразийско-североафриканский вид [16]. ОСК. КСФ. Мы сочли необходимым упомянуть все имеющиеся сборы, хранящиеся в гербариях, так как в некоторых последних источниках указывается, что *S. asper* является аборигенным видом для Приморского края [4, 8]. В Приморском крае впервые собран в окрестностях г. Владивостока в 1912 г. К.В. Тороповым (AMFEN). Позднее *S. asper* находили в посевах сельскохозяйственных культур, на огородах и у дорог: А.А. Булавкина, 1913 г. (LE); В.Л. Комаров, 1913 г. (LE); Миклашевская, 1919 г. (VLA); П.П. Жудова, К.А. Куркин, 1946 г. (MW0148779); Т.Г. Буч, В.Д. Швыдкая, 1976, 1981 гг. (VLA); Я.И. Леликов, 1978 г. (MHA0341291), 1995 г. (VLA); Р.И. Коркишко, 1984 г. (VLA). В конце XX в. был найден на морском побережье Приморского края Н.С. Пробатовой и В.П. Селедцом, 1979 г. (VLA); Р.И. Коркишко, 1984 г. (VLA); М.С. Игнатовым, 1985 г. (MHA0341292). На территории БСИ ДВО РАН впервые собран в 1994 г. Е.В. Зарембо (VLV). Нами зафиксирован в 2024 г. на коллекционном участке⁶ и один экземпляр найден у дороги (VBGI175154). Учитывая тот факт, что первые находки и большая часть гербарных образцов были собраны в нарушенных местообитаниях, и только в последней четверти XX в. *S. asper* обнаружен на морском побережье, мы согласны с мнением И.К. Шишкина [17], Т.И. Нечаевой [18], А.Е. Кожевникова с соавторами [7], что *S. asper* – это заносный вид во флоре Приморского края.

Caryophyllaceae – Гвоздичные

Sagina japonica (Sw. ex Steud.) Ohwi – Мшанка японская. Аборигенный дальневосточный вид. ОСК. АПФ. Растет на отмелях и песках морского берега, заносится на выгоны, довольно редко встречается на островах зал. Петра Великого (Японское море) [19]. На ООПТ ботанического сада несколько экземпляров найдены в 2024 г. на обочине дороги (VBGI175155).

Euphorbiaceae – Молочайные

Acalypha australis L. – Акалифа южная. Аборигенный дальневосточный вид. ОСК. АПФ. Растет на песчаных почвах, галечниках и как сорное растение на полях. На территории ботанического сада в 2024 г. обнаружены несколько экземпляров на обочине дороги (VBGI175156).

Fabaceae – Бобовые

Medicago lupulina L. – Люцерна хмелевидная. Чужеродный евразийско-североафриканский вид. ОСК. КСФ. Внесен в «Черную книгу флоры Дальнего Востока» с инвазионным статусом «2–3» для Приморского края [11]. Первый сбор был сделан на юге Приморского края в зал. Посыета Ф.Б. Шмидтом в 1861 г. (LE), во Владивостоке – в 1911 г. – у ст. Седанка А.А. Шошиным (LE). В 2024 г. отмечен в небольшом количестве на коллекционном участке ботанического сада⁷ и несколько экземпляров найдены на обочине дороги (VBGI175157).

⁵ Семейкин Ю. 2012. Изображение *Senecio vulgaris* L. // Плантариум.

URL: <https://www.plantarium.ru/page/image/id/155524.html>

⁶ Volkotrub V.S. 2024. Наблюдение iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org/observations/230911456>

⁷ Volkotrub V.S. 2024. Наблюдение iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org/observations/230908312>

Lamiaceae – Яснотковые

Perilla frutescens (L.) Britton – Перилла кустарниковидная. Чужеродный азиатский вид [20]. ОСК. ЭРФФ. Первый гербарный образец собран вблизи оз. Ханка в 1867 г. Н.М. Пржевальским (LE). Во Владивостоке (район Академгородок) как одичавшее растение отмечен Э.Г. Рудыкой в 1993 г. (VLA). В ботаническом саду в 50–60-х годах XX в. проводили испытания декоративных растений в открытом грунте и наряду с другими видами и сортами *P. frutescens* под названием *P. nankinensis* Hort., рекомендовали для массового размножения и озеленения населенных пунктов Приморского края [13]. По устному сообщению сотрудника БСИ ДВО РАН к.б.н. Н.А. Павлюк, с 1993 г. выращивается в саду как однолетник из семян, полученных из Праги (Чехия), размножается самосевом. В каталоге коллекционных объектов БСИ ДВО РАН приводится как *P. frutescens* (L.) Britt. var. *nankiensis* (ID14889) [21]. На территории БСИ ДВО РАН вид, без уточнения места произрастания, зафиксирован Ю. Семейкиным⁸ в 2012 г. Один экземпляр обнаружен нами в 2024 г. у северо-восточной границы ботанического сада на обочине дороги (VBGI175142).

Linderniaceae – Линдерниевые

Lindernia procumbens (Krock.) Borbas – Линдерния распростёртая. Аборигенный евразийский вид. ОКИК. АПФ. Обычно растёт на илстых отмелях. В 2024 г. группа из четырех растений найдена в сырой дорожной колее (VBGI175158).

Mazaceae – Мазусовые

Mazus pumilus (N.L. Burman) Steenis – Мазус крошечный. Аборигенный азиатский вид. ОКИК. АПФ. Растёт на сырых лугах, по берегам рек и ручьев, на пашнях. На территории ботанического сада впервые зафиксирован Ю. Семейкиным⁹ в 2012 г. Как сорное растение, в достаточном количестве отмечен нами на коллекционном участке в 2022 г.¹⁰ и на искусственном покрытии крыши лабораторного корпуса БСИ¹¹. Два экземпляра найдены в 2024 г. у канавы рядом с дорогой (VBGI175159).

Oxalidaceae – Кислициевые

Oxalis stricta L. – Кислица торчащая. Чужеродный североамериканский вид. МДЛКщ. КСФ. Внесен в «Черную книгу флоры Дальнего Востока» с инвазионным статусом «2» для Приморского края [11]. Первый известный нам гербарный образец собран во Владивостоке на горе Орлиное Гнездо в 1930 г. И.В. Поповым (LE). На ООПТ БСИ ДВО РАН впервые найден Морозовым в 1961 г. (VBGI134610) и отмечен в 2023 г.¹² В 2024 г. единичные экземпляры обнаружены у дороги (VBGI175160).

Plantaginaceae – Подорожниковые

Callitriche palustris L. – Болотник болотный. Аборигенный евразийско-североамериканский вид. ОСК. АПФ. Произрастает в пресных водоемах, на влажных местах у дорог и троп. На ООПТ БСИ ДВО РАН в 2024 г. группа растений найдена в сырой колее дороги (VBGI175146).

Veronica persica Poir. – Вероника персидская. Чужеродный малоазиатский вид. ОСК. КСФ. Впервые собран неизвестным коллектором во Владивостоке в 1922 г. (LE), позднее, там же, В.Л. Комаровым в 1935 г. (LE). Единичные экзем-

⁸ Семейкин Ю. 2012. Изображение *Perilla nankinensis* (Lour.) Decne. // Плантариум. URL: <https://www.plantarium.ru/page/image/id/153393.html>

⁹ Семейкин Ю. 2012. Изображение *Mazus pumilus* (Burm. f.) Steenis // Плантариум. URL: <https://www.plantarium.ru/page/image/id/151202.html>

¹⁰ Volkotrub V.S. 2022. Наблюдение iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org/observations/136016875>

¹¹ Волкотруб В.С. 2024. Изображение *Mazus pumilus* (Burm. f.) Steenis // Плантариум. URL: <https://www.plantarium.ru/page/image/id/813085.html>

¹² asya_splux. 2023. Наблюдение iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org/observations/182770133>

пляры обнаружены в 2024 г. на северо-восточной границе ООПТ БСИ ДВО РАН у дороги (VBGI175145).

Рoaceae – Мятликовые

Digitaria asiatica Tzvelev – Росичка азиатская. Аборигенный азиатский вид. ОКИК. АПФ. Растет на приречных галечниках, песках, у дорог [6]. В 2024 г. отмечен вдоль экологической тропы¹³ и в большом количестве на обочине дороги (VBGI175144).

Setaria pumila (Poir.) Roem. et Schult. – Щетинник низкий. Аборигенный евразийский вид. ОКИК. АПФ. Растет по берегам водоемов на песках и галечниках, на полях, у дорог, является злостным сорняком [6, 7]. В ботаническом саду зафиксирован в 2012 г. Ю. Семейкиным¹⁴. Впервые собран в 2024 г. у дороги (VBGI175143). По нашим наблюдениям с 2021 г., этот вид встречается в довольно большом количестве, что свидетельствует о его более раннем появлении на ООПТ.

Polygonaceae – Гречишные

Persicaria lapathifolia (L.) Gray – Горец развесистый. Аборигенный евразийско-североамериканский вид. ОСК. АПФ. Растет на болотистых лугах, песчано-галечниковых отмелях, в сыроватых лесах, часто как сорное растение [22]. Несколько экземпляров найдены в 2024 г. у дороги (VBGI175139).

Persicaria viscofera (Makino) H. Gross – Горец клейкий. Аборигенный дальневосточный вид. ОСК. АПФ. Растет на влажных местах в лесах, на приречных галечниках, у дорог, иногда на полях. Три экземпляра в 2024 г. найдены у дороги (VBGI175140).

Ranunculaceae – Лютиковые

Isopyrum manshuricum (Kom.) Kom. ex W.T. Wang et P.K. Hsiao – Равноплодник маньчжурский. Эфемероид. Аборигенный дальневосточный вид. МКОКШ. Растет в широколиственных и смешанных лесах. Внесен в список видов новой Красной книги Приморского края¹⁵. Гербарных сборов, с указанием на этикетках территории ботанического сада, нами не найдено. Однако имеются образцы из окрестностей ст. Океанской (20 верста) И.В. Попова, 1927 г. (LE); П.Г. Горового и В.Г. Сахно, 1965 г. (VLA); там же в чернопихтово-широколиственном лесу собран Д.П. Воробьевым, Т.И. Нечаевой, Р.С. Ивлиевой, 1971 г. (VLA). Впервые на ООПТ БСИ ДВО РАН в 2015 г. нами была обнаружена небольшая популяция *I. manshuricum* в чернопихтово-широколиственном лесу¹⁶.

Solanaceae – Пасленовые

Datura stramonium L. – Дурман обыкновенный. Чужеродный североамериканский вид. ОСК. ЭРФФ. В Приморском крае впервые собран в окрестностях с. Фроловка (Партизанский р-н) В.Н. Васильевым в 1926 г. (AMFEN). В 1974 г. во Владивостоке найден Т.И. Нечаевой на сорном месте у ст. Первая Речка (MHA0331067) и Д.П. Воробьевым на железнодорожных путях ТЭЦ (VLA). По устному сообщению сотрудника БСИ ДВО РАН к.б.н. Н.А. Павлюк, культивируется в ботаническом саду с 2003 г. и дает самосев. В 2024 г. отмечен нами на рудеральном экотопе¹⁷.

Datura tatula L. – Дурман фиолетовый. Чужеродный североамериканский вид. ОСК. ЭРФФ. Во Владивостоке найден на сорном месте у ст. Первая Речка Т.И. Нечаевой в 1974 г. (VLA). В коллекции БСИ ДВО РАН сада выращивается как де-

¹³ Volkotrub V.S. 2024. Наблюдение iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org/observations/238940978>

¹⁴ Семейкин Ю. 2012. Изображение *Setaria pumila* (Poir.) Roem. & Schult. // Плантариум. URL: <https://www.plantarium.ru/page/image/id/151103.html>

¹⁵ Постановление правительства Приморского края от 24.10.2022 № 723-пп «О видах растительного мира Приморского края».

¹⁶ Volkotrub V.S. 2015. Наблюдение iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org/observations/21865113>

¹⁷ Volkotrub V.S. 2024. Наблюдение iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org/observations/244627374>

коративное однолетнее растение¹⁸, размножается самосевом. Гербарный образец собран в 2024 г. в лесу на рудеральном экотопе (VBGI175148).

Solanum nigrum L. – Паслен черный. Чужеродный западноевразийско-североафриканский вид. ОСК. КСФ. Внесен в «Черную книгу флоры Дальнего Востока» с инвазионным статусом «2» для Приморского края [11]. В Приморском крае соби-рался со второй половины XIX в. в зал. Посыта К.И. Максимовичем, 1860 г. (LE) и Ф.Б. Шмидтом, 1861 г. (LE); во Владивостоке Ф.М. Августиновичем, 1880 г. (LE). В первой половине XX в. найден в бассейне р. Лянчхэ (р. Богатая) В.А. Траншелем, 1929 г. (LE). На ООПТ БСИ ДВО РАН вид был зафиксирован Ю. Семейкиным¹⁹ в 2010 г. и Г.В. Чулановой²⁰ в 2019 г. В достаточном количестве в 2021 г. отмечен нами на коллекционном участке²¹. Единичные экземпляры обнаружены у обочины дороги²² в 2024 г., и на экологической тропе (VBGI175147).

Violaceae – Фиалковые

Viola phalacrocarpa Maxim. – Фиалка лысолодная. Аборигенный дальневосточ-ный вид. МКОКщ. Растет на сухих каменистых склонах, в разреженных светлых лесах. В окрестностях ботанического сада (19 км), возможно на его территории, соби-рался Л.М. Борзовой в 1976 г. (VLA). На ООПТ БСИ ДВО РАН нами встречен и зафиксирован²³ в 2020 г.

При обследовании территории ботанического сада в 2024 г. были выявлены, ра-нее не указанные для флоры ООПТ, 25 видов травянистых растений, принадлежащих к 22 родам, 15 семействам. Наибольшее число видов (6) относится к семейству Asteraceae.

Три вида (*Isopyrum manshuricum*, *Jacobaea litvinovii*, *Viola phalacrocarpa*) обнару-жены в местах их естественного обитания – это аборигенные дальневосточные виды, коренные для лесной территории БСИ ДВО РАН и в целом для Приморского края.

Большая часть обнаруженных растений не является компонентами коренных лесов ООПТ БСИ ДВО РАН и появились в результате антропогенного воздействия – 22 вида. В их числе 9 апофитов – аборигенных видов, переселившихся из естествен-ных местообитаний в антропогенные экотопы, и 13 адвентивных (чужеродных). Среди адвентивных – 9 ксенофитов – непреднамеренно (случайно) занесенных чужеродных растений; 4 эргазиофитофита – чужеродные декоративные растения, культивируемые в ботаническом саду и «ушедшие из культуры». Большинство заносных растений имеет североамериканское и евразийское происхождение.

В жизненном спектре преобладают однолетние стержнекорневые и кистекорне-вые растения (18 видов), значительно меньшим числом видов и жизненных форм представлены двулетние (2 вида) и многолетние растения (2 вида).

Стержнекорневую форму имеют 14 однолетников (*Amaranthus retroflexus*, *Senecio vulgaris*, *Sonchus asper*, *Sagina japonica*, *Acalypha australis*, *Medicago lupulina*, *Perilla frutescens*, *Callitriche palustris* и др.), из которых ксенофитов – 6, апофитов – 5, эргазиофитофитов – 3; кистекорневую – 4 апофита (*Lindernia procumbens*, *Mazus pumilus*, *Digitaria asiatica*, *Setaria pumila*).

Двулетники *Arctium* × *ambiguum* и *A. tomentosum* – ксенофиты, имеют стержне-корневую форму; многолетники *Heliopsis scabra* (эргазиофитофит) и *Oxalis stricta* (ксенофит) – длиннокорневищную.

¹⁸ Volkotrub V.S. 2024. Наблюдение iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org/observations/234117602>

¹⁹ Семейкин Ю. 2011. Изображение *Solanum nigrum* L. // Плантариум. URL: <https://www.plantarium.ru/page/image/id/76891.html>

²⁰ Чуланова Г.В. 2020. Изображение *Solanum nigrum* L. // Плантариум. URL: <https://www.plantarium.ru/page/image/id/654210.html>

²¹ Dudka V. 2021. Наблюдение iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org/observations/100840341>

²² Volkotrub V.S. 2024. Наблюдение iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org/observations/235309802>

²³ Volkotrub V.S. 2020. Наблюдение iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org/observations/65987654>

Все апофиты характеризуются как стержнекорневые и кистекорневые растения, эргазиофитофиты как стержнекорневые и длиннокорневищные растения, в группе ксенофитов жизненная форма более разнообразна.

Апофиты – *Callitriche palustris*, *Lindernia procumbens*, *Mazus pumilus*, *Persicaria viscofera*, найденные вдоль дороги и на переувлажненных участках, относятся к видам лугово-пойменного флористического комплекса, *Sagina japonica* – лугово-литорального [7]. Данные растения в местах их естественного произрастания предпочитают песчано-галечниковые субстраты. На территории ботанического сада нет развитой гидрографической сети, где перечисленные виды могли бы произрастать в естественных для них условиях. *Acalypha australis*, *Digitaria asiatica*, *Persicaria lapatifolia*, *Setaria pumila* чаще проявляют себя как сорные растения, хотя также относятся к лугово-пойменному комплексу [7]. На ООПТ БСИ ДВО РАН в 2024 г. активно проводился ремонт дорожно-тропиночной сети, поэтому, вероятно, семена и плоды вышеперечисленных растений были непреднамеренно занесены с песком, щебнем и другими материалами.

Ксенофиты (9 видов) представлены растениями, занесенными на территорию Приморского края, расположенную за пределами границ их первичных ареалов, как из отдаленных, так и из контактных географических областей [10]. На ООПТ БСИ ДВО РАН обнаружены 6 ксенофитов, которые являются инвазионными [11]. Ксенофиты с высоким инвазионным статусом «2» – *Arctium tomentosum*, *Oxalis stricta*, *Senecio vulgaris*, *Solanum nigrum*, *Medicago lupulina* – потенциально опасные виды для ООПТ БСИ ДВО РАН. *Amaranthus retroflexus* – ксенофит с инвазионным статусом «3», на территории ботанического сада произрастает небольшими группами на песчано-галечных субстратах дорожно-тропиночной сети, внедрение в естественные сообщества не отмечено.

К категории потенциально опасных чужеродных видов мы также относим *Arctium × ambiguum*, гибридогенный европейский вид, не включенный в «Черную книгу флоры Дальнего Востока» [11]. Растение легко размножается семенами, цепкие плоды распространяются человеком и животными. В ботаническом саду образует заросли вдоль дорог и проникает на лесную территорию.

Sonchus asper и *Veronica persica* представлены единичными растениями и не относятся к видам, угрожающим естественным растительным сообществам.

Эргазиофитофиты имеют североамериканское и азиатское происхождение. Первый путь распространения таких видов через ботанические сады – выращивание растений и их «бегство» из культуры. Второй путь – активное самораспространение вдоль дорог, троп и по рудеральным экотопам. *Heliopsis scabra*, *Perilla frutescens*, *Datura stramonium*, *Datura tatula* как декоративные растения выращивались в ботаническом саду и были обнаружены за пределами коллекционного участка. Вероятно, семена попали в места, отведенные для сбора растительных остатков. *H. scabra* – потенциально опасный вид с инвазионным статусом «4». Это вегетативно подвижный длиннокорневищный травянистый многолетник, размножается вегетативно и семенами. По нашим наблюдениям, на ООПТ БСИ ДВО РАН в последние 2–3 года границы и численность популяции остаются стабильными.

Заключение

На особо охраняемой природной территории БСИ ДВО РАН обнаружены 25 новых, ранее неизвестных растений – 3 аборигенных дальневосточных вида, 9 апофитов и 13 чужеродных видов (9 ксенофитов, 4 эргазиофитофита). Появление

апофитов, ксенофитов, эргазиофитофитов связано с деятельностью человека и образованием обнаженных участков, что способствует распространению растений.

Среди находок преобладают стержнекорневые и кистекорневые малолетники – однолетние и двулетние (20 видов), меньше длиннокорневищных (2 вида) и коротко-корневищных (3 вида). Все найденные апофиты – однолетние растения. Обнаруженные ксенофиты – малолетники и длиннокорневищные, эргазиофитофиты – однолетники и длиннокорневищные, аборигены дальневосточной флоры – короткокорневищные.

На ООПТ БСИ ДВО РАН выявлено 8 потенциально опасных чужеродных видов, среди них – 7 инвазионных видов [11]. К категории потенциально опасных чужеродных видов мы отнесли также *Arctium × ambiguum*, не включенный в «Черную книгу флоры Дальнего Востока» [11]. Чужеродные растения представляют угрозу для фитобиоты ООПТ БСИ ДВО РАН. Необходимо регулярно проводить мониторинг, инвентаризацию заносных видов и мероприятия, препятствующие их распространению на лесной территории БСИ ДВО РАН.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Marchuk E.A., Nesterova S.V., Koldaeva M.N. et al. Flora of the protected nature territory of the Botanical Garden-Institute FEB RAS (Vladivostok, Russia) // *Botanica Pacifica*. 2022. Vol. 11. No. 2. P. 131–146. DOI: 10.17581/bp.2022.11220.
2. iNaturalist. 2025. URL: <https://www.inaturalist.org/> (date of application: January 27, 2025).
3. Плантариум. Растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн атлас и определитель растений. 2007–2025. URL: <https://www.plantarium.ru/> (дата обращения: 27.01.2025).
4. Chepinoga V.V., Barkalov V.Yu., Ebel A.L. et al. Checklist of vascular plants of Asian Russia // *Botanica Pacifica*. 2024. Vol. 13 (Special issue). P. 3–310. DOI: 10.17581/bp.2024.13S01.
5. Сосудистые растения советского Дальнего Востока. Т. 1–8 / отв. ред. С.С. Харкевич. Л.; СПб., 1985–1996.
6. Цвелёв Н.Н., Пробатова Н.С. Злаки России. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2019. 646 с.
7. Kozhevnikov A.E., Kozhevnikova Z.V., Kwak M., Lee B.Y. Illustrated flora of the Primorsky Territory (Russian Far East). Incheon: National Institute of Biogeochemical Resources, 2019. 1126 p.
8. POWO: Plants of the World Online. 2025. URL: <https://powo.science.kew.org> (date of application: January 25, 2025).
9. Баранова О.Г., Щербаков А.В., Сенатор С.А., Панасенко Н.Н., Сагалаев В.А., Саксонов С.В. Основные термины и понятия, используемые при изучении чужеродной и синантропной флоры // Фиторазнообразие Восточной Европы. 2018. Т. 12. № 4. С. 4–22. DOI: 10.24411/2072-8816-2018-1003.
10. Пузырев А.Н. О сущности термина «ксенофит» и его месте в системе чужеродных растений // Промышленная ботаника. 2024. Вып. 24. № 3. С. 88–94. DOI: 10.5281/zenodo.14113356.
11. Виноградова Ю.К., Антонова Л.А., Дарман Г.Ф. и др. Чёрная книга флоры Дальнего Востока: инвазионные виды растений в экосистемах Дальневосточного федерального округа. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2021. 510 с.
12. Недолужко В.А., Денисов Н.И., Храпко О.В. и др. Сосудистые растения Ботанического сада-института ДВО РАН: каталог. Владивосток: Дальнаука, 2001. 262 с.
13. Качура Н.Н., Кузина П.В. Декоративные растения для зеленого строительства в Приморье. Владивосток: Дальневосточное книжное издательство, 1965. 88 с.
14. Кожевникова З.В. Новые и редкие заносные виды сосудистых растений в Приморском крае // *Turczaninowia*. 2021. Т. 2. № 24. С. 186–201. DOI: 10.14258/turczaninowia.24.4.17.
15. Баркалов В.Ю. Сем. Астровые – *Asteraceae* Dumort. // Флора российского Дальнего Востока: дополнения и изменения к изданию «Сосудистые растения советского Дальнего Востока» Т. 1–8 (1985–1996) / отв. ред. А.Е. Кожевников, Н.С. Пробатова. Владивосток: Дальнаука, 2006. С. 236–266.

16. Hyatt P.E. *Sonchus asper* (L.) Hill. // Flora of North America. New York; Oxford, 2006. Vol. 19. P. 275. URL: http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=1&taxon_id=200024556 (date of application: April 1, 2025).
17. Шишкин И.К. Сорные растения южной части Дальневосточного края. Хабаровск: Дальгиз, 1936. 144 с.
18. Нечаева Т.И. Адвентивные растения Приморского края, Владивосток: ДВГУ, 1998. 264 с.
19. Нестерова С.В., Левенец И.Р., Раевская Е.Г. Новые находки сосудистых растений на супралиторали острова Попова (залив Петра Великого, Японское море) // Вестник ДВО РАН. 2020. № 3. С. 126–133. DOI: 10.37102/08697698.2020.211.3.013.
20. Flora of China / eds. Z.L. Wu, P.H. Raven, D.Y. Hong. Beijing; St. Louis, 1994. Vol. 17 (Lamiaceae). P. 241. URL: http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=200019964 (date of application: April 1, 2025).
21. Каталог коллекционных объектов БСИ ДВО РАН. 2025. URL: <https://botsad.ru/menu/visitors/collections-bgi-feb-ras/catalog> (дата обращения: 01.04.2025).
22. Цвелёв Н.Н. Сем. Гречиховые – Polygonaceae Juss. // Сосудистые растения советского Дальнего Востока. Л.: Наука, 1989. Т. 4. С. 25–122.

REFERENCES

1. Marchuk E.A., Nesterova S.V., Koldaeva M.N. et al. Flora of the protected nature territory of the Botanical Garden-Institute FEB RAS (Vladivostok, Russia). *Botanica Pacifica*. 2022;11(2):131–146. DOI: 10.17581/bp.2022.11220.
2. iNaturalist. 2025. URL: <https://www.inaturalist.org/> (date of application: January 27, 2025).
3. Plantarium. Plants and lichens of Russia and neighboring countries: open online galleries and plant identification guide. 2007–2025. URL: <https://www.plantarium.ru/lang/en.html> (date of application: January 27, 2025).
4. Chepinoga V.V., Barkalov V.Yu., Ebel A.L. et al. Checklist of vascular plants of Asian Russia. *Botanica Pacifica*. 2024;13(Special issue):3–310. DOI: 10.17581/bp.2024.13S01.
5. Kharkevich S.S. (Ed.). *Sosudistye rasteniya sovetskogo Dal'nego Vostoka* = [Vascular plants of the Soviet Far East. Vol. 1–8]. Leningrad; Saint Petersburg; 1985–1996. (In Russ.).
6. Tsvelev N.N., Probatova N.S. *Grasses of Russia*. Moscow: KMK Scientific Press; 2019. 646 s. (In Russ.).
7. Kozhevnikov A.E., Kozhevnikova Z.V., Kwak M., Lee B.Y. *Illustrated flora of the Primorsky Territory (Russian Far East)*. Incheon: National Institute of Biological Resources; 2019. 1126 p.
8. POWO: Plants of the World Online. 2025. URL: <https://powo.science.kew.org> (date of application: January 25, 2025).
9. Baranova O.G., Shcherbakov A.V., Senator S.A., Panasenko N.N., Sagalaev V.A., Saksonov S.V. The main terms and concepts used in the study of alien and synanthropic flora. *Phytodiversity of Eastern Europe*. 2018;12(4):4–22. (In Russ.). DOI: 10.24411/2072-8816-2018-1003.
10. Puzyrev A.N. The essence of the term “xenophyte” and its place in the system of alien plants. *Industrial Botany*. 2024;24(3):88–94. (In Russ.). DOI: 10.5281/zenodo.14113356.
11. Vinogradova Yu.K., Antonova L.A., Chernyagina O.A. et al. *Black Book of Flora of the Far East: Invasive plants species in ecosystems of the Far Eastern Federal District*. Moscow: KMK Scientific Press; 2021. 510 s. (In Russ.).
12. Nedoluzhko, V.A., Denisov N.I., Khrapko O.V., Mironova L.N. et al. *Vascular plants of the Botanical Garden-Institute: Catalogue*. Vladivostok: Dal'nauka; 2001. 262 s. (In Russ.).
13. Kachura N.N., Kuzina P.V. *Dekorativnye rasteniya dlya zelenogo stroitel'stva v Primor'e* = [Ornamental plants for green construction in Primorye]. Vladivostok: Far Eastern Book Publishing House; 1965. 88 s. (In Russ.).
14. Kozhevnikova Z.V. New and rare alien species of vascular plants in the Primorye Territory. *Turczaninowia*. 2021;2(24):186–201. (In Russ.). DOI: 10.14258/turczaninowia.24.4.17.

15. Barkalov V.Yu. Sem. Asteraceae Dumort. In: Flora of the Russian Far East: Addenda and corrigenda to "Vascular plants of the Soviet Far East". Vol. 1–8 (1985–1996). Vladivostok: Dal'nauka; 2006. P. 236–266. (In Russ.).
16. Hyatt P.E. *Sonchus asper* (L.) Hill. In.: Flora of North America. New York; Oxford. 2006;19:275. URL: http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=1&taxon_id=200024556 (date of application: April 1, 2025).
17. Shishkin I.K. Sornye rasteniya yuzhnoi chasti Dal'nevostochnogo kraya = [Weeds of the southern part of the Far Eastern Territory]. Khabarovsk: Dal'giz; 1936. 144 s. (In Russ.).
18. Nechaeva T.I. Adventivnye rasteniya Primorskogo kraya = [Adventive plants of Primorsky Territory]. Vladivostok: FESU; 1998. 264 s. (In Russ.).
19. Nesterova S.V., Levenets I.R., Raevskaya E.G. New findings of vascular plants on the Popov Island supralittoral (Peter the Great Bay, Sea of Japan). *Vestnik of the FEB RAS*. 2020;(3):126–133. (In Russ.). DOI: 10.37102/08697698.2020.211.3.013.
20. Wu Z.L., Raven P.H., Hong D.Y. (Eds.). Flora of China. Beijing: St. Louis; 1994. Vol. 17 (Lamiaceae). P. 241. URL: http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=200019964 (date of application: April 1, 2025).
21. Catalogue of collection objects of the BSI FEB RAS. 2025. URL: <https://botsad.ru/menu/visitors/collections-bgi-feb-ras/catalog> (date of application: April 1, 2025).
22. Tsvelev N.N. Sem. Polygonaceae Juss. In: Vascular plants of the Soviet Far East. Vol. 4. Leningrad: Nauka; 1989. P. 25–122. (In Russ.).

Научная статья

УДК 633.16:631.527(571.63)

DOI: 10.31857/S0869769825030063

EDN: PMKUCS

Оценка сортов ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) различного эколого-географического происхождения на продуктивность в условиях Приморского края

А.Г. Клыков, Г.А. Муругова✉, О.Г. Архипова

Алексей Григорьевич Клыков

академик РАН, доктор биологических наук

Федеральный научный центр агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки,

Уссурийск, пос. Тимирязевский, Россия

alex.klykov@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-2390-3486>

Галина Александровна Муругова

кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник

Федеральный научный центр агробиотехнологий Дальнего Востока

им. А.К. Чайки, Уссурийск, пос. Тимирязевский, Россия

gal.murugova@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0003-4203-851X>

Оксана Григорьевна Архипова

младший научный сотрудник

Федеральный научный центр агробиотехнологий Дальнего Востока

им. А.К. Чайки, Уссурийск, пос. Тимирязевский, Россия

arkhipova.og@dvfu.ru

<http://orcid.org/0009-0005-9772-9045>

Аннотация. Проведена оценка сортообразцов ярового ячменя различного эколого-географического происхождения в условиях муссонного климата Приморского края. Объектами исследования являлись 94 образца коллекции ВИР им. Н.И. Вавилова: России, стран Европы (Германия, Франция, Великобритания, Латвия, Чехия, Швеция, Нидерланды, Дания), Северной Америки (США, Мексика) и стран СНГ (Республика Беларусь, Украина, Казахстан). Опыты проведены в 2022–2024 гг. в лаборатории селекции зерновых и крупяных культур ФГБНУ «ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки». В результате исследований выделены сорта с ценными хозяйственными признаками (продуктивная кустистость, длина колоса, число зерен в колосе, масса зерна с колоса и растения) для практической селекции: Одон (Россия), Марни (Германия), Филадельфия (Германия), Ача (Россия), Хупаду (Германия), РЖТ Планет (Франция), Альф (Дания), Вакула (Россия), Крешендо (Германия). Изученные сорта ячменя характеризовались

широким диапазоном изменчивости (b_1), высокой пластичностью и стабильностью обладали сорта Одон (Россия) и Альф (Дания). Анализ устойчивости растений ячменя к основным заболеваниям (сетчатая пятнистость, темно-бурая пятнистость листьев, полосатый гельминтоспориоз и септориоз) в полевых условиях на естественном инфекционном фоне позволили выявить сорта умеренно устойчивые (поражение не превышает 15%) – Крешендо (Германия) и Альф (Дания).

Ключевые слова: яровой ячмень, коллекция, хозяйственно ценные признаки, сетчатый гельминтоспориоз листьев, продуктивность

Для цитирования: Клыков А.Г., Муругова Г.А., Архипова О.Г. Оценка сортов ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) различного эколого-географического происхождения на продуктивность в условиях Приморского края // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 3. С. 64–75.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030063>

Original article

Evaluating specimens of spring barley varieties (*Hordeum vulgare* L.) of various ecological and geographical origin under the conditions of Primorsky Krai

A.G. Klykov, G.A. Murugova, O.G. Arkhipova

Aleksei G. Klykov

Academician of RAS, Doctor of Sciences in Biology
Federal Scientific Center of Agrobiotechnology in the Far East named after A.K. Chaika,
Ussuriysk, Timiryazevsky stl., Russia
alex.klykov@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-2390-3486>

Galina A. Murugova

Candidate of Sciences in Agriculture, Leading Researcher
Federal Scientific Center of Agrobiotechnology in the Far East named after A.K. Chaika,
Ussuriysk, Timiryazevsky stl., Russia
gal.murugova@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0003-4203-851X>

Oksana G. Arkhipova

Junior Researcher
Federal Scientific Center of Agrobiotechnology in the Far East named after A.K. Chaika,
Ussuriysk, Timiryazevsky stl., Russia
arkhipova.og@dvfu.ru
<http://orcid.org/0009-0005-9772-9045>

Abstract. The paper evaluates spring barley specimens of various origin under the conditions of the monsoon climate of Primorsky Krai. The following ninety-four specimens from four different geographical groups (the VIR collection) were used as the research object: Russia, Europe (Germany, France, the United Kingdom, Latvia, Czechia, Sweden, the Netherlands, and Denmark), the North America (the USA, Mexico), and the CIS (Belarus, Ukraine, and Kazakhstan). The experiments were carried out by the Laboratory of the Breeding of Grain and Cereal Crops. The research was conducted at FSBSI “Federal Scientific Center of Agrobiotechnology in the Far East named after A.K. Chaika” in 2022–2024. As a result of the research, varieties with valuable economic characteristics (productive bushiness, earlength,

number of grains per ear, weight of grains per ear and plant) have been identified for practical breeding: Odon (Russia), Marni (Germany), Philadelphia (Germany), Acha (Russia), Xunadu (Germany), RVT Planets (France), Alf (Denmark), Vakula (Russia), Crescendo (Germany). A wide range of variability, Odon (Russia), characterized the studied barley varieties and Alf (Denmark) varieties had high plasticity and stability. Analysis of the resistance of barley plants to the main diseases (reticulated spotting, dark brown leaf spotting, striped helminthosporiosis and septoria) in the field against a natural infectious background revealed moderately resistant varieties (damage does not exceed 15%) – Crescendo (Germany) and Alf (Denmark).

Keywords: spring barley, collection, economically important traits, net blotch, productivity

For citation: Klykov A.G., Murugova G.A., Arkhipova O.G. Evaluating specimens of spring barley varieties (*Hordeum vulgare* L.) of various ecological and geographical origin under the conditions of Primorsky Krai. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(3):64–75. (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030063>

Введение

Зерновым культурам принадлежит ведущее место в производстве растениеводческой продукции, как в мировом, так и в российском земледелии. Значимость растений этой группы определяется высокими качествами зерна для производства продуктов питания [1].

Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) является важной сельскохозяйственной культурой, имеющей широкое применение в разных отраслях народного хозяйства (пищевой, пивоваренной и кормовой промышленности). Ареал его распространения обусловлен многими ценными качествами, а также приспособленностью к различным почвенно-климатическим условиям [2, 3]. За последние 50 лет урожайность ячменя и других сельскохозяйственных культур возросла в два раза и более. В этом определяющую роль, несомненно, сыграла селекция. Во многих странах мира вклад сорта в обеспечение урожайности культур стал составлять свыше 50% [4].

Климатические условия Дальнего Востока характеризуются муссонным климатом с высокой влажностью воздуха, частыми туманами, способствующими усилению развитию болезней, снижению качества и урожайности зерна сельскохозяйственных культур [5].

Селекция к неблагоприятным факторам среды предполагает наличие экологически пластичного исходного материала, поэтому необходима его комплексная оценка, чтобы получить более полную информацию реакции сортов на условия внешней среды [6]. В связи с этим в селекции ячменя первоочередной задачей является изучение мировой коллекции ВИР им. И.Н. Вавилова с целью выделения новых ценных источников с селекционно-хозяйственными признаками, способных обеспечивать высокую и устойчивую урожайность в стрессовых условиях произрастания [7–9]. Для Приморского края при создании конкурентоспособных сортов необходимо располагать генетически разнообразным исходным материалом, а при оценке селекционного материала на адаптивность следует учитывать параметры экологической пластичности и стабильности [8]. Результаты применения статистических методов свидетельствуют о широких возможностях их использования в селекции, что повышает эффективность работы на конечном этапе и способствуют оценке и отбору [3, 10, 11].

Цель исследования – изучить и выделить образцы ярового ячменя из коллекции ВИР по основным хозяйственно ценным признакам для использования в гибридизации при создании новых сортов, адаптированных к условиям Приморского края.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены в лаборатории селекции зерновых и крупяных культур ФГБНУ «ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки» в 2022–2024 гг. Полевые опыты производились в Уссурийском районе Приморского края в окрестностях пос. Тимирязевский, на выровненных по рельефу участках. Почвы лугово-бурые отбеленные. Пахотный слой почвы 22–24 см со сравнительно высоким уровнем плодородия. Почвы лугово-бурые оподзоленные, с содержанием гумуса 2,5–4,4%; P_2O_5 – 16,4–23,6 мг/100 г, K_2O – 10,4–19,2 мг/100 г почвы, рН солевой вытяжки – 5,8–6,2. Коллекционный питомник размещался по зяблевой вспашке, минеральные удобрения вносились из расчета $N_{20}P_{40}K_{40}$. Агрохимические показатели почвы определялись по ГОСТу 28168-89 в лаборатории агрохимических анализов ФГБНУ «ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки».

Объектом исследования являлись 94 образца коллекции ВИР им. И.Н. Вавилова (г. Санкт-Петербург) разного эколого-географического происхождения: Россия – 36 шт.; страны Европы (Германия, Франция, Великобритания, Латвия, Чехия, Швеция, Нидерланды, Дания) – 30 шт.; Северной Америки (США, Мексика) – 19 шт.; страны СНГ (Республика Беларусь, Украина, Казахстан) – 9 шт. В качестве стандарта взят лучший районированный сорт Восточный. Структуру урожая оценивали по 25 растениям.

Все испытания проводились в полевых условиях на естественном инфекционном фоне. Устойчивость растений ячменя к сетчатому гельминтоспориозу определяли по 4-балльной шкале по методике О.С. Афанасенко¹. Тип поражения обозначали по международной шкале: R – устойчивый – 0–1%, TR – высокоустойчивый – 1–10%, MR – умеренно устойчивый – 10–15%, MS – умеренно восприимчивый – 15–25%, MSS – умеренно восприимчивый, близок к восприимчивому – 25–50%, S – восприимчивый – 50–100%. Учеты болезней ячменя проводили в фазу колошения – молочной спелости. Наблюдения и фенологические учеты проводились по методике ВИР².

Пластичность сортов (b_i) и их стабильность (S^2d_i) определяли согласно математической модели S.A. Eberhart, W.A. Russell в изложении В.А. Зыкина³, коэффициент вариации (V) – по методике Б.А. Доспехова⁴, стрессоустойчивость ($Y_{\min} - Y_{\max}$) сортов – по методике А.А. Rossielle, J. Hamblin в изложении А.А. Гончаренко [12].

Коэффициент экологической пластичности (b_i), показывающий отзывчивость сортов на изменение условий выращивания, принимает значение больше, меньше или равное единице. Если $b_i \geq 1$, сорт обладает большей отзывчивостью, $b_i \leq 1$ – реагирует слабее на изменения условий среды, при $b_i = 1$ имеется соответствие изменений урожайности изменению условий выращивания. Неотъемлемым свойством адаптивности является стабильность (S^2d_i) – устойчивость к лимитирующим факторам среды, способность давать не очень высокий, но стабильный урожай в любых условиях выращивания. Чем меньше отклонение, тем стабильнее сорт.

Метеорологические условия за годы исследования (2022–2024 гг.) в вегетационный период ярового ячменя различались по температурному режиму и осадкам,

¹ Методические указания по диагностике и методам полевой оценки устойчивости ячменя к возбудителям пятнистостей листьев / сост. О.С. Афанасенко; ВАСХНИЛ, ВИЗР. Л.; Пушкин, 1987. 20 с.

² Методические указания по изучению и сохранению мировой коллекции ячменя и овса / сост. И.Г. Лоскутов, О.Н. Ковалева, Е.В. Блинова; ВИР. Л., 2012. 63 с.

³ Методики расчета экологической пластичности сельскохозяйственных растений по дисциплине «Экологическая генетика» / сост. В.А. Зыкин, И.А. Белан, В.С. Юсов, С.П. Корнева. Омск, 2008. 35 с.

⁴ Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2014. 351 с.

что позволило оценить и выделить сорта с высокой продуктивностью и устойчивостью к стрессовым факторам (рис. 1). Гидротермический коэффициент (ГТК) рассчитывали по методике Г.Т. Селянинова⁵ на основе данных агрометеостанции пос. Тимирязевский. Многолетние значения гидротермического коэффициента вегетационного периода зерновых культур в условиях Приморского края находятся в пределах значения 1,8. Значение ГТК по Г.Т. Селянину соответствует: 0,4 – сухо; 0,4–0,7 – очень засушливо; 0,7–1,0 – засушливо; 1,0–1,5 – влажно; более 1,5 – избыточно влажно.

Метеорологические условия в фазу созревания (июль) в 2023 г. (ГТК-2,3) и 2024 г. (ГТК-2,2) характеризовались как избыточно влажные, в результате было отмечено переувлажнение почвы, что способствовало поражению грибными заболеваниями (см. рис. 1). В целом с мая по июль сумма осадков в сравнении со среднемноголетними значениями превышала на 31,7–62,9 мм за месяц. Условия для появления всходов и начала вегетации (фаза кушения) сложились относительно благоприятными в 2022 г. (ГТК-1,3) и 2023 г. (ГТК-0,8). В период кушения–колошения (июнь) гидротермический коэффициент составил от 2,2 (2022 г.) до 3,4 (2023 г.), что повлияло на формирование продуктивного колоса.

Таким образом, изучение сортов ярового ячменя в различные по метеорологическим условиям годы позволило получить информацию об адаптивности к переувлажнению, особенно во вторую половину вегетации.

Результаты исследований

Успешность селекции в создании новых перспективных сортов во многом зависит от правильно подобранного исходного материала для исследований. Комплексная оценка по показателям пластичности и стабильности сортов позволяет выделить среди изучаемого сортимента наиболее перспективные, потенциально высокоурожайные и экологически пластичные формы растений, адаптированные к широкому диапазону условий окружающей среды [13, 14].

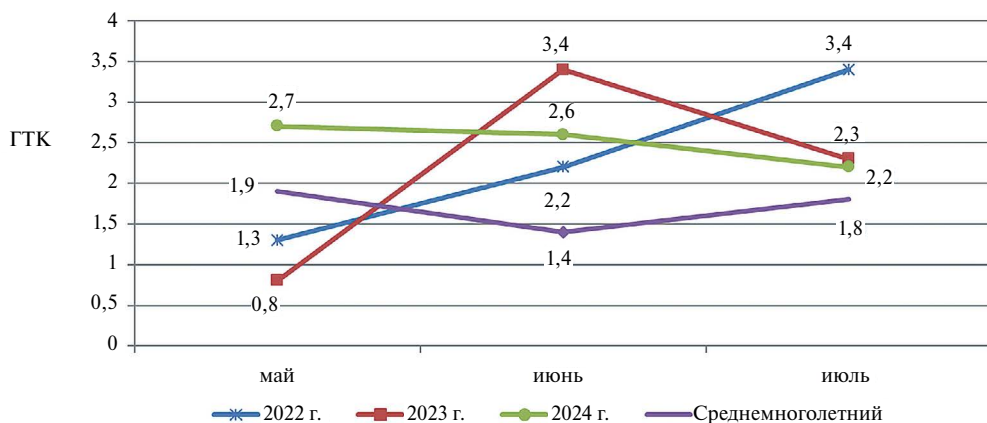


Рис. 1. Гидротермический коэффициент в годы проведения исследований (по данным агрометеостанции пос. Тимирязевский)

⁵ Селянинов Г.Т. Происхождение и динамика засух // Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай. Л.: Гидрометеиздат, 1958. С. 5–31.

Состав изученной мировой коллекции ВИР был представлен 14 странами мира (в %): Россия – 28,7, Германия – 22,3, Белоруссия – 8,5, Франция – 7,5, Украина – 6,4, Казахстан – 5,4, Латвия – 4,3, Великобритания – 4,3, Чехия – 4,3, США – 3,2, Дания – 2,1, Нидерланды – 1, Мексика – 1, Швеция – 1 (рис. 2).

Продуктивность сортов определялась отдельными элементами ее структуры. В среднем за годы исследований высокой продуктивностью и другими ценными признаками в условиях нашего региона возделывания, такими как продуктивная кустистость, высота растения, длина колоса, число зерен в колосе, масса зерна с колоса, выделились 17 образцов, в основном: из Германии – 5, России – 5, Франции – 2, Дании – 2 и Великобритании – 1 (табл. 1).

Так, по продуктивной кустистости выделены четыре сорта: Одон и Ача – 6,7 шт., Марни – 6,6 шт., Филадельфия – 5,8 шт.; по длине колоса (более 10 см) – Жозефин, Филадельфия, Ача, Марни, Одиссей, Крешендо; по числу зерен в колосе многорядные сорта (более 30 шт.) – Альф, Казак, Вакула; по высоте растения (низкорослые и устойчивые к полеганию) – Хунату – 70,3 см и РЖТ Планет – 72,6 см.

Об адаптивности сортов к условиям среды в первую очередь судят по пластичности и стабильности их урожайности как важнейшего количественного признака. Оценка образцов по параметрам стабильности и пластичности возможна путем изучения их в резко контрастных условиях среды в течение нескольких лет, что особенно важно в условиях Приморского края, где в период вегетации частые изменения погоды ограничивают реализацию потенциальной продуктивности сортов, а растения в значительной степени подвержены воздействию неблагоприятных условий вегетации, на что указывает широкий диапазон варьирования как продуктивности, так и других количественных признаков по годам [5, 8].

Анализ адаптивных свойств коллекционных сортов ярового ячменя показал значительное варьирование по массе зерна с растения в пределах 4,9–6,9 г, коэффициент изменчивости (b_i) составил 0,4–1,7 (табл. 2). К пластичным ($b_i > 1$), относят сорта интенсивного типа, хорошо реагирующие на высокий агрофон, которые максимально реализуют свой генетический потенциал в благоприятных агрометеорологических условиях и при высоком уровне культуры земледелия, они значительно снижают урожайность в неблагоприятных условиях. К этой группе относятся: Восточный – $b_i = 1,2$, Ача – $b_i = 1,1$, Жозефин – $b_i = 1,3$, Филадельфия – $b_i = 1,4$, Хунату – $b_i = 1,7$, Delphine – $b_i = 1,6$, РЖТ Планет – $b_i = 1,5$, Шармей – $b_i = 1,7$.

Сорта, коэффициент пластичности которых значительно ниже единицы ($b_i < 1$), относятся к нейтральному типу (широкоадаптивные), как правило, они стабильны

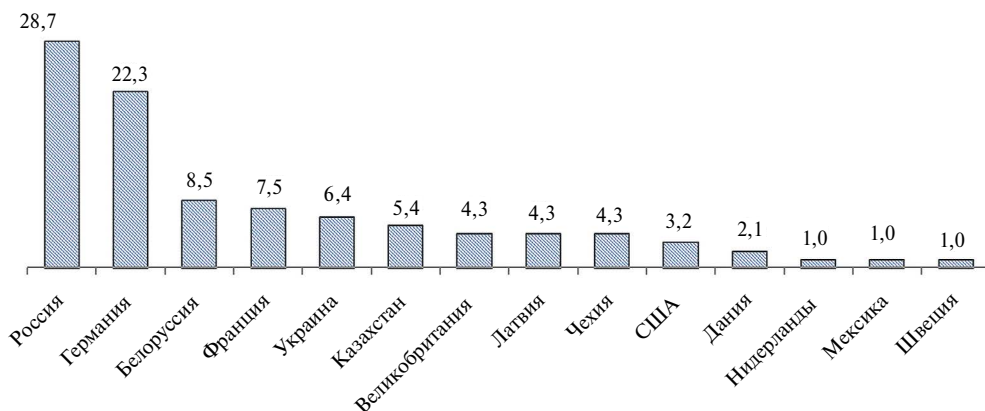


Рис. 2. Распределение коллекционных сортов ярового ячменя по странам

**Характеристика сортов – источников ярового ячменя различного происхождения
по основным хозяйственно ценным признакам**

Сорт	Происхождение	Продуктивная кустистость, шт.	Высота растения, см	Длина колоса, см	Число зерен в колосе, шт.	Масса зерна с 1 колоса, г
Восточный, st.	Россия	4,0	89,6	8,3	24,3	1,5
Велес	Россия	4,1	72,3	10,7	25,4	1,3
Вакула*	Россия	4,0	71,2	7,7	41,2	1,9
Кредо	Россия	5,1	79,7	8,8	26,0	1,3
Одон	Россия	6,7	89,6	9,3	25,3	1,2
Ача	Россия	6,7	80,0	10,0	24,5	1,1
Казак*	Украина	4,2	81,4	9,0	31,3	1,4
Жозефин	Германия	5,6	77,6	10,9	25,2	1,2
Крешендо	Германия	4,4	79,2	11,1	28,4	1,2
Филадельфия	Германия	5,8	86,8	10,4	25,1	1,1
Марни	Германия	6,6	82,6	10,1	25,3	1,3
Xunadu	Германия	5,6	70,3	9,4	25,2	1,1
Delphine	Франция	5,1	76,4	8,8	27,8	1,4
РЖТ Планет	Франция	4,9	72,6	9,9	25,6	1,2
Шармей	Дания	5,7	80,6	9,8	26,3	1,4
Альф*	Дания	3,8	76,3	6,8	42,4	1,8
Одиссей	Великобритания	4,2	72,4	10,6	25,1	1,2
НСР _{0,95}	—	0,3	5,7	0,7	2,0	0,1

*Многорядный яровой ячмень.

по продуктивности. При неблагоприятных условиях у них меньше снижаются показатели продуктивности в сравнении с сортами экологически пластичными (интенсивного типа), такие сорта лучше использовать на экстенсивном фоне, где они дадут максимум отдачи при минимуме затрат [6]. К таким сортам относятся: Вакула ($b_i = 0,8$), Кредо ($b_i = 0,4$), Велес ($b_i = 0,6$), Крешендо ($b_i = 0,9$), Одиссей ($b_i = 0,9$).

Величина стабильности сорта (S^2d_i) показывает степень изменчивости количественного признака, рассчитанного на основе средней урожайности и индекса среды. Чем меньше показатель, тем стабильнее сорт, дисперсия (S^2d_i) стремится к нулю [15]. Самую высокую стабильность имели сорта Вакула, Кредо, Одон ($S^2d_i = 0,1$), Восточный и Альф ($S^2d_i = 0,9$ и $0,8$ соответственно).

Общепринятым критерием адаптивного потенциала сорта считается уровень его средней продуктивности в различных условиях среды. Преимущество следует

Параметры адаптивных свойств сортов ярового ячменя по массе зерна с растения

Сорт	Происхождение	Масса зерна с растения, г		Коэффициент регрессии, b_1	Стабильность, S^2_d	Стрессоустойчивость, $(Y_{\min} - Y_{\max})$	Генетическая гибкость, $(Y_{\min} + Y_{\max})/2$
		lim	$\bar{x}$				
Восточный, st.	Россия	3,6–5,4	4,5	1,2	0,9	–1,8	4,5
Велес	Россия	4,9–5,6	5,2	0,6	0,2	–0,7	5,3
Вакула*	Россия	4,6–5,7	5,1	0,8	0,1	–1,1	5,2
Кредо	Россия	4,8–5,4	5,1	0,4	0,1	–0,6	5,1
Одон	Россия	4,5–6,1	5,2	1,2	0,1	–1,6	5,3
Ача	Россия	4,8–6,1	5,9	1,1	0,6	–1,3	5,5
Казак*	Украина	4,7–5,9	5,1	1,0	0,5	–1,2	5,3
Жозефин	Германия	4,3–6,2	5,1	1,3	1,1	–1,9	5,3
Крешендо	Германия	4,9–6,5	6,9	0,9	0,5	–0,6	5,2
Филадельфия	Германия	4,1–6,5	5,2	1,4	1,6	–2,4	5,3
Марни	Германия	4,6–5,9	5,1	1,0	1,3	–1,3	5,3
Xunadu	Германия	3,4–6,0	4,9	1,7	1,2	–2,6	4,7
Delphine	Франция	4,3–6,4	5,6	1,6	1,1	–2,1	5,3
РЖТ Планет	Франция	3,9–6,4	5,2	1,5	2,0	–2,5	5,2
Шармей	Дания	4,9–6,7	5,6	1,7	1,7	–1,8	5,8
Альф*	Дания	4,3–6,5	5,7	1,3	0,8	–2,2	5,4
Одиссей	Великобритания	3,5–6,6	5,2	0,9	3,9	–3,1	5,1

*Многорядный яровой ячмень.

отдавать адаптивным генотипам, обладающим максимальной экологической приспособленностью к условиям, в которых будет возделываться сорт. При изменяемых метеорологических условиях важным показателем сортов является их устойчивость к стрессу, уровень которого определяется по разности между минимальной и максимальной урожайностью ($Y_{\min} - Y_{\max}$). Этот показатель имеет отрицательный знак, чем меньше разрыв между максимальной и минимальной урожайностями, тем выше стрессоустойчивость сорта и тем шире диапазон его приспособительных возможностей [12]. Наибольшая стрессоустойчивость отмечена у сортов Кредо, Крешендо. Определить реакцию сорта на условия выращивания можно, рассчитав компенсаторную способность (генетическая гибкость), которая классифицируется средней урожайностью сорта [11]. Чем выше степень соответствия между сортом и факторами среды, тем выше этот параметр. Высокие значения данного признака имеют сорта Ача (5,5), Шармей (5,8).

Муссонный климат Приморского края с повышенной влажностью способствует бурному развитию грибных болезней на яровом ячмене, полеганию посевов и прорастанию зерна в колосе [16]. На естественном фоне в полевых условиях были отмечены такие болезни, как темно-бурая пятнистость, полосатый и сетчатый гельминтоспориоз, которые являются серьезной угрозой для сельского хозяйства, поскольку они могут значительно снизить урожайность и качество зерна [17].

Сетчатая пятнистость – распространенная и одна из наиболее вредоносных болезней ячменя. Анализ полученных результатов показал, что почти все высокопродуктивные сорта восприимчивы к сетчатой пятнистости (табл. 3). Высокую устойчивость (до 1% поражения) имел только один сорт – Альф (Дания), устойчивым (1,1–10%) был сорт Крешендо (Германия). Умеренной устойчивостью (поражение 10–15%) характеризовались сортообразцы Кредо (Россия), РЖТ Планет (Франция), Велес (Россия), Вакула (Россия), Хунату (Германия), Шармей (Дания), Одон (Россия), Одиссей (Великобритания), Филадельфия (Германия), Казак (Украина) и Жозефин (Германия).

Таблица 3

Иммунологическая характеристика высокопродуктивных образцов ярового ячменя коллекции ВИР по устойчивости к грибным заболеваниям

Сорт	Происхождение	Сетчатая пятнистость	Темно-бурая пятнистость	Полосатый гельминтоспориоз	Септориоз
Восточный st.	Россия	MSS	TR	TR	TR
Велес	Россия	MR	TR	TR	TR
Вакула*	Россия	MR	MR	TR	TR
Кредо	Россия	MR	MS	TR	TR
Одон	Россия	MR	TR	TR	TR
Ача	Россия	MS	MS	TR	TR
Казак*	Украина	MR	MR	TR	TR
Жозефин	Германия	MR	TR	TR	R
Крешендо	Германия	R	TR	MR	TR
Филадельфия	Германия	MR	MS	TR	TR
Марни	Германия	MS	MS	TR	TR
Хунату	Германия	MR	TR	TR	TR
Delphine	Франция	MS	MS	TR	TR
РЖТ Планет	Франция	MR	MR	TR	TR
Шармей	Дания	MR	TR	TR	TR
Альф*	Дания	TR	TR	TR	TR
Одиссей	Великобритания	MR	TR	TR	TR

*Многорядный яровой ячмень.

К темно-бурой пятнистости на естественном инфекционном фоне высокоустойчивыми были восемь сортов: Велес (Россия), Одон (Россия), Жозефин (Германия), Крешендо (Германия), Xunadu (Германия), Шармей (Дания), Альф (Дания), Одиссей (Великобритания). К полосатому гельминтоспориозу и септориозу в полевых условиях устойчивыми были практически все изученные сорта.

Заключение

В результате оценки коллекционных образцов ярового ячменя различного эколого-географического происхождения в условиях Приморского края выделены образцы, которые целесообразно использовать в селекции в качестве исходного материала с целью создания новых сортов с высокой экологической пластичностью и стабильностью:

- по продуктивной кустистости (более 4,0 шт.): Филадельфия (Германия), Delphine (Франция), Жозефин (Германия), Кредо (Россия), Шармей (Дания), РЖД Планет (Франция);

- по высоте растений (устойчивые к полеганию): Xunadu (Германия), РЖД Планет (Франция);

- по длине колоса (более 10 см): Филадельфия (Германия), Велес (Россия), Крешендо (Германия), Марни (Германия), Жозефин (Германия);

- по числу зерен в колосе (30 шт.): Казак (Украина), Вакула (Россия), Альф (Дания);

- по массе зерна с колоса (более 1,5 г): Вакула (Россия), Альф (Дания);

- по массе зерна с растения (более 5,2 г): Одон (Россия), Ача (Россия), Крешендо (Германия), Delphine (Франция), Шармей (Дания), Альф (Дания);

- по пластичности и стабильности: Одон (Россия) и Альф (Дания);

- по устойчивости к грибным заболеваниям поражение не превышает 15% (сетчатая пятнистость, темно-бурая пятнистость, полосатый гельминтоспориоз, септориоз): Крешендо (Германия), Альф (Дания).

Наибольшее значение в селекции для условий Приморского края представляют высокопродуктивные сорта, обладающие устойчивостью к болезням: РЖД Планет (Франция), Крешендо (Германия), Шармей (Дания), Delphine (Франция).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zhou M.X. Barley Production and Consumption // *Genetics and Improvement of Barley Malt Quality*. Heidelberg; Berlin: Springer, 2010. P. 1–17. DOI: 10.1007/978-3-642-01279-2_1.
2. Miralles D.J., Abeledo G.L., Prado S.A., Chenu K., Serrago R.A., Savin R. Barley // *Crop Physiology Case Histories for Major Crops* / eds. V.O. Sadras, D.F. Calderini. Cambridge, MA: Academic Press, 2021. P. 164–195. DOI: 10.1016/B978-0-2-819194-1.00004-9.
3. Филиппов Е.Г., Донцова А.А., Донцов Д.П., Засыпкина И.М. Оценка экологической пластичности и стабильности перспективных сортов и линий озимого ячменя в конкурсном сортоиспытании // *Зерновое хозяйство России*. 2021. № 4 (76). С. 8–14. DOI: 10.31367/2079-8725-2021-76-4-8-14.
4. Кинчаров А.И., Дёмина Е.А., Таранова Т.Ю., Чекмасова К.Ю. Изучение коллекционных образцов яровой мягкой пшеницы по скороспелости // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2018. № 10-1. С. 136–141. DOI: 10.24411/2500-1000-2018-10082.
5. Murugova G.A., Pavlova N.A., Klykov A.G. Evaluation of Adaptive Properties of the Spring Barley Varieties Using Mathematical Analysis // *CEUR Workshp Proceedings: Short Paper Proceedings of the V International Conference on Information Technologies and High-Performance Computing (ITHPC-2019)* (Khabarovsk, Russia, Sept. 16–19, 2019). 2019. Vol. 2426. P. 110–115.

6. Тетяников Н.В., Боме Н.А. Анализ взаимодействия «генотип × среда» и оценка адаптивного потенциала ячменя в условиях Северного Зауралья // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2021. № 182 (3). С. 63–73. DOI: 10.30901/2227-8834-2021-3-63-73.
7. Марухняк А.Я. Оценка адаптивных особенностей сортов ярового ячменя // Вестник Белорусской государственной академии. 2018. № 1. С. 67–72.
8. Клыков А.Г., Монсеенко Л.М., Муругова Г.А. Оценка адаптивности сортообразцов ярового ячменя по продуктивности в Приморском крае // Достижения науки и техники АПК. 2014. № 2. С. 27–29.
9. Сафонова И.В., Аниськов Н.И., Коблянский В.Д. База данных генетических ресурсов коллекции озимой ржи ВИР как средство классификации генетического разнообразия, анализа истории коллекции эффективного изучения и сохранения // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2019. Т. 23. № 6. С. 150–156. DOI: 10.18699/VJ19.552.
10. Волкова Л.В., Щенникова И.Н. Сравнительная оценка методов расчета адаптивных реакций зерновых культур // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 140–146. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-3-140-146.
11. Рыбась И.А. Повышение адаптивности в селекции зерновых культур // Сельскохозяйственная биология. 2016. Т. 51. № 5. С. 617–626. DOI: 10.15389/agrobiology.2016.5.617rus.
12. Гончаренко А.А., Макаров А.В., Ермаков С.А., Семенова Т.В., Точилин В.Н., Цыганкова Н.В., Скатова С.Е., Крахмалева О.А. Экологическая устойчивость сортов озимой ржи с различным типом короткостебельности // Российская сельскохозяйственная наука. 2019. № 3. С. 3–9. DOI: 10.31857/S2500-2627201933-9.
13. Сафонова И.В., Аниськов Н.И. Значимость комплексной оценки селекционных индексов и параметров стрессоустойчивости сортов озимой ржи // Аграрный вестник Урала. 2022. № 06 (221). С. 16–26. DOI: 10.32417/1997-48682022-221-06-16-26.
14. Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П. Районирование Дальнего Востока для оценки перспектив развития сельского хозяйства // Достижения науки и техники АПК. 2022. Т. 36. № 4. С. 61–65. DOI: 10.53859/02352451_2022_36_4-61.
15. Кинчаров А.И., Таранова Т.Ю., Дёмина Е.А., Чекмасова К.Ю. Селекционная оценка признака масса 1000 зерен в засушливых условиях // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 7–12. DOI: 10.17513/use.37384.
16. Муругова Г.А., Клыков А.Г., Калантаевская О.Г., Павлова Н.А. Селекция ярового ячменя на устойчивость к основным болезням в Приморском крае // Вестник КрасГАУ. 2014. № 6. С. 139–143.
17. Абдуллаев Р.А., Лебедева Т.В., Чумаков М.А., Коновалова Г.С., Радченко Е.Е., Баташева Б.А. Разнообразие образцов ячменя из стран Северной Африки по устойчивости к вредным организмам // Аграрная Россия. 2020. № 11. С. 3–9. DOI: 10.30906/1999-5636-2020-11-3-9.

REFERENCES

1. Zhou M.X. Barley Production and Consumption. In: Genetics and Improvement of Barley Malt Quality. Heidelberg; Berlin: Springer; 2010. P. 1–17. DOI: 10.1007/978-3-642-01279-2_1.
2. Miralles D.J., Abeledo G.L., Prado S.A., Chenu K., Serrago R.A., Savin R. Barley. In: Crop Physiology Case Histories for Major Crops. Cambridge, MA: Academic Press; 2021. P. 164–195. DOI: 10.1016/B978-0-2-819194-1.00004-9.
3. Filippov E.G., Dontsova A.A., Dontsov D.P., Zasyapkina I.M. Otsenka ekologicheskoi plastichnosti i stabil'nosti perspektivnykh sortov i linii ozimogo yachmenya v konkursnom sortoispytanii = [Estimation of ecological adaptability and stability of promising winter barley varieties and lines in the competitive variety testing]. *Grain Economy of Russia*. 2021;4(76):8–14. (In Russ.). DOI: 10.31367/2079-8725-2021-76-4-8-14.
4. Kincharov A.I., Demina E.A., Taranova T.Yu., Chekmasova K.Yu. Izuchenie kollektsionnykh obraztsov yarovoi myagkoi pshenitsy po skorospelosti = [The study of collection samples of spring soft wheat for precocity]. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2018;(10-1):136–141. (In Russ.). DOI: 10.24411/2500-1000-2018-10082.

5. Murugova G.A., Pavlova N.A., Klykov A.G. Evaluation of Adaptive Properties of the Spring Barley Varieties Using Mathematical Analysis. In: CEUR Workshp Proceedings: Short Paper Proceedings of the V International Conference on Information Technologies and High-Performance Computing (ITHPC-2019) (Khabarovsk, Russia, Sept. 16–19, 2019). 2019;2426:110–115.
6. Tetyannikov N.V., Bome N.A. Analiz vzaimodeistviya “genotip × sreda” i otsenka adaptivnogo potentsiala yachmenya v usloviyakh Severnogo Zaural’ya = [Analysis of the “genotype × environment” interactions and assessment of the adaptability potential in barley under the conditions of the Northern Trans-Urals]. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(3):63–73. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-3-63-73.
7. Marukhnyak A.Ya. Otsenka adaptivnykh osobennosti sortov yarovogo yachmenya = [Estimation of adaptive features of spring barley varieties]. *Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy*. 2018;(1):67–72. (In Russ.).
8. Klykov A.G., Moiseenko L.M., Murugova G.A. Otsenka adaptivnosti sortoobraztsov yarovogo yachmenya po produktivnosti v Primorskom krae = [Evaluation of cultivars adaptation of spring barley productivity in Primorsky Krai]. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2014;(2):27–29. (In Russ.).
9. Safonova I.V., Anis’kov N.I., Koblyanskii V.D. Baza dannykh geneticheskikh resursov kollektsii ozimoi rzhi VIR kak sredstvo klassifikatsii geneticheskogo raznoobraziya, analiza istorii kollektsii effektivnogo izucheniya i sokhraneniya = [The database of genetic resources in the VIR winter rye collection as a means of classification of genetic diversity, analysis of the collection history and effective study and preservation]. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(6):150–156. (In Russ.). DOI: 10.18699/VJ19.552.
10. Volkova L.V., Shchennikova I.N. Sravnitel’naya otsenka metodov rascheta adaptivnykh reaktsii zernovykh kul’tur = [Comparative evaluation of methods for calculating adaptive responses of cereals]. *Theoretical and Applied Ecology*. 2020;(3):140–146. (In Russ.). DOI: 10.25750/1995-4301-2020-3-140-146.
11. Rybas’ I.A. Povyshenie adaptivnosti v selektsii zernovykh kul’tur = [Breeding grain crops to increase adaptability]. *Agricultural Biology*. 2016;51(5):617–626. (In Russ.). DOI: 10.15389/agrobiol.2016.5.617rus.
12. Goncharenko A.A., Makarov A.V., Ermakov S.A., Semenova T.V., Tochilin V.N., Tsygankova N.V., Skatova S.E., Krakhmaleva O.A. Ekologicheskaya ustoichivost’ sortov ozimoi rzhi s razlichnym tipom korotkostebel’nosti = [Ecological stability of varieties of winter rye with various type of a short-stem]. *Rossiiskaya Sel’skokhozyaistvennaya Nauka*. 2019;(3):3–9. (In Russ.). DOI: 10.31857/S2500-2627201933-9.
13. Safonova I.V., Anis’kov N.I. Znachimost’ kompleksnoi otsenki selektsionnykh indeksov i parametrov stressoustoichivosti sortov ozimoi rzhi = [The importance of a comprehensive assessment of breeding indices and resistance parameters of winter rye varieties]. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2022;06(221):16–26. (In Russ.). DOI: 10.32417/1997-48682022-221-06-16-26.
14. Trofimov I.A., Trofimova L.S., Yakovleva E.P. Raionirovanie Dal’nego Vostoka dlya otsenki perspektiv razvitiya sel’skogo khozyaistva = [Zoning of the Far East to assess the prospects for the development of agriculture]. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2022;36(4):61–65. (In Russ.). DOI: 10.53859/02352451_2022_36_4-61.
15. Kincharov A.I., Taranova T.Yu., Demina E.A., Chekmasova K.Yu. Selekcionnaya otsenka priznaka massa 1000 zeren v zasushlivykh usloviyakh = [Breeding evaluation of the trait mass of 1000 grains in arid conditions]. *Uspekhi Sovremennogo Estestvoznaniya*. 2020;(5):7–12. (In Russ.). DOI: 10.17513/use.37384.
16. Murugova G.A., Klykov A.G., Kalantaevskaya O.G., Pavlova N.A. Seleksiya yarovogo yachmenya na ustoichivost’ k osnovnym boleznyam v Primorskom krae = [The spring barley selection on the resistance to the main diseases in Primorsky Krai]. *Bulletin of KSAU*. 2014;(6):139–143. (In Russ.).
17. Abdullaev R.A., Lebedeva T.V., Chumakov M.A., Konovalova G.S., Radchenko E.E., Batasheva B.A. Diversity of *Hordeum vulgare* L. accessions from North Africa countries for resistance to harmful organisms. *Agrarian Russia*. 2020;11:3–9. (In Russ.). DOI: 10.30906/1999-5636-2020-11-3-9.

Обзорная статья

УДК 619:616.986.7(571.620)

DOI: 10.31857/S0869769825030075

EDN: PMLQAT

Факторы, определяющие природную очаговость лептоспироза в природно-климатических условиях Хабаровского края

М.Е. Остякова✉, О.Н. Емельянов

Марина Евгеньевна Остякова

доктор биологических наук, доцент, директор

Дальневосточный зональный научно-исследовательский ветеринарный институт,

Благовещенск, Россия

dalznivdv@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-2996-0991>

Олег Николаевич Емельянов

ведущий ветеринарный врач

Николаевская районная станция по борьбе с болезнями животных,

Николаевск-на-Амуре, Россия

chizh_2292@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0001-6978-5879>

Аннотация. Лептоспироз – нетрансмиссивное природно-очаговое заболевание с большим спектром резервуарных хозяев патогенных лептоспир и восприимчивых к ним видов животных. Лептоспиры хемоорганотрофные, строго аэробные микроорганизмы, оптимальная рН среды для культивирования лептоспир 7,0–7,6. Цель исследования – изучить особенности природно-климатических условий Хабаровского края, способствующих сохранению лептоспир в окружающей среде и циркуляции их у млекопитающих. К природно-климатическим predisposing факторам относятся: густая речная сеть, муссонный климат, паводки и наводнения, особенности геоморфологического строения долины Амура, горный рельеф, наличие мерзлых пород на севере и суглинистых грунтов на юге, насыщенность почвогрунтов водой, наличие болотистых местностей. К экологическим факторам, способствующим циркуляции лептоспир, относится характер растительности – в широких поймах Амура распространены осоково-вейниковые луга, которым свойственна природная очаговость лептоспироза. В крае обитает большое количество околотовных грызунов – резервуарных хозяев лептоспир. При наводнениях и паводках грызуны мигрируют из затопленных участков, расширяя ареал своего обитания, тем самым способствуя распространению возбудителей природно-очаговых инфекций за границы своего ареала обитания в участки временного выноса возбудителя и постоянно благополучные, чаще всего это населенные пункты (антропоургические очаги лептоспироза). Из социально-экономических факторов, способствующих циркуляции лептоспир, следует отметить расположение основных сельскохозяйственных районов (Хабаровский, Ульчский, Нанайский, им. Лазо, Комсомольский, Вяземский, Бикинский и Амурский) в поймах и низовьях рек. В периоды сезонных дождей

и паводков, наводнений в эти районы мигрируют из природных очагов лептоспироза грызуны-лептоспиноносители, осложняя эпидемиологическую и эпизоотологическую ситуацию.

Ключевые слова: лептоспироз, почва, вода, климат, Хабаровский край

Для цитирования: Остякова М.Е., Емельянов О.Н. Факторы, определяющие природную очаговость лептоспироза в природно-климатических условиях Хабаровского края // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 3. С. 76–87. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030075>

Review article

Factors determining the natural foci of leptospirosis in the natural and climatic conditions of the Khabarovsk Territory

M.E. Ostyakova, O.N. Yemelyanov

Marina E. Ostyakova

Doctor of Sciences in Biology, Associate Professor, Director
Far East Zone Research Veterinary Institute, Blagoveshchensk, Russia
dalznivdv@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-2996-0991>

Oleg N. Emelyanov

Leading Veterinarian
Nikolaevsk District Animal Disease Control Station, Nikolaevsk-on-Amur, Russia
chizh_2292@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-6978-5879>

Abstract. Leptospirosis is a non-transmissible natural focal disease with a wide range of reservoir hosts of pathogenic *Leptospira* and susceptible animal species. *Leptospira* are chemoorganotrophic, strictly aerobic microorganisms and the optimal pH of the environment for cultivating *Leptospira* is 7.0–7.6. The purpose of the study is to study the features of the natural and climatic conditions of the Khabarovsk Territory, which contribute to the preservation of *Leptospira* in the environment and their circulation in mammals. Natural and climatic predisposing factors include: a dense river network, monsoon climate, floods and floods, features of the geomorphological structure of the Amur valley, mountainous terrain, the presence of frozen rocks in the north and loamy soils in the south, soil saturation with water, the presence of marshy areas. Environmental factors contributing to the circulation of leptospira include the nature of the vegetation – in the wide floodplains of the Amur River, sedge-reed meadows are common, which are characterized by natural focality of leptospirosis. The region is home to a large number of semi-aquatic rodents – reservoir hosts of *Leptospira*. During floods and freshets, rodents migrate from flooded areas, expanding their habitat, thereby contributing to the spread of pathogens of natural focal infections beyond the boundaries of their habitat into areas of temporary removal of the pathogen and permanently safe ones, most often these are populated areas (anthropogenic foci of leptospirosis). Among the socio-economic factors contributing to the circulation of *Leptospira*, it should be noted the location of the main agricultural regions (Khabarovsk, Ulchsky, Nanaisky, Lazo, Komsomolsky, Vyazemsky, Bikinsky and Amursky) in the floodplains and lower reaches of rivers. During periods of seasonal rains and high waters, leptospirosis-carrying rodents migrate to these areas from natural foci of leptospirosis, complicating the epidemiological and epizootological situation.

Keywords: leptospirosis, soil, water, climate, Khabarovsk Territory

For citation: Ostyakova M.E., Emelyanov O.N. Factors determining the natural foci of leptospirosis in the natural and climatic conditions of the Khabarovsk Territory. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(3):76–87. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030075>

Введение

Лептоспироз – нетрансмиссивное природно-очаговое зооантропонозное заболевание, самое распространенное в мире, что связано с большим спектром резервуарных хозяев патогенных лептоспир и восприимчивых к ним видов животных в природных и антропоургических очагах [1, 2].

Возбудители лептоспирозов – бактерии, относящиеся к роду *Leptospira*. Идентифицированные к настоящему моменту патогенные лептоспиры отнесены к 25 серологическим группам, 250 сероварам и 20 таксономическим видам [3]. Лептоспиры – хемоорганотрофные, строго аэробные микроорганизмы, температура для культивирования 37–38 °С, оптимальная рН среды для культивирования лептоспир 7,0–7,6 [4].

Основным резервуаром инфекции в природе являются различные виды мелких млекопитающих. Это главным образом представители отряда Rodentia (грызуны), преимущественно семейств Muridae (мышеобразные) и Cricetidae (хомяковообразные). В.В. Ананьин, Е.В. Карасева доказали носительство лептоспир у 58 видов грызунов, из которых 53 относятся к двум вышеупомянутым семействам. К лептоспиноносителям могут также относиться животные из отрядов Insectivora (насекомоядные), Carnivora (хищные) и Marsupialia (сумчатые), а также копытные [5, 6].

Грызуны – специфическая группировка околопочвенного и околоводного экологического комплекса. Их образ существования, особенности питания, постоянная тесная связь и контакт с почвой и водой (наиболее «эффективными» источниками заражения), динамика численности видов и избыточная репродукция, резкие волны жизни при обилии пищевых ресурсов обуславливают чрезвычайно эффективные механизмы циркуляции, резервирования, амплификации лептоспир, экологический полиморфизм и реализацию их биологических и эпизоотических циклов [7].

Непрерывность процесса циркуляции патогенных лептоспир в природе обеспечивается их способностью к колонизации эпителия извитых канальцев коркового слоя почек теплокровных хозяев, у которых формируется хроническое и/или пожизненное лептоспиноносительство. Во влажных биотопах создаются природные очаги. В антропоургических очагах лептоспиноносительство установлено у домашних и сельскохозяйственных животных. В смешанных очагах основным резервуаром инфекции принято считать серую крысу [8–11].

Животные-лептоспиноносители выделяют лептоспир в почву (воду) и передают этого возбудителя незараженным грызунам через воду. Почва и вода рассматриваются как дополнительный резервуар возбудителя инфекции, в которых патогенные лептоспиры способны длительно сохраняться: в водоемах – в течение 30 дней, а во влажной почве – до 279 дней – и поражать широкий спектр хозяев [12, 13].

Так как общие условия распространения природно-очаговых инфекций характеризуются нозоареалом и определяются обобщенным экологическим своеобразием региона, имеющего наиболее значимую геоветеринарную характеристику: природно-климатический, физико-географический либо иной природно-территориальный комплекс [7], – актуальным является изучение условий, способствующих сохранению лептоспир в окружающей среде и циркуляции их у млекопитающих.

Цель исследования – изучить условия Хабаровского края, способствующие сохранению лептоспир в окружающей среде и циркуляции их у млекопитающих.

Методы исследования

Проведен анализ научной литературы.

Результаты и их обсуждение

Основными условиями активизации эпизоотического процесса инфекций являются природно-климатические условия существования животных, экологические и социально-экономические факторы развития региона [7].

Особенности рельефа и климата Хабаровского края. Край располагается на территории Дальневосточного федерального округа (ДФО) и занимает площадь 787,6 тыс. км². Поверхность края имеет сложное неоднородное строение: горы занимают более 80% территории края, преобладает низко- и среднегорный рельеф. Горные хребты и системы простираются в основном в северо-восточном, почти меридиональном направлении, высота гор редко превышает 2000 м, что проявляется в режиме погоды. Равнины занимают около 15% площади и чаще всего приурочены к долинам Амура и других рек, имеют аллювиальное, озерное или озерно-аллювиальное происхождение. Пойма р. Амур широкой полосой (ширина до 30 км [14]) проходит вдоль равнин и низменностей: Среднеамурской, Удыль-Кизинской, Нижнеамурской (Амура-Амгуньской), Эворон-Чукчагирской, на которой много озер, повсеместно развита многолетняя мерзлота мощностью до 50 м. Прибрежный район Охотского моря представляет собой большую заболоченную Охотскую низменность с множеством мелких озер, покрытую в основном лесотундровой растительностью [15].

Вся территория края находится в умеренном климатическом поясе. Большое влияние на климат оказывают Охотское и Японское моря. Под влиянием муссонной циркуляции находится около ¼ части края (прибрежные районы Охотского моря и Татарского пролива, долина Амура). На 60% территории края с июня по сентябрь включительно выпадает свыше 60% годового количества осадков [15–18].

Лето в Приамурье теплое, дождливое, и с мая по июнь включительно вероятность выпадения осадков наименьшая, но в отдельные годы затяжные дожди охватывают все Нижнее и восточную часть Среднего Приамурья. Дожди способствуют повсеместному переувлажнению еще не просохших сельхозугодий. В июле и августе идут сильные дожди на юге Дальнего Востока и в Забайкалье, в Приамурье экстремально дождливыми могут быть июль–сентябрь, когда выпадает до 1000 мм осадков, а в августе или сентябре – до 400 мм. Существует тесная корреляционная связь между характером атмосферных процессов, приводящих к выпадению летних осадков в Приамурье, и водностью Амура. Во второй половине лета создаются условия формирования в горных узлах Приамурья очагов наводнения с последующим затоплением нижней, средней и даже верхней пойм Амура [15].

Таким образом, природно-климатические условия Хабаровского края: преобладающий низко- и среднегорный рельеф, приуроченность равнин к долинам Амура и других рек, расположение низменностей вдоль побережий морей, повышенное количество осадков и повышенная водность Амура в весенне-летне-осенний периоды, наводнения с последующим затоплением нижней, средней и даже верхней пойм Амура, сгонно-нагонные явления в предустьевой части рек с образованием заболоченностей – создают благоприятные условия для сохранения лептоспир во внешней среде и циркуляции патогенных лептоспир среди животных.

Особенности речной сети и кислотность вод Хабаровского края. Речная сеть отличается большой густотой (более 1,0 км/км²). Водный режим рек характеризуется очень незначительным зимним меженным стоком, но во второй половине лета и ранней осенью на многих реках отмечаются дождевые паводки, часто принимающие характер наводнений. Главная водная артерия региона – р. Амур (площадь водосбора 1840 тыс. км²) [19]. Крупнейшими левыми притоками Амура являются Зея, Бурея, Амгунь, правыми – Сунгари и Усури, которые по протя-

женности и водности превосходят многие европейские реки. В долине Амура расположено большое количество озер, самые крупные из которых – Чукчагирское, Удыль, Болонь, Кизи, Орель, Чля. Все эти водные объекты оказывают существенное влияние на местный климат и микроклимат прилегающей местности [15].

По особенностям строения в долине р. Амур выделяют три основных участка: верхний Амур (длиной 900 км) – от истока (слияния рек Аргуни и Шилки) до устья р. Зея (г. Благовещенск); средний Амур (995 км) – от устья Зеи до устья р. Уссури (г. Хабаровск); нижний Амур (966 км) – от устья Уссури до впадения в Амурский лиман (Охотское море). Среднемноголетний годовой сток притоков Амура составляет: Аргуни и Шилки (верхний Амур) – 340 и 546 м³/с соответственно; Зеи, Буреи и Уссури (средний Амур) – 1930, 904 и 1435 м³/с соответственно [19].

Поймы рек обладают большой аккумулярующей способностью, сложены хорошо промытыми породами, поэтому аллювиальные воды здесь мало минерализованы. По длине Амура от Хабаровска к устью отмечается снижение содержания взвешенных веществ. Показатели рН в речных водах бассейна р. Амур в периоды май–июнь и август–октябрь следующие: верхний Амур – 6,60–7,84, р. Амур–Амурзет – 6,70–7,55, р. Амур–Нижнеленинское – 6,48–7,55, р. Уссури–Казакевичево – 6,50–7,47, р. Амур–Хабаровск – 6,50–7,51, протока Амурская–Хабаровск – 7,20–7,40, нижний Амур – 7,62–8,03 [19].

В стоке воды участвует большое количество озер, расположенных в долинах, котловинах и циркообразных углублениях среди горных хребтов. Сток наиболее крупных каровых озер осуществляется в речную сеть бассейна р. Амгунь (оз. Горное), бассейна р. Бурей (оз. Медвежье), р. Левая Бурей (оз. Корбохон). Питание дождевыми и талыми снеговыми водами, а также наличие в составе пород, слагающих ложа водоемов, трудно выщелачиваемых гранитов, обуславливают нейтральную или слабощелочную величину рН и очень низкую минерализацию воды этих ледниковых озер [20].

Воды ледниковых озер Каровое и Верхнее в предгорьях горы Тардоки-Яни на Сихотэ-Алине характеризуются более высокой минерализацией. Самый глубокий бассейн р. Амур – ледниковое оз. Букукунское (юго-западный склон горы Сохондо), характеризующееся высоким содержанием ионов натрия, магния и гидрокарбонатного иона. Озера Большой Сулук и Омот, расположенные в бассейне р. Амгунь, характеризуются низкой минерализацией [20].

Тяньчи – самый высокогорный и глубокий водоем в бассейне р. Амур, расположен в кратере вулкана, кроме атмосферных осадков основным источником питания являются термальные подземные воды, которые характеризуются высокой минерализацией [20].

Таким образом, речная сеть Хабаровского края характеризуется большой густотой. Главной водной артерией региона является р. Амур. Крупнейшие притоки Амура по протяженности и водности превосходят многие европейские реки. В стоке воды участвует большое количество озер, расположенных в долинах, котловинах и циркообразных углублениях среди горных хребтов. Водный режим рек характеризуется во второй половине лета и ранней осенью дождевыми паводками, часто принимающими характер наводнений. Показатель кислотности горных озер, сток вод которых осуществляется в притоки Амура, имеет нейтральную или слабощелочную реакцию.

Паводки и наводнения. В динамике эпидемических ситуаций при инфекциях, распространяемых грызунами, четко прослеживается универсальная цепная связь причинных событий: чрезвычайные гидрологические ситуации (обычно высокий паводок) → миграция околотовных грызунов в населенные пункты → вспышки инфекций [7].

Летние муссонные и осенние тайфунные дожди часто вызывают хорошо выраженные паводки и наводнения на р. Амур и других реках. Их возникновению способствуют густая речная сеть, горный рельеф, наличие мерзлых пород на севере и суглинистых грунтов на юге, резкое падение уклонов и малая высота берегов на среднем Амуре [21].

Во многих регионах мира установлено чередование фаз повышенной и пониженной водности рек с периодичностью 10–15 лет [22]. За все время инструментальных гидрологических наблюдений (126 лет) в нижнем течении р. Амур наблюдалось пять периодов повышенной водности продолжительностью от 10 до 18 лет, для которых были характерны большие наводнения [23].

Основными природными факторами, способствующими крупномасштабному наводнению, были: аномальное высокое количество выпавших атмосферных осадков в течение двух летних месяцев – июля и августа; последовательное совпадение пика паводка на Амуре по мере его движения вниз по реке с пиками паводков рек всех основных областей формирования стока; наступление периода высокой водности после длительного этапа маловодности р. Амур; неравномерность стока воды не только сезонного характера, но и периодичность крупных наводнений каждые 10–15 лет; особенности геоморфологического строения долины Амуре (чередование сужений и расширений поймы), что в паводок приводит к превращению низменностей в обширные водные акватории; направленная аккумуляция наносов в среднем и нижнем течении р. Амур, что приводит к образованию толщи отложений со средней скоростью около 1,2 мм в год [24].

Очень сильные наводнения формировались в 2019 и 2020 гг. в результате выходов тайфунов. В 2019 г. повышению уровня воды р. Амур у г. Хабаровск предшествовали 3 небольших паводка в июне и июле. Очень сильное наводнение было у Хабаровска – пойма находилась под водой 71 день. Летом 2020 г. появлению очень сильного наводнения на р. Амур предшествовали небольшой паводок и глубокая летняя межень. Большое влияние на сток Амуре, как и в 2019 г., оказала р. Буря. Снижение уровня Амуре носило более длительный характер, чем в паводки 2013 и 2019 гг. В настоящее время Амур находится в состоянии повышенной водности с 2009 до предположительно 2025 г. [23].

Четыре наводнения за последние десять лет на Амуре – самое крупное в 2013 г., второе по мощности – в 2019 г., наводнения в 2020 и 2021 гг. – наносили серьезный ущерб населению и экономике Хабаровского края [25].

Таким образом, особенности климата и водного режима рек Хабаровского края характеризуются часто повторяющимися сезонными паводками. На р. Амур и ее притоках наблюдаются периоды повышенной водности, для которых характерны большие наводнения. Такая ситуация приводит к миграции околородных грызунов из природных очагов лептоспироза в антропоургические, что осложняет эпидемиологическую и эпизоотическую ситуацию.

Особенности почвенно-растительного покрова и кислотность почв. Основными сельскохозяйственными районами Хабаровского края являются Хабаровский, Ульчский, Нанайский, им. Лазо, Комсомольский, Вяземский, Бикинский и Амурский [26], большей частью расположенные в поймах и низовьях рек.

В пределах Хабаровского края Ю.А. Ливеровский выделяет следующие почвенные зоны, занимающие как горные области, так и равнины: горно-тундровые почвы под горно-тундровой растительностью; подзолистые, торфяные мерзлотные, подзолисто-болотные и другие равнинные и горные таежные почвы в области северной тайги; буро-таежные, горные буро-таежные (буро-таежные иллювиально-гумусовые) и болотные почвы в области средней южной тайги; бурые лесные типичные, бурые лесные оподзоленные, бурые лесные поверхностно-глеевые почвы, лесные подбелы,

лугово-болотные и болотные почвы марей в области хвойно-широколиственных лесов; бурые лесные, луговые черноземовидные, луговые подбелы (луговые глеевые); лугово-болотные почвы в южной равнинной части территории [15, 27].

По данным В.П. Басистого, в Хабаровском крае распространены следующие типы почв с реакцией почвенной среды: 1) *подзолисто-бурые* с различной степенью оглеения (характерны для Вяземского и Хабаровского районов, формируются на озерно-аллювиальных и делювиальных породах тяжелого механического состава), бедны подвижными формами фосфатов (10–25 мг/кг), высоко обеспечены подвижным калием (до 200 мг/кг), реакция почвенной среды pH_{KCl} варьирует в диапазоне 4,2–4,5; 2) *лугово-глеевые* в комплексе с лугово-болотными и торфяно-глеевыми почвами, обеспеченность подвижным фосфором очень низкая, обменным калием – от средней до повышенной, pH_{KCl} менее 4,0, подвержены периодическому избыточному увлажнению летом; 3) *бурые лесные* оподзоленные почвы (наиболее широко распространены в районе им. Лазо), имеют среднесуглинистый механический состав, бедны подвижным фосфором и хорошо обеспечены подвижным калием, показатель реакции среды pH_{KCl} 4,2–6,2; 4) *лугово-бурые* и *лугово-бурые оподзоленные* почвы характеризуются низкой обеспеченностью подвижным фосфором и высокой – обменным калием, реакция среды средне- и слабокислая (pH_{KCl} 4,6–5,2), отличаются неоднородным механическим составом, который варьирует от легкого суглинка до глины; 5) почвы болотного происхождения (торфяно- и торфянисто-глеевые) распространены в Амурском и Комсомольском районах, относятся к сильно гумусированным, подвергаются периодическому переувлажнению. Кислотность (pH_{KCl}) пахотных почв Хабаровского края распределяется следующим образом: Хабаровский район – 5,1, Вяземский – 5,6, Комсомольский – 5,1, Амурский – 5,6, им. Лазо – 5,5, Бикинский – 5,3 [28, 29].

На территории края встречаются следующие типы флор: наиболее бедная и однообразная *восточно-сибирская (якутская)* – занимает в основном северные континентальные районы края и представлена лиственницей и сопутствующими ей растениями; *охотско-камчатская* (темнохвойная тайга) распространена по западному побережью Охотского моря и заходит в низовья Амура, в горы Сихотэ-Алиня, Баджала Буреинского хребта и др., имеется много древних видов: ель аянская, пихта белокорая, береза каменная; в южных районах преобладают представители *маньчжурской* – кедрово-широколиственные леса; в пойме Амура и на равнинах встречаются представители *монголо-даурской степной* растительности; *берингийская (чукотская) тундровая* отмечается на вершинах среднегорий: кедровый стланик, береза каменная, рододендрон и др. [15].

Болота занимают около половины территории низменностей края, остальная их территория находится под лугами (25–30%) и лесами (20–25%). Особенно широко они распространены в низовьях Амура, на Эворон-Чукчагирской, Удыль-Кизинской, Среднеамурской низменностях. В покрове болот обычно преобладают сфагновые мхи, над которыми развит кустарничковый ярус из багульника, голубики, карликовых березок. Иногда встречается кедровый стланик с единичными низкорослыми лиственницами. В широкой (до 30 км) пойме Амура луговая растительность, представленная осоково-вейниковыми лугами. Прирусловую часть поймы занимают ивняки. Возвышенные прирусловые валы покрыты лесом из дуба, липы, березы, осины, леспедецы, барбариса, шиповника и многих других видов растений [15].

По берегам припойменных озер и пойменных стариц произрастает 108 видов сосудистых растений: прибрежно-водные, водные, луговые и лугово-болотные (36,1%), отмельные (22,2%), адвентивные виды (8,3%). На отмелях чрезвычайно редки виды болотной экологии (0,9%) [30].

Природа Хабаровского края представлена значительным разнообразием резервуарных хозяев лептоспир. Согласно данным В.А. Костенко [31], на территории Хабаровского края насчитывается 16 видов мелких грызунов. Фоновыми видами являются красно-серая полевка и восточноазиатская мышь в лесных комплексах; в луго-полевых – полевая мышь, серые полевки рода *Microtus* (полевка Максимовича и большая), красная полевка и восточноазиатская мышь; в пойменно-болотном комплексе – полевая и восточноазиатская мыши, красно-серая и большая полевки. Восточноевропейская полевка оказалась фоновым видом в окр. г. Советская Гавань. На юге Хабаровского края обитает 10 видов семейства землеройковые [32, 33]. Фоновыми видами лесного комплекса Большого Хехцира являлись средняя и равнозубая бурозубки; лугополевого комплекса окр. г. Хабаровска – средняя и тундряная. В окр. г. Советская Гавань и пос. Ванино фон составляли средняя, дальневосточная и когтистая бурозубки [34].

Заключение

Особенности природно-климатических, экологических и социально-экономических условий Хабаровского края способствуют сохранению и распространению возбудителей лептоспироза. К природно-климатическим предрасполагающим факторам относятся: густая речная сеть, муссонный климат, паводки и наводнения, особенности геоморфологического строения долины Амура, горный рельеф, наличие мерзлых пород на севере и суглинистых грунтов на юге, насыщенность почвогрунтов водой, наличие болотистых местностей. К экологическим факторам, способствующим циркуляции лептоспир, относится характер растительности – в широких поймах Амура распространены осоково-вейниковые луга, которым свойственна природная очаговость лептоспироза. В крае обитает большое количество околотовных грызунов – резервуарных хозяев лептоспир. При наводнениях и паводках грызуны мигрируют из затопленных участков, расширяя ареал своего обитания, тем самым способствуя распространению возбудителей природно-очаговых инфекций за границы своего ареала обитания в участки временного выноса возбудителя и постоянно благополучные, чаще всего это населенные пункты (антропоургические очаги лептоспироза). Из социально-экономических факторов, способствующих циркуляции лептоспир, следует отметить расположение основных сельскохозяйственных районов (Хабаровский, Ульчский, Нанайский, им. Лазо, Комсомольский, Вяземский, Бикинский и Амурский) в поймах и низовьях рек. В периоды сезонных дождей и паводков, наводнений в эти районы мигрируют из природных очагов лептоспироза грызуны-лептоспираносители, осложняя эпидемиологическую и эпизоотологическую ситуацию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шатрубова Е., Барышников П. Природная очаговость лептоспироза в горных районах юга Западной Сибири // Ветеринария сельскохозяйственных животных. 2019. № 4. С. 9–14.
2. Остякова М.Е., Емельянов О.Н. Лептоспироз природных и антропоургических очагов Хабаровского края // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 4 (64). С. 97–102. DOI: 10.18286/1816-4501-2023-4-97-102.
3. Истомин А.В. Роль ранних стадий послерубочных сукцессий в поддержании природных очагов лептоспироза в центральной части Каспийско-Балтийского водораздела // Экосистемы. 2023. № 34. С. 59–66. EDN: BCQRQD.
4. Патент № 2202608 С2 Российская Федерация, МПК C12N 1/20, C12Q 1/04. Способ культивирования лептоспир / В.И. Ситьков, В.И. Заерко, А.П. Сурмило и др.; заявитель Федеральное

государственное унитарное предприятие «Ставропольская биофабрика». № 2000120149/13; заявл. 27.07.2000; опубл. 20.04.2003.

5. Назарова О.Д., Муминов А.А., Джумаев Ш.Н. О природной очаговости лептоспирозной инфекции в Таджикистане // Сельскохозяйственные технологии. 2019. Т. 1. № 3. С. 35–40. DOI: 10.35599/agritech/01.03.05.

6. Некрасова Л.Е., Айкимбаев А.М., МекаМеченко Т.В. и др. Связь заболеваемости людей некоторыми зоонозами в г. Алматы с эпизоотическим фоном среди грызунов // Проблемы охраны здоровья населения РК: тез. докл. I съезда врачей Казахстана (Алматы, 22–23 ноября 1997 г.). Алматы, 1997. С. 347.

7. Макаров В.В. Глобальная эпизоотология // Российский ветеринарный журнал. 2019. № 6. С. 26–35. DOI: 10.32416/2500-4379-2019-6-26-35.

8. Полищук С.В., Быченко Д.Д. Ландшафтно-географические и природно-климатические условия для формирования природных очагов лептоспироза в Республике Крым на примере Джанкойского района и Присивашья // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2021. № 28 (191). С. 125–137.

9. Лиджи-Гаряева Г.В., Яшкулов К.Б., Оброткина Н.Ф. Состояние природных и антропоургических очагов лептоспироза в Республике Калмыкия // Дальневосточный журнал инфекционной патологии. 2019. № 37 (37). С. 71–72.

10. Транквилевский Д.В., Киселева Е.Ю., Корзун В.М., Бренёва Н.В., Вержуцкая Ю.А., Зарва И.Д., Скударева О.Н., Балахонов С.В. Эпизоотолого-эпидемиологическая ситуация по лептоспирозам в Российской Федерации в период с 2013 по 2022 г. и прогноз на 2023 г. // Проблемы особо опасных инфекций. 2023. № 3.

11. Остякова М.Е., Литвинова З.А., Емельянов О.Н. Диагностика и профилактика лептоспироза животных в Хабаровском крае: научно-практические рекомендации. Благовещенск: Дальневосточный ГАУ, 2023. 44 с. ISBN 978-5-9642-0574-6.

12. Романенко О.А., Тимченко Л.Д., Заерко В.И. Проблемы производственного культивирования лептоспир и пути их решения // Ветеринарная патология. 2013. № 3 (45). С. 49–53.

13. Ананьина Ю.В. Лептоспирозы в Российской Федерации: современные особенности эпидемиологического проявления природных и техногенных очагов // Ветеринарная патология. 2004. № 4 (11).

14. Махинов А.Н., Махинова А.Ф. Особенности влияния больших паводков на динамику пойменных островов реки Амур // Вестник Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина. 2023. № 3 (80). С. 158–168. DOI: 10.37724/RSU.2023.80.3.016.

15. Петров Е.С., Новороцкий П.В., Леншин В.Т. Климат Хабаровского края и Еврейской автономной области / отв. ред. д.г.н. А.Н. Махинов. Владивосток; Хабаровск: Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, 2000. 174 с.

16. Шестеркина Н.М., Шестеркин В.П., Таловская В.С., Ри Т.Д. Пространственно-временная изменчивость содержания растворенных форм микроэлементов в водах реки Амур // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 3. С. 336–347. DOI: 10.31857/S0321059620020170.

17. Ильинский О.К. Основные черты летней циркуляции атмосферы над умеренными широтами Восточной Азии // Тр. Первой науч. конф. по общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1962. С. 175–182.

18. Громова Г.Г. Характеристика зональных и меридиональных процессов над Восточной Сибирью и прилегающей частью Тихого океана // Тр. ЦИП. 1962. Вып. 119. С. 104–112.

19. Тросников М.В. Разработка единого метода прогноза погоды на месяц по территории СССР. Отчет по теме НИР. № госрегистрации 68079208. Хабаровск, 1970. 48 с.

20. Шестеркин В.П. Гидрохимия горных озер бассейна реки Амур // Тихоокеанская география. 2022. № 2 (10). С. 50–59. DOI: 10.35735/26870509_2022_10_5.

21. Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. Гидрохимические особенности вод р. Амур у города Хабаровска в период сильного наводнения 2020 года // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 1. С. 97–110. DOI: 10.35567/19994508_2022_1_7.

22. Махинов А.Н., Ким В.И. Влияние изменений климата на гидрологический режим реки Амур // Тихоокеанская география. 2020. № 1 (1). С. 30–39. DOI: 10.35735/7102875.2020.1.1.004.

23. Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. Содержание и сток нитратного азота в воде реки Амур у Хабаровска в период очень сильных наводнений // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. 2021. № 9. С. 213–218. DOI: 10.25221/levanidov.09.23.
24. Махинов А.Н. Основные факторы формирования катастрофических наводнений в бассейне реки Амур в 2013 году // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. 2014. № 6. С. 435–442.
25. Махинов А.Н., Лю Ш., Ким В.И., Махинова А.Ф. Особенности больших наводнений на реке Амур в период высокой водности 2009–2021 гг. // Тихоокеанская география. 2023. № 1 (13). С. 66–74. DOI: 10.35735/26870509_2023_13_6.
26. Ким Л.В., Назарова А.А. Анализ земель аграрного сектора Хабаровского края в разрезе муниципальных образований // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 2/1 (116). С. 80–83. DOI: 10.23670/IRJ.2022.116.2.013.
27. Ливеровский Ю.А. Почвы СССР: географическая характеристика. М.: Мысль, 1974. 462 с.
28. Рябец В.К., Миронова О.Ю. Состояние плодородия почв в Хабаровском крае // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30. № 7. С. 48–52.
29. Басистый В.П. Основы почвоведения. Почвы российского Дальнего Востока = Почвы российского Дальнего Востока: учебное пособие. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2008. 171 с. ISBN 978-5-7389-0683-1.
30. Цыренова Д.Ю., Касаткина А.П. Экологическая структура флоры прибрежных отмелей реки Амур вблизи Хабаровска (Нижний Амур) // Ученые записки Забайкальского государственного гуманитарно-педагогического университета им. Н.Г. Чернышевского. 2013. № 1 (48). С. 58–72.
31. Костенко В.А. Грызуны (Rodentia) Дальнего Востока России / автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.08. Владивосток, 1997. 46 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000014828> (дата обращения: 24.03.2025).
32. Нестеренко В.А. Насекомоядные юга Дальнего Востока и их сообщества = Insectivores of the south far East and their communities. Владивосток: Дальнаука, 1999. 172 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000620901> (дата обращения: 24.03.2025).
33. Павлинов И.Я., Крускоп С.В., Варшавский А.А., Борисенко А.В. Наземные звери России: справочник-определитель // Зоол. музей МГУ. М.: КМК, 2002. 298 с. (Определители по флоре и фауне России; Вып. 2). ISBN 5-87317-094-0. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000959674> (дата обращения: 24.03.2025).
34. Лапин А.С. Мелкие млекопитающие южной части Хабаровского края и Еврейской автономной области: фауна, экология, эпизоотологическое значение: специальность 03.02.08 «Экология (по отраслям)» / автореф. дис. ... канд. биол. наук. Хабаровск, 2013. 24 с.

REFERENCES

1. Shatrubova E., Baryshnikov P. Prirodnaya ochagovost' leptospiroza v gornykh raionakh yuga Zapadnoi Sibiri. *Veterinariya Sel'skokhozyaistvennykh Zhivotnykh*. 2019;(4):9–14. (In Russ.).
2. Ostyakova M.E., Emel'yanov O.N. Leptospiroz prirodnikh i antropourgicheskikh ochagov Khabarovskogo kraia. *Vestnik Ul'yanovskoi Gosudarstvennoi Sel'skokhozyaistvennoi Akademii*. 2023;64(4):97–102. (In Russ.). DOI: 10.18286/1816-4501-2023-4-97-102.
3. Istomin A.V. Rol' rannikh stadii poslerubochnykh suksessii v podderzhanii prirodnikh ochagov leptospiroza v tsentral'noi chasti Kaspiisko-Baltiiskogo vodorazdela. *Ehkosistemy*. 2023;(34):59–66. (In Russ.). EDN: BCQRQD.
4. Patent № 2202608 C2 Rossiiskaya Federatsiya, MPK C12N 1/20, C12Q 1/04. Sposob kul'tivirovaniya leptospir / V.I. Sit'kov, V.I. Zaerko, A.P. Surmilo i dr.; заявитель Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatie "Stavropol'skaya biofabrika"; № 2000120149/13; заявл. 27.07.2000; opubl. 20.04.2003. (In Russ.).
5. Nazarova O.D., Muminov A.A., Dzhumaev Sh.N. O prirodnoi ochagovosti leptospiroznoi infektsii v Tadjikistane. *Sel'skokhozyaistvennyye Tekhnologii*. 2019;1(3):35–40. (In Russ.). DOI: 10.35599/agritech/01.03.05.
6. Nekrasova L.E., Ajkimbaev A.M., MekaMechenko T.V. et al. Svyaz' zabolevaemosti lyudej nekotorymi zoonozami v g. Almaty s epizooticheskim fonom sredi gryzunov. In: *Problemy ohrany zdorov'ya naseleniya RK: Tez. dokl. I s"ezda vrachej Kazakhstana* (g. Almaty, 22–23 noyabrya 1997 g.). Almaty; 1997. S. 347. (In Russ.).

7. Makarov V.V. Global'naya chpizootologiya. *Rossiiskii Veterinarnyi Zhurnal*. 2019;(6):26–35. (In Russ.). DOI: 10.32416/2500-4379-2019-6-26-35.
8. Polishchuk S.V., Bychenko D.D. Landshaftno-geograficheskie i prirodno-klimaticheskie usloviya dlya formirovaniya prirodnykh ochagov leptospiroza v Respublike Krym na primere Dzhankoiskogo raiona i Prisivash'ya. *Izvestiya Sel'skokhozyaistvennoi Nauki Tavridy*. 2021;191(28):125–137. (In Russ.).
9. Lidzhi-Garyaeva G.V., Yashkulov K.B., Obrotkina N.F. Sostoyanie prirodnykh i antropurgicheskikh ochagov leptospiroza v Respublike Kalmykiya. *Dal'nevostochnyi Zhurnal Infektsionnoi Patologii*. 2019;37(37):71–72. (In Russ.).
10. Trankvilevskii D.V., Kiseleva E.Yu., Korzun V.M., Breneva N.V., Verzhutskaya Yu.A., Zarva I.D., Skudareva O.N., Balakhonov S.V. Ehpizootologo-ehpidemiologicheskaya situatsiya po leptospirozam v Rossiiskoi Federatsii v period s 2013 po 2022 g. i prognoz na 2023 g. *Problemy Osobo Opasnykh Infektsii*. 2023;3. (In Russ.).
11. Ostyakova M.E., Litvinova Z.A., Emel'yanov O.N. Diagnostika i profilaktika leptospiroza zhivotnykh v Khabarovskom krae: nauchno-prakticheskie rekomendatsii. Blagoveshchensk: Dal'nevostochnyi GAU; 2023. 44 s. (In Russ.). ISBN 978-5-9642-0574-6.
12. Romanenko O.A., Timchenko L.D., Zaerko V.I. Problemy proizvodstvennogo kul'tivirovaniya leptospir i puti ikh resheniya. *Veterinarnaya Patologiya*. 2013;45(3):49–53. (In Russ.).
13. Anan'ina Yu.V. Leptospirozy v Rossiiskoi Federatsii: sovremennye osobennosti ehpidemicheskogo proyavleniya prirodnykh i tekhnogennykh ochagov. *Veterinarnaya Patologiya*. 2004;11(4). (In Russ.).
14. Makhinov A.N., Makhinova A.F. Osobennosti vliyaniya bol'shikh pavodkov na dinamiku poimennykh ostrovov reki Amur. *Vestnik Ryazanskogo Gosudarstvennogo Universiteta imeni S.A. Esenina*. 2023;80(3):158–168. (In Russ.). DOI: 10.37724/RSU.2023.80.3.016.
15. Petrov E.S., Novorotskii P.V., Lenshin V.T. Klimat Khabarovskogo kraia i Evreiskoi avtonomnoi oblasti. Vladivostok; Khabarovsk: Institut Vodnykh i Ehkologicheskikh Problem DVO RAN; 2000. 174 s. (In Russ.).
16. Shesterkina N.M., Shesterkin V.P., Talovskaya V.S., Ri T.D. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' soderzhaniya rastvorenykh form mikroehlementov v vodakh reki Amur. *Vodnye Resursy*. 2020;47(3):336–347. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0321059620020170.
17. Il'inskij O.K. Osnovnye cherty letnej cirkulyatsii atmosfery nad umerennymi shirotami Vostochnoj Azii. In: Tr. Pervoj nauch. konf. po obshchej cirkulyatsii atmosfery. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1962. S. 175–182. (In Russ.).
18. Gromova G.G. Harakteristika zonal'nykh i meridional'nykh processov nad Vostochnoj Sibir'yu i prilgayushchej chast'yu Tihogo okeana. *Tr. CIP*. 1962;119:104–112. (In Russ.).
19. Trosnikov M.V. Razrabotka edinogo metoda prognoza pogody na mesyac po territorii SSSR. Otchet po teme NIR. № Gosregistratsii 68079208. Khabarovsk; 1970. 48 s. (In Russ.).
20. Shesterkin V.P. Gidrokhiimiya gornyykh ozer basseina reki Amur. *Tikhookeanskaya Geografiya*. 2022;10(2):50–59. (In Russ.). DOI: 10.35735/26870509_2022_10_5.
21. Shesterkin V.P., Shesterkina N.M. Gidrokhimicheskie osobennosti vod r. Amur u goroda Khabarovska v period sil'nogo navodneniya 2020 goda. *Vodnoe Khozyaistvo Rossii: Problemy, Tekhnologii, Upravlenie*. 2022;91:97–110. (In Russ.). DOI: 10.35567/19994508_2022_1_7.
22. Makhinov A.N., Kim V.I. Vliyanie izmenenii klimata na gidrologicheskii rezhim reki Amur. *Tikhookeanskaya Geografiya*. 2020;1(1):30–39. (In Russ.). DOI: 10.35735/7102875.2020.1.1.004.
23. Shesterkin V.P., Shesterkina N.M. Soderzhanie i stok nitratnogo azota v vode reki Amur u Khabarovska v period ochen' sil'nykh navodnenii. *Chteniya Pamyati Vladimira Yakovlevicha Levanidova*. 2021;99:213–218. (In Russ.). DOI: 10.25221/levanidov.09.23.
24. Makhinov A.N. Osnovnye faktory formirovaniya katastroficheskikh navodnenii v basseine reki Amur v 2013 godu. *Chteniya Pamyati Vladimira Yakovlevicha Levanidova*. 2014;96:435–442. (In Russ.).
25. Makhinov A.N., Lyu Sh., Kim V.I., Makhinova A.F. Osobennosti bol'shikh navodnenii na reke Amur v period vysokoi vodnosti 2009–2021 gg. *Tikhookeanskaya Geografiya*. 2023;13(1):66–74. (In Russ.). DOI: 10.35735/26870509_2023_13_6.
26. Kim L.V., Nazarova A.A. Analiz zemel' agrarnogo sektora Khabarovskogo kraia v razreze munitsipal'nykh obrazovaniy. *Mezhdunarodnyi Nauchno-Issledovatel'skii Zhurnal*. 2022;116(2/1):80–83. (In Russ.). DOI: 10.23670/IRJ.2022.116.2.013.

27. Liverovskij Yu.A. Pochvy SSSR: Geographicheskaja harakteristika. Moscow: Mysl'; 1974. 462 s. (In Russ.).
28. Ryabets V.K., Mironova O.Yu. Sostoyanie plodorodiya pochv v Khabarovskom krae. *Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK*. 2016;30(7):48–52. (In Russ.).
29. Basistyj V.P. Osnovy pochvovedeniya. Pochvy Rossijskogo Dal'nego Vostoka = Pochvy Rossijskogo Dal'nego Vostoka: uchebnoe posobie. Habarovsk: Izd-vo TOGU; 2008. 171 s. (In Russ.). ISBN 978-5-7389-0683-1.
30. Tsyrenova D.Yu., Kasatkina A.P. Ehkologicheskaya struktura flory pribrezhnykh otmelei reki Amur vblizi Khabarovska (Nizhnii Amur). *Uchenye Zapiski Zabaikal'skogo Gosudarstvennogo Gumanitarno-Pedagogicheskogo Universiteta im. N.G. Chernyshevskogo*. 2013;48(1):58–72. (In Russ.).
31. Kostenko V.A. Gryzuny (Rodentia) Dal'nego Vostoka Rossii / avtoreferat dis. ... doktora biologicheskikh nauk: 03.00.08. Vladivostok; 1997. 46 s. (In Russ.). URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000014828> (date of application: March 24, 2025).
32. Nesterenko V.A. Nasekomoyadnye yuga Dal'nego Vostoka i ih soobshchestva = [Insectivores of the souty far East and their communities]. Vladivostok: Dal'nauka; 1999. 172 s. (In Russ.). ISBN 5-7442-1129-2. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000620901> (date of application: March 24, 2025).
33. Pavlinov I.Ya., Kruskop S.V., Varshavskij A.A., Borisenko A.V. Nazemnye zveri Rossii: spravochnik-opredelitel'. Moscow: KMK; 2002. 298 s. (In Russ.). ISBN 5-87317-094-0. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000959674> (date of application: March 24, 2025).
34. Lapin A.S. Melkie mlekopitayushchie yuzhnoi chasti Khabarovskogo kraja i Evreiskoi avtonomnoi oblasti: fauna, ehkologiya, ehpiizootologicheskoe znachenie: spetsial'nost' 03.02.08 "Ehkologiya (po otraslyam)": avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata biologicheskikh nauk. Khabarovsk; 2013. 24 s. (In Russ.).

Научная статья

УДК 633.853.52:631.811(571.6)

DOI: 10.31857/S0869769825030085

EDN: PMWUYF

Перспективы использования регуляторов роста на сое в условиях юга Дальнего Востока

О.В Сырмолот✉, О.Н Теличко

Оксана Викторовна Сырмолот

научный сотрудник

ДВНИИЗР – филиал ФНЦ агrobiотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки,
Приморский край, с. Камень-Рыболов, Россия

oksanaszr@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8318-1382>

Ольга Николаевна Теличко

кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник

ДВНИИЗР – филиал ФНЦ агrobiотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки,
Приморский край, с. Камень-Рыболов, Россия

olgatelichcko@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7948-4949>

Аннотация. Представлены результаты исследований по применению регуляторов роста против грибных болезней на сое в условиях Приморского края. Изучение препаратов производили на растениях сои сорта Бриз. Опыты закладывали на лугово-бурой тяжелосуглинистой почве в ФГБНУ «ФНЦ агrobiотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки». В полевом мелкоделяночном опыте проведена оценка эффективности регуляторов роста Цитодеф-100 и Гиберелон, биостимулятора Биостим Рост. Обработка семян и растений препаратами Цитодеф-100 и Гиберелон способствовала снижению проявлений септориоза на 7,7–7,8%, а биологическая эффективность составила 32,3–32,7%. Регулятор роста Цитодеф-100 (комплексная обработка) обеспечил эффективность против пероноспороза на 45,7% и церкоспороза на 41%. Биологическая эффективность против корневой гнили в вариантах опыта при использовании препаратов составила 32,6–43,5% в фазе полных всходов, 18,5–34,6% – в фазе цветения и 15,4–35,5% – в фазе налива бобов. Высокие показатели урожайности были достигнуты в варианте с применением регулятора роста Цитодеф-100 (4,8 т/га), по сравнению с контролем (3,6 т/га), прибавка составила 1,2 т/га.

Ключевые слова: соя, регуляторы роста, грибные болезни, эффективность, продуктивность, урожайность

Для цитирования: Сырмолот О.В., Теличко О.Н. Перспективы использования регуляторов роста на сое в условиях юга Дальнего Востока // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 3. С. 88–96.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030085>

Prospects of using growth regulators for soybean under the conditions of the south of the Russian Far East

O.V. Syrmolot, O.N. Telichko

Oksana V. Syrmolot

Researcher

FESRIIP – branch of Federal Scientific Center of Agrobiotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, Primorsky Krai, Kamen-Rybolov vil., Russia
oksanaszr@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8318-1382>

Ol'ga N. Telichko

Candidate of Sciences in Agriculture, Leading Researcher

FESRIIP – branch of Federal Scientific Center of Agrobiotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, Primorsky Krai, Kamen-Rybolov vil., Russia
olgatelichko@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7948-4949>

Abstract. The paper presents the results of a study on the use of growth regulators against fungal diseases and root rot diseases of soybean under the conditions of Primorsky Territory. The bioproducts were tested on plants of soybean variety Briz. The experiments were performed in meadow-brown clay soil at FSBSI “FSC of Agrobiotechnology of the Far East named after A.K. Chaika”. The small-plot experiment was aimed at evaluating the efficacy of growth regulators Cytodef-100 and Giberelon and biostimulator Biosteam Rost. Treating seeds with Cytodef-100 and Giberelon decreased the progression of Septoria leaf spot by 7,7–7,8%; the biological efficacy was 32,3–32,7%. The efficacy of the growth regulator Cytodef-100 (a complex treatment) reached 45,7% against downy mildew and 41% against Cercospora leaf blight. The biological efficacy of the studied bioproducts against root rot varied within 32,6–43,5% at the emergence stage, 18,5–34,6% at the blooming stage, and 15,4–35,5% at the full pod stage. The highest yield was achieved in the variant with Cytodef-100 (4,8 t/ha). The yield gain was 1,2 t/ha compared to the control (3,6 t/ha).

Keywords: soybean, growth regulators, fungal diseases, efficacy, productivity, yield

For citation: Syrmolot O.V., Telichko O.N. Prospects of using growth regulators for soybean under the conditions of the south of the Russian Far East. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(3):88–96. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030085>

Введение

Ввиду роста населения Земли и все более заметного ущерба, наносимого окружающей среде вследствие хозяйственной деятельности человека, связанной с производством продовольствия, очень важным для выживания человечества является оптимизация производства и использования пищевых ресурсов. Соя в этом плане – незаменимая и важная продовольственная культура. Поэтому одной из основных задач является повышение урожайности и качества этой культуры. Одна из причин, снижающих урожайность сои, – поражение ее болезнями [1, 2].

Современное сельскохозяйственное производство все чаще ориентируется на разработку экологически безопасных методов защиты растений, а именно на биоло-

гический метод. Этот метод занимает важное место в интегрированной системе защиты растений, так как по сравнению с химическим не ведет к загрязнению сельскохозяйственной продукции и окружающей среды [3, 4]. Регуляторы роста играют значительную роль в жизни сельскохозяйственных культур: усиливают их рост и развитие, ускоряют созревание, повышают урожайность и устойчивость растений к экологическим стрессам, болезням, вредителям [5–7]. Использование регуляторов роста растений в технологии возделывания сои в условиях Ростовской области позволило увеличивать урожайность зерна на 20–60% и улучшать качество продукции. Применение Гибберелона при предпосевной обработке сои в Афганистане оказало положительное влияние на количество ветвей на растении, высоту растений и урожайность зерна [8, 9].

Цель исследований – оценить эффективность регуляторов роста в снижении пораженности сои болезнями и установить их влияние на формирование урожайности культуры в условиях степной зоны Приморского края.

Материал и методы

Полевые опыты были заложены в 2023 г. на полях отдела семеноводства ФГБНУ «ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки» (пос. Тимирязевский Уссурийского района) на посевах сои сорта Бриз. Проведено испытание регуляторов роста: Гибберелон, ВРП (гиббереллиновые кислоты, 40 г/кг); Цитодеф-100, ВРП (N-(1,2,4-триазол-4-ил)-N'-фенилмочевины, 100 г/кг); биоудобрение: Биостим Рост, Ж (минерально-аминокислотный комплекс).

Схема опыта включала следующие варианты: 1 – контроль (без обработки); 2 – обработка семян Цирконом-100 (300 г/т); 3 – обработка семян и опрыскивание вегетирующих растений Цирконом-100 (300 г/т; 80 г/га); 4 – обработка семян Гибберелоном (80 г/т); 5 – обработка семян и опрыскивание растений Гибберелоном (80 г/т; 80 г/га); 6 – опрыскивание растений препаратом Биостим Рост (1,0 л/га). Норма высева семян 500 тыс. шт./га, площадь одной делянки 10 м². Повторность опыта четырехкратная, размещение делянок систематическое. Посев сои производился сеялкой СКС 6-10. Уборку осуществляли вручную. Опрыскивание растений проводилось в фазу бутонизации – начала цветения ручным пневматическим опрыскивателем марки ОП-207.

Почва опытного участка лугово-бурая, по механическому составу – тяжелые суглинки. Содержание гумуса в почве – 3,13%, легкогидролизуемого азота – 95,0 мг/кг почвы, Р₂О₅ – 141,2 мг/кг, рН солевой вытяжки – 5,3. Предшественник – зерновые.

Агротехника возделывания сои в опыте была общепринятой для Приморского края. Опыт заложен в соответствии методиками [10, 11]. Учеты и наблюдения проводили по методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур с использованием полевого метода [12, 13]. Биометрические показатели определяли по методике [14]. Статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась методами дисперсионного, корреляционного анализов.

Агрометеорологические условия 2023 г. характеризовались повышенной температурой и периодами избыточного увлажнения по сравнению со среднеголетней нормой, что благоприятствовало развитию болезней. Сумма активных температур свыше 10°C в 2023 г. с мая по сентябрь составила 2926,9°C, а сумма осадков за аналогичный период – 833,5 мм, что на 368,5 мм больше по сравнению со среднеголетним значением (табл. 1). Период вегетации характеризуется как избыточно влажный (величина ГТК – 2,9).

Таблица 1

Метеорологические условия вегетационного периода 2023 г.

Месяц	Среднесуточная температура воздуха, °С				Средне-многолетняя	Сумма осадков, мм				Средне-многолетняя
	декада			за месяц		декада			за месяц	
	I	II	III			I	II	III		
Май	12,9	13,0	15,7	13,9	13,1	0,5	12,1	11,5	24,1	51,0
Июнь	16,5	19,3	20,1	18,6	17,7	76,3	28,1	89,6	194,0	81,0
Июль	20,9	20,9	25,4	22,5	23,8	96,4	42,3	8,8	147,5	90,0
Август	22,6	23,3	21,5	22,5	22,0	115,6	125,6	220,5	461,7	134,0
Сентябрь	20,6	18,1	15,5	18,1	16,9	5,1	0,3	0,8	6,2	104,0



Вариант опыта	Распростра-ненность, %	Развитие, %	Биологическая эффективность, %
Контроль (без обработки)	83,5	23,8	
Обработка семян, Цитодеф-100	82,1	17,3	27,3
Обработка семян и опрыскивание растений, Цитодеф-100	81,7	16	32,7
Обработка семян, Гибберелон	81	16,6	30,2
Обработка семян и опрыскивание растений, Гибберелон	77,1	16,1	32,3
Опрыскивание растений, Биостим Рост	83,2	17,4	26,8

Рис. 1. Влияние биопрепаратов на динамику развития и распространенности септориоза, 2023 г.



Вариант опыта	Распростра- ненность, %	Развитие, %	Биологическая эффективность, %
Контроль (без обработки)	75	16,6	
Обработка семян, Цитодеф-100	56,8	10,3	37,9
Обработка семян и опрыскивание растений, Цитодеф-100	56,2	9	45,7
Обработка семян, Гибберелон	59,3	10,3	37,9
Обработка семян и опрыскивание растений, Гибберелон	55,6	9,4	43,3
Опрыскивание растений, Биостим Рост	56,8	9,6	42,1

Рис. 2. Влияние биопрепаратов на динамику развития и распространенности пероноспороза, 2023 г.

Результаты и обсуждение

В Приморье муссонный климат при высокой температуре и влажности воздуха служит причиной распространения значительного числа инфекций у сои. Патогенный комплекс в наших посевах сои был представлен септориозом (*Septoria glycines* Hemmi), пероноспорозом (*Peronospora manshurica* Naum) и церкоспорозом (*Cercospora sojina* Nara). Первые признаки *Septoria glycines* Hemmi проявились в фазу примордиальных листьев сои. Распространенность болезни на всех вариантах снижалась по сравнению с контролем на 0,3–0,4%. Установлено, что применение биопрепарата и регуляторов роста способствовало снижению интенсивности развития заболевания на 6,5–7,8% относительно контроля (23,8%). Лучшие результаты отмечены в вариантах при комплексной обработке сои биопрепаратами Цитодеф-100 и Гибберелон, где биологическая эффективность составила 32,7 и 32,3% (рис. 1).



Вариант опыта	Распростра- ненность, %	Развитие, %	Биологическая эффективность, %
Контроль (без обработки)	80,6	14,6	
Обработка семян, Цитодеф-100	73,7	9,4	35,6
Обработка семян и опрыскивание растений, Цитодеф-100	63,1	8,6	41
Обработка семян, Гибберелон	75	9,5	34,9
Обработка семян и опрыскивание растений, Гибберелон	66,8	9,2	36,9
Опрыскивание растений, Биостим Рост	69,3	8,7	40,4

Рис. 3. Влияние биопрепаратов на динамику развития и распространенности церкоспороза, 2023 г.

Для вегетационного периода характерно более позднее появление пероноспорова (первые признаки отмечены во II декаде июля). Распространенность *Pero-nospora manshurica* Naum по вариантам опыта составила 55,6–59,3%, против 75,0% в контроле (рис. 2). Наибольшую биологическую эффективность (45,7%) проявил вариант при комплексной обработке регулятором роста Цитодеф-100.

Распространенность церкоспороза по вариантам опыта составила 63,1–75,0%, в контрольном варианте – 80,6% (рис. 3). *Cercospora soja* Nara не получил широкого развития. Минимальное поражение растений церкоспорозом отмечалось при комплексном применении регулятора роста Цитодеф-100 – 8,6%. Биологическая эффективность по вариантам опыта составила от 34,9 до 41,0%.

Биопрепарат и регуляторы роста во всех комбинациях эффективно снижали интенсивность развития корневой гнили (табл. 2). Степень развития корневых гнилей в фазу полных всходов сои в исследуемых вариантах достоверно уменьшалась на 5,1–6,8% в сравнении с контролем (15,6%). В фазу цветения развитие корневых гнилей возросло на 7,3–13,6%. В фазу налива бобов препараты способствовали снижению интенсивности развития заболевания на 8,7–20,0% относительно контроля.

Таблица 2

Влияние препаратов на развитие корневых гнилей сои, 2023 г.

Вариант опыта	Интенсивность развития болезни, %, в фазу			Биологическая эффективность, %, в фазу		
	полных всходов	начала цветения	налива бобов	полных всходов	начала цветения	налива бобов
Контроль	15,6	39,3	56,2			
Обработка семян, Цитодеф-100	9,6	31,8	47,5	38,4	19,0	15,4
Обработка семян и опрыскивание растений, Цитодеф-100	8,8	28,1	40,0	43,5	28,4	28,8
Обработка семян, Гиберелон	10,5	27,5	40,6	32,6	30,0	27,7
Обработка семян и опрыскивание растений, Гиберелон	9,1	32,0	36,2	41,6	18,5	35,5
Опрыскивание растений, Биостим Рост	9,4	25,7	44,3	39,7	34,6	21,1
НСР ₀₅	3,5	5,4	4,8	1,8	1,5	1,1

Таблица 3

Влияние препаратов на структуру урожая и продуктивность сои, 2023 г.

Вариант опыта	Количество бобов на 1 растение, шт.	Масса семян с 1 растения, г	Масса 1000 семян, шт.	Биологическая урожайность, т/га
Контроль	22,8	6,8	172,2	3,6
Обработка семян, Цитодеф-100	31,3	9,6	189,7	4,5
Обработка семян и опрыскивание растений, Цитодеф-100	28,9	8,5	206,5	4,8
Обработка семян, Гиберелон	33,4	8,7	192,7	4,3
Обработка семян и опрыскивание растений, Гиберелон	32,8	10,2	200,7	4,7
Опрыскивание растений, Биостим Рост	34,5	8,9	197,2	4,6
НСР ₀₅	2,7	0,8	11,3	0,3

Наиболее высокую фунгицидную активность в фазу всходов проявил препарат Цитодеф-100 (комплексная обработка) – 43,5%, в фазу цветения – Биостим Рост – 34,6%, в фазу налива бобов – Гиберелон (комплексная обработка) – 35,5%.

Анализ продуктивных качеств сои показал, что биопрепараты обеспечили достоверный прирост урожайности по отношению к контролю (табл. 3). Максимальная прибавка 1,2 т/га получена при обработке семян и опрыскивании растений Цитодефом-100.

Биопрепараты оказали положительное влияние и на элементы структуры урожая, которые способствовали увеличению количества бобов на 6,1–11,7 шт. с 1 растения и массы 1000 семян – на 17,5–34,3 г по отношению к контрольному варианту.

Заклучение

Проведенные испытания биологических препаратов в посевах сои позволили определить их высокую результативность в отношении контроля листовых болезней и увеличении урожайности культуры. Изучаемые препараты значительно снизили интенсивность развития септориоза на 6,5–7,8%, пероноспороза – 6,3–7,6%, церкоспороза – 5,1–6,0%. Использование биопрепаратов способствовало достоверному увеличению массы 1000 семян по сравнению с контролем на 10,2–19,9%. По вариантам опыта прибавка урожайности семян к контрольному варианту составила 0,7–1,2 т/га при урожайности в контроле 3,6 т/га.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Rizzo G., Baroni L. Soy, soy foods and their role in vegetarian diets // *Nutrients*. 2018. No. 10. P. 43–47.
2. Заверюхин В.И., Левандовский И.Л. Производство и использование сои. Киев: Урожай, 1988. 112 с.
3. Дубков А.А., Тимошинов Р.В., Кушаева Е.Ж., Клыков А.Г. Влияние микроудобрений и регуляторов роста на урожайность сои в условиях Приморского края // *Аграрная наука*. 2023. № 376 (11). С. 93–97.
4. Монастырский О.А. Биологизация защиты растений: отставание России становится все более очевидным // *Защита и карантин растений*. 2007. № 3. С. 20–21.
5. Syrmolot O., Telichko O., Belova T., Lastushkina E. Results of an experiment on the use of bio-products for soybean cultivation under the conditions of Primorsky Kray // *BIO Web of Conferences*. 2023. Vol. 71. 01059. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237101059>
6. Завалин А.А. Применение биопрепаратов при возделывании полевых культур // *Достижения науки и техники АПК*. 2011. № 8. С. 9–11.
7. Jian Wang, Faisal Islam, Chong Yang et al. Use of phytohormones is improving abiotic stress tolerance in rice // *Advances in Rice Research for Abiotic Stress Tolerance*. London: Elsevier, 2018. P. 651–675.
8. Петриченко В.Н., Логинов С.В., Туркина О.С. Применение регуляторов роста растений на посевах сои // *Агрохимический вестник*. 2017. № 6. С. 47–49.
9. Османи М.Х. Влияние гиббереллина на рост и развитие сои в Афганистане // *Агрохимический вестник*. 2024. № 1. С. 95–97. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2024-1-016>
10. Адаптивные и прогрессивные технологии возделывания сои и кукурузы на Дальнем Востоке: метод. рекомендации / сост. А.К. Чайка, В.А. Тильба, А.А. Моисеенко и др. Владивосток: Дальнаука, 2009. 159 с.
11. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта: (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2014. 351 с.
12. Sinclair J. Compendium of Soybean Diseases. Saint Paul, Minnesota: American Phytopathological Society, 1982. 104 p.
13. Методика государственного сортоиспытания с.-х. культур. Вып. 2. М.: Сельхозиздат, 1989. 194 с.
14. Удольская Н.Л. Введение в биометрию. Алма-Ата: Наука, 1976. С. 35–48.

REFERENCES

1. Rizzo G., Baroni L. Soy, soy foods and their role in vegetarian diets. *Nutrients*. 2018;(10):43–47.
2. Zaveryukhin V.I., Levandovskii I.L. Proizvodstvo i ispol'zovanie soi = [Production and use of soybean]. Kiev: Urozhai; 1988. 112 p. (In Russ.).
3. Dubkov A.A., Timoshinov R.V., Kushaeva E.Zh., Klykov A.G. Influence of micronutrient fertilizers and growth regulators on soybean yield under the conditions of Primorsky Kray. *Agrarian Science*. 2023;376(11):93–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-376-11-93-97>
4. Monastyrskii O.A. Biologizatsiya zashchity rastenii: otstavanie Rossii stanovitsya vse bolee ochevidnym = [Biological protection of plants: the disadvantage of Russia is becoming more obvious]. *Zashchita i Karantin Rastenii*. 2007;(3):20–21. (In Russ.).

5. Syrmolot O., Telichko O., Belova T., Lastushkina E. Results of an experiment on the use of bio-products for soybean cultivation under the conditions of Primorsky Kray. *BIO Web of Conferences*. 2023;71. 01059. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237101059>.
6. Zavalin A.A. The use of biologics in the cultivation of field crops. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2011;(8):9–11. (In Russ.).
7. Jian Wang, Faisal Islam, Chong Yang et al. Use of phytohormones is improving abiotic stress tolerance in rice. In: *Advances in Rice Research for Abiotic Stress Tolerance*. London: Elsevier; 2018. P. 651–675.
8. Petrichenko V.N., Loginov S.V., Turkin O.S. Application of plant growth regulators on soya bean crops. *Agrochemical Bulletin*. 2017;(6):47–49. (In Russ.).
9. Osmani M.H. Influence of gibberellin on the growth and development of soybean in Afghanistan. *Agrochemical Bulletin*. 2024;(1):95–97. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2024-1-016>
10. Chaika A.K., Til'ba V.A., Moiseenko A.A. et al. (Eds.). *Adaptivnye i progressivnye tekhnologii vozdevlyaniya soi i kukuruzy na Dal'nem Vostoke: metod. rekomendatsii* = [Adaptive and innovative technologies of soybean and corn production in the Russian Far East]. Vladivostok: Dal'nauka; 2009. 159 p. (In Russ.).
11. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta: (s osnovami statisticheskoi obrabotki rezul'tatov issledovaniy)* = [Methods of field experiments: (with the basics of statistical processing of research data)]. 5th ed. Moscow: Al'yans; 2014. 351 p. (In Russ.).
12. Sinclair J. *Compendium of Soybean Diseases*. Saint Paul, Minnesota: American Phytopathological Society; 1982. 104 p.
13. *Methodology of the state variety testing of agricultural crops*. Issue 2. Moscow; 1989. P. 30–38. (In Russ.).
14. Udolskaya N.L. *Introduction to biometrics*. Alma-Ata: Nauka; 1976. P. 35–48. (In Russ.).

Научная статья

УДК 637

DOI: 10.31857/S0869769825030096

EDN: PMYQCU

Влияние некоторых факторов (сезон и возраст первого отела, происхождение по отцу, продолжительность хозяйственного использования) на молочную продуктивность коров на фермах Среднего Приамурья

Н.Ф. Ключникова[✉], М.Т. Ключников, Е.М. Ключникова

Наталья Федоровна Ключникова

доктор сельскохозяйственных наук, заместитель директора по науке
Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения РАН,
Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства,
Хабаровск, Россия
nauka1952@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-0510-1196>

Михаил Тихонович Ключников

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник
Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения РАН,
Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства,
Хабаровск, Россия
nauka1952@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-7609-382X>

Елена Михайловна Ключникова

научный сотрудник
Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения РАН,
Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства,
Хабаровск, Россия
nauka1952@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9861-8738>

Аннотация. Представлены результаты анализа первичного зоотехнического учета на двух молочных фермах Хабаровского края. Определены биологические резервы повышения эффективности производства молока путем устранения неравномерного распределения отелов по сезонам года, снижения возраста первого отела до 27 месяцев и повышения продолжительности продуктивного периода у коров до 5 и более отелов.

Ключевые слова: возраст отела, лактация, черно-пестрая порода, голштинская порода, продолжительность жизни

Для цитирования: Ключникова Н.Ф., Ключников М.Т., Ключникова Е.М. Влияние некоторых факторов (сезон и возраст первого отела, происхождение по отцу, продолжительность хозяйственного использования) на молочную продуктивность коров на фермах Среднего Приамурья // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 3. С. 97–103.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030096>

Original article

The influence of some factors (season and age of the first calving, paternal origin, duration of economic use) on milk productivity of cows on farms in the Middle Amur Region

N.F. Klyuchnikova, M.T. Klyuchnikov, E.M. Klyuchnikova

Nataliya F. Klyuchnikova

Doctor of Sciences in Agriculture, Deputy Director for Science
Khabarovsk Federal Research Center, FEB RAS, Far Eastern Agricultural Research Institute,
Khabarovsk, Russia
nauka1952@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-0510-1196>

Mikhail T. Klyuchnikov

Candidate of Sciences in Agriculture, Senior Researcher
Khabarovsk Federal Research Center, FEB RAS, Far Eastern Agricultural Research Institute,
Khabarovsk, Russia
nauka1952@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-7609-382X>

Elena M. Klyuchnikova

Researcher
Khabarovsk Federal Research Center, FEB RAS, Far Eastern Agricultural Research Institute,
Khabarovsk, Russia
nauka1952@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9861-8738>

Abstract. The results of analysis of the primary zootechnical registration in two dairy farms of the Khabarovsk region are presented. The biological reserves of raising the economic efficiency of milk production by means of elimination of incorrect distribution of calvings by year seasons, lowering of the first calving age to 27 months and the cow productivity period raising to 5 and more calvings for Black-and-White breed are determined.

Keywords: calving age, lactation, Black-and-White breed, Holstein breed, life duration

For citation: Klyuchnikova N.F., Klyuchnikov M.T., Klyuchnikova E.M. The influence of some factors (season and age of the first calving, paternal origin, duration of economic use) on milk productivity of cows on farms in the Middle Amur Region. *Vestnik of FEB RAS*. 2025;(3):97–103. (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030096>

Введение

Молочное скотоводство Дальнего Востока занимает ведущую роль в сельском хозяйстве благодаря природно-экономическим особенностям региона и удивительной способности крупного рогатого скота перерабатывать

остатки растениеводства, сено, траву в ценные продукты питания. Биологическая и питательная ценность продуктов животноводства определяется их химическим составом. Наиболее ценный продукт животноводства – молоко. Питательные вещества молока (жир, белок, углеводы, витамины, минеральные вещества) легко перевариваются и усваиваются организмом. Вместе с тем молочное скотоводство региона находится под давлением многочисленных проблем. Среди них следует отметить короткий срок хозяйственного использования коров, неравномерное распределение отелов по сезонам года, возраст первого отела. В среднем по региону длительность продуктивного периода менее трех лактаций. В странах с развитым молочным скотоводством срок продуктивного использования коров составляет 4–4,5 лактаций. Экономические расчеты показывают, что корова окупает расходы на выращивание при использовании не менее 4–6 лактаций. В Российской Федерации в настоящее время возраст коров черно-пестрой породы составляет 2,53 отела, возраст выбытия – 3,33 отела, голштинской породы черно-пестрой масти – соответственно, 2,16 и 2,79 отела [1]. Среди всех регионов страны Дальневосточный регион занимает одно из последних мест по уровню молочной продуктивности, выходу телят, величине сервис-периода, по возрасту в отелах и возрасту выбытия [2–4]. Назрела необходимость коренных преобразований экономики, в том числе сельского хозяйства Дальневосточного региона. По мнению А.С. Шелепа [5], целесообразно не восстанавливать в прежних объемах производство свинины, мяса птицы, а сосредоточить все возможности на решении полного удовлетворения потребности местного населения в цельномолочной продукции и диетическом яйце, завоз которых сопряжен с большими затратами. В условиях «открытого» рынка продовольствия перестройка отрасли животноводства потребует больших инвестиций, нового экономического и технологического мышления. В современном мире конкуренции за рынки сбыта любые, даже малые технологические просчеты неизбежно ведут к снижению конкурентоспособности товара.

Цель работы – установить значимость некоторых биологических особенностей крупного рогатого скота в технологии производства молока.

Объекты и методы исследований

Объект исследования – крупный рогатый скот черно-пестрой, голштинской пород, а также их помеси разной кровности. Предмет изучения – возраст первого отела, молочная продуктивность за первую и последующие лактации, продуктивное долголетие, воспроизводительная способность.

Исследования проведены на молочных фермах Хабаровского края. Источник информации – данные первичного зоотехнического учета на молочных фермах за ряд лет.

Результаты

Несмотря на то что молочное скотоводство является одной из ведущих отраслей сельского хозяйства Дальневосточного региона, биологические ресурсы этого вида используются в регионе крайне ограниченно [6]. Среди множества проблем и технологических ошибок молочного скотоводства авторы изучили влияние сезона и возраста первого отела и продолжительность хозяйственного использования коров. На малых и средних фермах традиционно используется

стойлово-пастбищное содержание коров, что, несомненно, вызывает неравномерное распределение отелов по сезонам года. Из 2612 учтенных коров за ряд лет на ферме «Восточное» зимой отелилось 25,9%, весной – 40,6%, летом – 16,1%, осенью – 17,4%. Количество молока за 305 дней первой лактации в среднем от каждой коровы с учетом сезона отела составило, соответственно, 4331, 4130, 4012 и 4505 кг молока. Таким образом, от каждой первотелки летнего отела получено на 493 кг меньше, чем от сверстниц осенних отелов. В итоге ферма недополучила 207 т молока.

При анализе продуктивности первотелок голштинской породы результаты были аналогичными (табл. 1).

После летних отелов удой оказался меньше в среднем на 36,2% по сравнению с группой сверстниц осеннего отела. Независимо от происхождения по отцу сезонная изменчивость имела такую же направленность. У дочерей Лемана различие в удое составило более 148%.

Не менее важное значение имеет возраст первого отела. Принято считать, чем раньше отел, тем меньше затрат на выращивание первотелки и ниже себестоимость молока. Для черно-пестрой и голштинской пород крупного рогатого скота оптимальный возраст первого отела принято считать до 27 мес. На ферме «Восточное» из 2612 особей таких первотелок оказалось 40,96% (табл. 2).

Более того, 28,87% нетелей отелилось в возрасте старше 30 мес., в том числе 540 особей спустя 34 мес. после рождения. Это свидетельствует о неудовлетворительной организации воспроизводства и содержания дойного стада. Поэтому величина удоя первотелок практически не зависела от возраста отела. При увеличении его на 22,6% продуктивность повышалась всего на 3,9%. Особо следует отметить 99 коров, которые отелились на 23-м месяце. Средний удой по данной

Таблица 1

Сезонная изменчивость продуктивности первотелок дочерей разных отцов

Кличка отца	Показатель	Сезон отела			
		Зима	Весна	Лето	Осень
Джуг	Отелилось дочерей	25	27	19	6
	Удой за 305 дней, кг	2832,8	2474,6	2581,6	3117,2
	Сервис-период, дни	192,3	223,1	210,2	197,8
Чародей	Отелилось дочерей	7	6	10	5
	Удой за 305 дней, кг	3340,0	2908,3	2571,7	3732,0
	Сервис-период, дни	167,3	256,3	267,4	175,6
Леман	Отелилось дочерей	5	14	8	4
	Удой за 305 дней, кг	3996,0	3516,7	2594,4	3845,0
	Сервис-период, дни	190,0	224,5	260,0	146,0
Всего	Отелилось дочерей	37	47	37	15
	Удой за 305 дней, кг	3085,9	2698,7	2581,7	3516,2
	Сервис-период, дни	187,7	217,9	244,2	176,5

Таблица 2

Продуктивность первотелок в зависимости от возраста отела

Возраст 1-го отела, мес.	Количество голов	%	Удой за 305 дней, кг
До 27	1070	40,96	4345,3
27,1–30,0	788	30,17	4457,3
30,1 и более	754	28,87	4514,6
Итого	2612	100,0	4428,0

группе составил 4445,0 кг молока, что не ниже среднего по всему учетному поголовью. При этом затраты на их выращивание оказались значительно меньше. Это выгодно, но в условиях фермы ранний отел вызвал многочисленные различные болезни, в частности органов размножения. В конечном итоге в течение первой лактации было выбраковано более 30,0% животных. Не менее важное значение в молочном скотоводстве имеет продолжительность продуктивного периода коров (табл. 3).

Полученные данные подтверждают общепринятое мнение о пользе увеличения продолжительности хозяйственного использования коров. Совершенно очевидно, что доля затрат на выращивание первотелок с каждым последующим отелом уменьшается в структуре себестоимости производства молока. При этом существенное значение имеет величина продуктивности коров. Но в условиях неполноценного кормления, которое наблюдалось в хозяйствах, высокий удой первотелок приводит к ухудшению здоровья и преждевременной выбраковке.

На молочной ферме «Заря» изучали влияние возраста первого отела на продуктивное долголетие коров голштинской породы, полностью завершивших цикл производственного использования и по разным причинам выбывших из стада. Всего учтено 959 голов (табл. 4).

Анализ первичного зоотехнического учета не выявил четкой связи возраста первого отела с величиной удоя и последующей продуктивностью животных, что, возможно, обусловлено плохой организацией выращивания телок. В результате у 56,8% из них первый отел проходил в возрасте 33 мес. и старше. Технологические недостатки подтверждаются необычайно высоким коэффициентом корреляции продолжительности сервис-периода и величиной удоя первотелок $r = +0,87$ ($n = 959$). Тем не менее можно отметить некоторое преимущество особей, чей возраст отела до 27 мес. Количество полученного молока на день жизни было больше, чем у других возрастных групп, на 6,0 и 3,9%.

Таблица 3

Продолжительность жизни и продуктивность коров

Показатель (в расчете на 1 голову)		Возраст в отелах					
		1	2	3	5	8	11
Количество молока за все лактации, кг	1-я группа	3018,0	6517,0	10560,0	19072,0	31866,0	43792,0
	2-я группа	4138,0	8740,0	13846,0	25149,0	—	—

Примечание. Продолжительность жизни животных 2-й группы составила 5 отелов.

Возраст первого отела и продуктивное долголетие

Показатель	Возраст первого отела, мес.		
	Менее 27	27,1–30,0	Более 30,1
Количество голов	151	263	545
Удой первотелок за 305 дней, кг	3677,8	3670,0	3969,6
Сервис-период, дни	165,2	158,2	166,0
Пожизненный удой, кг	14235,4	14086,6	15318,2
Количество отелов	3,24	3,26	3,28
Количество лактаций	2,74	2,68	2,70
Продолжительность жизни, дни	1925,5	2021,6	2140,7
Продуктивный период, дни	1178,3	1161,5	1114,6
Количество молока на день жизни, кг	7,39	6,97	7,14

Заключение

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о существенных недостатках в технологии производства молока на фермах «Восточное» и «Заря», которые не позволяют реализовать генетический потенциал продуктивности черно-пестрой и голштинской пород [7]. Несмотря на это, можно рекомендовать фермерам проводить раннюю случку телок при соблюдении стандартов кормления и содержания в последующем. Это один из путей повышения продуктивности крупного рогатого скота и экономической эффективности производства молока.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Татуева О.В., Кольцов Д.Н. Влияние генетических факторов на продуктивное долголетие черно-пестрой породы в условиях Смоленской области // Зоотехния. 2023. № 9. С. 2–7.
2. Ключникова Н.Ф., Ключников М.М., Ключникова Е.М. Воспроизводство крупного рогатого скота на молочных фермах юга Дальнего Востока // Вестник ДВО РАН. 2018. № 3. С. 126–128.
3. Тяпугин Е.Е., Герасимова Е.В., Семенова Н.В., Мороз Т.А., Приданова И.Е. Состояние воспроизводства молочного скота в Российской Федерации // Зоотехния. 2023. № 1. С. 33–35.
4. Ключникова Н.Ф., Ключников М.Т., Ключникова Е.М. Некоторые аспекты связи морфологии яичников с экстерьером первотелок Среднего Приамурья // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2024. № 1. С. 64–68.
5. Шелепа А.С. Направление аграрно-экономических исследований на Дальнем Востоке: сборник научных трудов. Хабаровск, 2011. С. 18–21.
6. Ключникова Н.Ф. Аспекты повышения оплодотворяемости коров. Хабаровск, 2006. 256 с.
7. Мысик А.Т., Тимошенко Ю.И., Лепехина Т.В. Состояние и развитие животноводства на современном этапе // Зоотехния. 2023. № 10. С. 2–7.

REFERENCES

1. Tatueva O.V., Koltsov D.N. Influence of genetic factors on the productive longevity of the black-and-white breed in the conditions of the Smolensk region. *Zootehnija*. 2023;(9):2–7. (In Russ.).
2. Klyuchnikova N.F., Klyuchnikov M.M., Klyuchnikova E.M. Reproduction of Cattle on Dairy Farms of the South of the Far East. *Vestnik of the FEB RAS*. 2018;(3):126–128. (In Russ.).
3. Tyapugin E.E., Gerasimova E.V., Semenova N.V., Moroz T.A., Pridanova I.E. State of dairy cattle reproduction in the Russian Federation. *Zootehnija*. 2023;(1):33–35. (In Russ.).
4. Klyuchnikova N.F., Klyuchnikov M.T., Klyuchnikova E.M. Some aspects of the relationship between ovarian morphology and the exterior of the first heifers of the Middle Amur region. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2024(1):64–68. (In Russ.).
5. Shelepa A.S. Napravlenie agrarno-ekonomicheskikh issledovaniy na Dal'nem Vostoke = [Direction of agrarian and economic research in the Far East]. Khabarovsk; 2011. P. 18–21. (In Russ.).
6. Klyuchnikova N.F. Aspects of increasing the fertilization of cows. Khabarovsk; 2006. 256 p. (In Russ.).
7. Mysik A.T., Timoshenko Yu.I., Lepekhina T.V. State and development of animal husbandry at the present stage. *Zootehnija*. 2023;(10):2–7. (In Russ.).

Научная статья

УДК: 632.95.025.8.954:633.18

DOI: 10.31857/S0869769825030108

EDN: PNNCFL

Изучение эффективности гербицида Дивикстон¹ 25 НЭО, КЭ на посевах риса в Приморском крае

А.В. Костюк[✉], Е.В. Ляшенко

Александр Васильевич Костюк

кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник
Дальневосточный научно-исследовательский институт защиты растений –
филиал ФНЦ агробιοтехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки,
Приморский край, с. Камень-Рыболов, Россия
dalniizr@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6068-6719>

Елена Владимировна Ляшенко

младший научный сотрудник
Дальневосточный научно-исследовательский институт защиты растений –
филиал ФНЦ агробιοтехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки,
Приморский край, с. Камень-Рыболов, Россия
dalniizr@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2976-8403>

Аннотация. Изучена биологическая и хозяйственная эффективность гербицида Дивикстон 25 НЭО, КЭ (д.в. флорпирауксифен-бензил) на посеве риса. Гербицид находится на стадии регистрации к применению в Российской Федерации. Исследования проводили на рисовых оросительных системах СХПК «Луговое» Хорольского района – 2018 г. и ООО «Смена» Черниговского района – 2019 г. Почва опытных участков лугово-глеевая, по механическому составу – тяжелый суглинок. Гербицид Дивикстон 25 НЭО, КЭ применяли в нормах расхода 1,0 и 1,2 л/га в 2 срока: в период появления 2–3 листьев и кушения риса. Препарат полностью уничтожал виды ежовников и сыти, эффективно сдерживал развитие клубнекамыша приморского, горца перечного и болотных широколистных сорняков. При внесении в фазу кушения риса надежно контролировал мятлик орошаемый. Применение гербицида Дивикстон 25 НЭО, КЭ за 2 года исследований способствовало повышению урожайности зерна риса на 24,0–36,4 ц/га.

Ключевые слова: ежовники, гербицид, эффективность, рис, урожайность, сорняки

Для цитирования: Костюк А.В., Ляшенко Е.В. Изучение эффективности гербицида Дивикстон 25 НЭО, КЭ на посевах риса в Приморском крае // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 3. С. 104–113. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030108>

¹ Гербицид находится на стадии регистрации.

© Костюк А.В., Ляшенко Е.В., 2025

Study of the effectiveness of the herbicide Divixton 25 NEO, CE on rice crops in the Primorsky Territory

A.V. Kostyuk, E.V. Lyashenko

Alexander V. Kostyuk

Candidate of Science in Agriculture, Lead Researcher

The Far Eastern Research Institute of Plant Protection – Branch of the Federal Scientific Center of Agrobiotechnology in the Far East named after A.K. Chaika,

Primorsky Krai, Kamen-Rybolov vil., Russia

dalniizr@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6068-6719>

Elena V. Lyashenko

Junior Researcher

The Far Eastern Research Institute of Plant Protection – Branch of the Federal Scientific Center of Agrobiotechnology in the Far East named after A.K. Chaika,

Primorsky Krai, Kamen-Rybolov vil., Russia

dalniizr@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2976-8403>

Abstract. The biological and economic effectiveness of the herbicide Divixton 25 NEO, CE (active florpyrauxifen-benzyl) on rice crops was studied. The herbicide is at the stage of registration for use in the Russian Federation. The studies were conducted on rice irrigation systems of the agricultural agricultural production complex “Lugovoye” of the Khorolsky district – 2018 and LLC “Smena” of the Chernigovsky district – 2019. The soil of the experimental plots is meadow-gley, the mechanical composition is heavy loam. Herbicide Divixton 25 NEO, CE was used at application rates of 1,0 and 1,2 l/ha in 2 periods: during the period of appearance of 2–3 leaves and tillering of rice. The drug completely destroyed the species of barnacles and saffron, and effectively restrained the development of seaside tuber, peppermint and marsh broadleaf weeds. When introduced into the tillering phase, rice was reliably controlled by irrigated bluegrass. The use of the herbicide Divixton 25 NEO, CE over 2 years of research contributed to an increase in rice grain yield by 24,0–36,4 c/ha.

Keywords: barnyard grass, herbicide, efficiency, rice, productivity, weeds

For citation: Kostyuk A.V., Lyashenko E.V. Study of the effectiveness of the herbicide Divixton 25 NEO, CE on rice crops in the Primorsky Territory. *Vestnik of the FEB RAS.* 2025;(3):104–113. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030108>

Введение

Рис – один из самых ценных пищевых продуктов для более чем половины населения мира [1, 2]. В настоящее время (2020–2022 гг.) посевы его размещены в 118 странах на площади 167 млн га. По урожайности рис занимает первое место в мире среди зерновых культур. В 2021 г. посевная площадь под рис в России составила 187,5 тыс. га [3, 4].

Дальний Восток – один из немногих регионов России, где возможно возделывание риса, а Приморье – самый северный район, где рис возделывается [5, 6]. Фактическая урожайность риса в Приморском крае на уровне 35–40 ц/га не соответствует

биологическому потенциалу районированных и перспективных сортов. Местные сорта обладают продуктивностью на уровне 60–70 ц/га зерна. Основные агроклиматические факторы не препятствуют получению такого урожая [7].

Обеспечение высокой урожайности культуры риса и роста производства на современном этапе достигается комплексом экономических, экологических и социальных мер поддержки и продвижения отрасли. Устойчивое развитие рисоводства в планетарном масштабе основано на внедрении инноваций в сельскохозяйственную практику [8].

Серьезным препятствием в получении высоких урожаев риса и поддержании экологии агросистем является сильная засоренность рисовых полей. К наиболее часто встречающимся сорнякам относятся ежовники (*Echinochloa* spp.), а также клубнекамыш приморский (*Bolboschoenus maritinus* (L.) Palla). Численность ежовников в посевах риса в Приморском крае порой достигает 2000 шт./м², а клубнекамыша – 150 шт./м² и более. Установлено, что достоверное снижение урожая зерна риса на 33–41% (10,2–15,0 ц/га) происходит при произрастании в посевах 80 шт./м² растений ежовников. При увеличении плотности их стояния до 160–240 шт./м² недобор урожая возрастает до 19,0–24,1 ц/га [9].

В последние годы большое распространение в посевах получили мятлик орошаемый (*Poa subcaerulea* (Smith)) и горец перечный (*Persicaria hydropiper* (L.)). Сорные растения семейства Polygonaceae имеют тенденцию к увеличению численности и распространению на рисовых системах по всему миру [10].

Для борьбы с сорными растениями в посевах риса в Российской Федерации в 2023 г. было зарегистрировано 13 гербицидов, из которых 11 могут использоваться для уничтожения видов ежовников [11]. Несмотря на разные действующие вещества, все они являются ингибиторами ацетолактатсинтазы. В связи с постоянным давлением в результате химических обработок посевов специализированные засорители риса – виды ежовников из семейства Poaceae (мятликовые) приобрели резистентность к часто применяемым препаратам [12, 13].

Проблема появления резистентных к гербицидам сорных растений в развитых странах признана настолько серьезной, что ее сравнивают с проявлением множественной резистентности к антибиотикам у патогенных для человека организмов [14]. Резистентность сорняков – одна из самых серьезных проблем в современной гербологии, в том числе и отечественной [15]. Об устойчивых биотипах сорняков семейства мятликовых в России, к сожалению, известно мало, но это объясняется слабой изученностью проблемы, а не ее отсутствием [16].

На рисовых полях Краснодарского края была зарегистрирована устойчивость к гербициду Цитадель 25 (д.в. пеноксилам) растений трех видов ежовников (*E. crus-galli*, *E. orizoides*, *E. phyllopogon*), семена которых были отобраны в рисоводческих хозяйствах [17].

Исследованиями, проведенными сотрудниками ДВНИИЗР, выявлены 3 биотипа ежовников (*E. crus-galli*, *E. occidentalis*, *E. phyllopogon*), устойчивые к гербицидам Сегмент, Цитадель и Номини. Доказано, что резистентность ежовников к ним является перекрестной и развивается у биотипов с ранее выработанной устойчивостью к гербициду Фацет [18–20].

Посевные площади, засоренные устойчивыми биотипами ежовников, с каждым годом увеличиваются. Необходим поиск новых противозлаковых гербицидов иного механизма действия. В Японии разработали новый гербицид метазосульфурон (торговое название Альтаир), показавший отличную гербицидную активность в отношении резистентных биотипов в рисовых чеках [21].

Цель исследований – изучить биологическую и хозяйственную эффективность применения гербицида Дивикстон 25 НЭО, КЭ (25 г/л флорпирауксифен-бензил) в посевах риса.

Материалы и методика исследований

Исследования проводили в течение 2 лет: в 2018 г. – в СХПК «Луговое» Хорольского района, в 2019 г. – в ООО «Смена» Черниговского района Приморского края.

Почва опытных участков лугово-глеевая, по механическому составу – тяжелый суглинок. Агротехника выращивания риса соответствовала рекомендованной для данной зоны. Предшественниками в годы проведения исследований были соя и рис. Посев риса сорта Луговой проводили с минимальной заделкой семян. Норма высева – 280 кг/га. При посеве вносили минеральные удобрения – карбамид 120 кг/га. Обработку гербицидами проводили в период появления 2–3 листьев и кушения риса. При первом сроке внесения препаратов ежовники находились в фазе 3–5 листьев – кушения (8–20 см), клубнекамыш приморский – 5–8 листьев (20–31 см), горец перечный – 5–6 листьев (4–5 см), болотные широколистные – 5–6 листьев (3–4 см), мятлик орошаемый – 2–4 листа (8–12 см), виды сыти – 5–6 листьев (3–4 см), а при втором – соответственно кушение (30–40 см), 10–12 листьев (50–60 см), 6–7 листьев (6–8 см), 6–7 листьев (6–7 см), 3–5 листьев (10–14 см), 6–7 листьев (8–10 см). Площадь опытных делянок 22,5 м². Повторность четырехкратная, расположение последовательное.

Гербицид Дивикстон 25 НЭО, КЭ применяли в нормах расхода 1,0 и 1,2 л/га. В качестве эталона использовали препарат Цитадель 25, МД (1,6 л/га). Нанесение растворов препаратов на растения проводили ручным штанговым опрыскивателем марки ОРШ-2 для мелкоделяночных опытов, с шириной захвата 2,5 м и расходом жидкости 200 л/га. Затопление опытного участка водой осуществляли на следующие сутки после обработки.

Учеты засоренности проводили в 4 срока: до обработки (исходная засоренность), через 30 и 45 суток после нее, а также перед уборкой урожая. Все учеты осуществляли количественно-видовым, а через 45 суток и перед уборкой, кроме того, и весовым методами на учетных площадках размером 0,25 м² по 4 шт. на каждой делянке. Уборку риса проводили в период полной спелости зерна. Полученный урожай зерна риса пересчитывали на стандартную (14%) влажность и 100% чистоту. Биологическую эффективность препарата определяли по снижению количества и массы сорняков в процентах к контролю, хозяйственную – по прибавке урожая зерна риса, полученного на вариантах опыта, в сравнении с контрольными делянками (без применения гербицида). Все исследования выполняли в соответствии с «Методическим руководством по изучению гербицидов, применяемых в растениеводстве» [22]. Статистическую обработку полученных данных осуществляли по В.А. Короневскому [23].

Погодно-климатические условия вегетационных сезонов 2018 и 2019 гг. были относительно благоприятны для роста и развития как культуры, так и сорных растений. Температуры воздуха в III декаде мая и I декаде июня были на 0,2–1,7 °C выше среднегодовых значений, что способствовало появлению выравненных и дружных всходов риса. Со II декады июня и до II июля в отдельные сутки температурный фон был на 1,7 °C ниже нормы. Это не могло не отразиться на развитии культуры, так как растения риса очень требовательны к температурному режиму, поэтому наблюдалась некоторая задержка роста и развития.

Результаты и обсуждение

Перед обработкой на опытных участках в среднем произрастали 322 шт./м² сорных растения. При проведении визуальных наблюдений было отмечено, что первые признаки повреждения сорных растений появились на 7-е сутки после обработки. У ежовников, горца перечного, видов сыти, клубнекамыша приморского

и болотных широколистных сорняков затормозились все ростовые процессы. На 10-е сутки наблюдались хлороз и увядание злаковых, бурая окраска у осоковых и горца перечного и покраснение жилок листьев у болотных широколистных сорняков. Полное отмирание листьев, стеблей и корней было отмечено через четыре недели после применения гербицида.

Через 30 суток после проведенных обработок гербицид Дивикстон 25 НЭО, КЭ независимо от норм расхода и сроков применения на 85–100% уничтожал просовидные сорняки, 53–100 – виды сыти, 88–100 – клубнекамыш приморский, 74–96 – горец перечный, 62–96 – болотные широколистные и на 28–100% – мятлик орошаемый.

При проведении учета через 45 суток после внесения на контрольном варианте произрастали 430 шт./м² сорных растений с общей надземной массой 1803 г/м² (табл. 1).

В посеве доминировали виды ежовников, которые наращивали 1495 г/м² вегетативной массы, что составляло 83% от общей. На данный срок учета гербицид Дивикстон 25 НЭО, КЭ высокоэффективно, на 95–99%, сдерживал рост и развитие сорной растительности. Практически полностью были уничтожены виды ежовников (98–100%) и сыти (94–100%), а также клубнекамыш приморский (100%). При использовании гербицида в фазу кущения риса он надежно (на 100%) контролировал развитие мятлика орошаемого, получившего большое распространение в последнее время в посевах риса в Приморском крае. Также

Таблица 1

Изменение засоренности через 45 суток после применения гербицида Дивикстон 25 НЭО, КЭ (среднее за 2 года)

Вариант опыта		Гибель сорных растений, %						
Препарат, доза	Фаза развития риса	общая	в том числе					
			ежовники	мятлик орошаемый	клубнекамыш приморский	виды сыти	широколистные болотные	горец перечный
Контроль*	—	$\frac{430}{1803}$	$\frac{190}{1495}$	$\frac{36}{20}$	$\frac{8}{36}$	$\frac{108}{106}$	$\frac{80}{78}$	$\frac{8}{68}$
Цитадель 25, МД, 1,0 л/га (эталон)	2–3 листа	$\frac{51}{21}$	$\frac{14}{8}$	$\frac{22}{30}$	$\frac{50}{25}$	$\frac{98}{99}$	$\frac{86}{94}$	$\frac{80}{96}$
Дивикстон 25 НЭО, КЭ, л/га:								
1,0	2–3 листа	$\frac{81}{96}$	$\frac{98}{98}$	$\frac{+119}{40}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{98}{94}$	$\frac{64}{71}$	$\frac{66}{91}$
1,2		$\frac{77}{97}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{+202}{+46}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{71}{74}$	$\frac{60}{96}$
1,0	Кущение	$\frac{91}{95}$	$\frac{99}{99}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{94}{96}$	$\frac{68}{55}$	$\frac{66}{58}$
1,2		$\frac{99}{99}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{94}{92}$	$\frac{84}{84}$

Примечание. Над чертой – количество сорняков, под чертой – масса. Контроль* – количество сорняков – в шт./м², масса – в г/м².

следует отметить, что при применении Дивикстона 25 НЭО, КЭ в фазу кушения риса в норме расхода 1,2 л/га он весьма активно подавлял горец перечный (84%) и болотные широколистные сорняки (на 94% – количество, 92% – масса), в том числе доминировавшую (более 90%) в этой группе линдернию распростертую (*Lindernia procumbens* (Krok.) Born).

Использовавшийся в качестве эталона препарат Цитадель 25, МД существенно уступал в гербицидной активности Дивикстону 25 НЭО, КЭ, уменьшая численность сорных растений на 51%, а их вегетационную массу – на 21%.

Гербицид Дивикстон 25 НЭО, КЭ до конца вегетационного периода продолжал эффективно, на 98–99%, сдерживать рост и развитие сорной растительности в посевах риса (табл. 2). Преобладающие в посевах ежовники, надземная масса которых на момент учета достигала 1284 г/м² (93% от общей), полностью отсутствовали на делянках с изучаемым гербицидом.

Следует отметить, что, так же, как и при предыдущем учете, при применении Дивикстона 25 НЭО, КЭ в фазу кушения риса препарат препятствовал росту мятлика орошаемого. Однако на данных вариантах было выявлено отрастание незначительного количества новых молодых растений клубнекамыша приморского, которые не могли уже оказать существенного влияния на развитие растений риса.

Гербицид Цитадель 25, МД был недостаточно активен в отношении ежовников и мятлика орошаемого, уменьшая прирост надземной массы соответственно на 14 и 47%.

Таблица 2

Биологическая эффективность гербицида Дивикстон 25 НЭО, КЭ перед уборкой урожая риса (среднее за 2 года)

Вариант опыта		Гибель сорных растений, %						
Препарат, доза	Фаза развития риса	общая	в том числе					
			ежовники	мятлик орошаемый	клубнекамыш приморский	виды сыти	широколистные болотные	горец перечный
Контроль*	–	$\frac{327}{1382}$	$\frac{210}{1284}$	$\frac{65}{19}$	$\frac{5}{11}$	$\frac{26}{36}$	$\frac{14}{16}$	$\frac{7}{16}$
Цитадель 25, МД, 1,0 л/га (эталон)	2–3 листа	$\frac{33}{19}$	$\frac{16}{14}$	$\frac{38}{47}$	$\frac{80}{91}$	$\frac{98}{98}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{92}{94}$
Дивикстон 25 НЭО, КЭ, л/га								
1,0	2–3 листа	$\frac{74}{98}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{+28}{+11}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{84}{86}$	$\frac{94}{98}$	$\frac{100}{100}$
1,2		$\frac{61}{98}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{+95}{+53}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{93}{97}$
1,0	Кушение	$\frac{97}{99}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{0}{27}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{87}{75}$	$\frac{57}{57}$
1,2		$\frac{99}{99}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{40}{18}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{93}{86}$

Примечание. Над чертой – количество сорняков, под чертой – масса. Контроль* – количество сорняков – шт./м², масса – г/м².

**Изменения урожайности и элементов ее структуры
при применении гербицида Дивикстон 25 НЭО, КЭ (среднее за 2 года)**

Вариант опыта		Урожайность зерна, ц/га		Высота растений, см	Длина метелки, см	Количество зерен, шт.	Масса зерен, г/растение
Препарат, доза	Фаза развития риса	Всего	Прибавка				
Контроль	—	8,2	—	58	11	24	0,60
Цитадель 25, МД, 1,0 л/га (эталон)	2–3 листа	14,2	6,0	57	11	26	0,65
Дивикстон 25 НЭО, КЭ, л/га:							
1,0	2–3 листа	44,5	36,3	64	13	44	1,1
1,2		44,6	36,4	66	13	45	1,1
1,0	Кущение	32,6	24,4	60	12	35	0,8
1,2		31,2	24,0	60	12	30	0,7
НСР ₀₅	—	3,6	—	5,3	0,4	2	0,1

Высокая чистота посева при внесении гербицида Дивикстон 25 НЭО, КЭ в фазу 2–3 листьев культуры позволила сохранить по 36,3–36,4 ц/га зерна риса при урожайности в контроле 8,2 ц/га (табл. 3). Существенно (НСР₀₅ = 3,6 ц/га) меньшая прибавка урожая получена при его использовании в фазу кущения риса. При позднем сроке обработки сорные растения составили серьезную конкуренцию культуре, сильно угнетая ее. Это явилось причиной столь существенной разницы в полученной урожайности зерна риса. На эталонном варианте собрано по 14,2 ц/га зерна.

Анализ результатов определения структуры урожая риса показал, что надежная защита посева риса от сорняков гербицидом Дивикстон 25 НЭО, КЭ, примененным в фазу 2–3 листьев культуры, способствовала увеличению длины метелки на 2 см, опытные растения превышали контрольные по высоте на 6–8 см. Число выполненных зерен на растение по сравнению с контролем возросло на 20–21 шт. На вариантах внесения гербицида в фазу кущения культуры эти показатели выглядели следующим образом: 1 см, 2 см и 6–11 шт. соответственно.

В ходе анализа качества зерна было выявлено, что применение гербицида не оказывало отрицательного влияния на посевные и технологические показатели.

Выводы

Гербицид Дивикстон 25 НЭО, КЭ в нормах расхода 1,0 и 1,2 л/га при использовании в фазы 2–3 листьев и кущения риса обеспечивал высокую чистоту посева этой культуры. Он эффективно уничтожал виды ежовников и сыти, клубне-камыш приморский и горец перечный, а при внесении в позднюю фазу развития, кроме того, и мятлик орошаемый. Использование препарата было безопасным для защищаемой культуры. Применение Дивикстона 25 НЭО, КЭ способствовало повышению урожайности зерна риса на 24,0–36,4 ц/га.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Балясный Н.В., Скаженник М.А., Ковалев В.С., Пшеницына Т.С. Сопряженность урожайности и элементов ее структуры агроценозов риса // Рисоводство. 2023. № 2 (59). С. 25–30. DOI: 10.33775/1684-2464-2023-59-2-25-30.
2. Есаулова Л.В., Лыско И.А. Анализ состояния отрасли рисоводства Краснодарского края // Рисоводство. 2022. № 3 (56). С. 6–10. DOI: 10.33775/1684-2464-2022-56-3-6-10.
3. Белоусов И.Е. Изменение показателей эффективного плодородия почвы в рисовом севообороте // Рисоводство. 2021. № 3 (52). С. 47–52. DOI: 10.33775/1684-2464-2021-52-3-47-52.
4. Скаженник М.А., Ковалев В.С., Григорьев А.О., Пшеницына Т.С. Формирование урожайности сортов риса и элементов ее структуры // Рисоводство. 2023. № 2 (59). С. 19–24. DOI: 10.33775/1684-2464-2023-59-2-19-24.
5. Гученко С.С., Борзаница А.А., Бельская Н.Г. Оценка селекционных образцов риса конкурсного сортоиспытания в условиях Приморского края // Дальневосточный аграрный вестник. 2021. № 4 (60). С. 40–45. DOI: 10.24412/1999-6837-2021-4-40-45.
6. Илюшко М.В., Гученко С.С., Лелявская В.Н., Безмутко С.В., Ромашова М.В. Влияние фертильности пыльцы гибридных растений-доноров на андрогенез *in vitro* риса *Oryza sativa* L. // Рисоводство. 2023. № 2 (59). С. 6–12. DOI: 10.33775/1684-2464-2023-59-2-6-12.
7. Ковалевская В.А. Селекция риса в Дальневосточной зоне рисосеяния // Достижения науки и техники АПК. 2008. № 6. С. 8–11.
8. Бершидский Ю.И., Зеленская О.В. Перспективы инновационного развития аграрного производства на примере отрасли рисоводства // Экономика и предпринимательство. 2019. № 1. С. 481–485.
9. Костюк А.В., Лукачёва Н.Г., Гиневский Н.К. Вредоносность сорняков в посевах риса в Приморском крае // Земледелие. 2006. № 2. С. 42–43.
10. Зеленская О.В., Москвитин С.А., Швыдкая Н.В. Сорные растения семейства Polygonaceae Juss. на рисовых системах Краснодарского края // Рисоводство. 2021. № 3 (52). С. 61–66. DOI: 10.33775/1684-2464-2021-52-3-61-66.
11. Список пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. 2023 год. М., 2023. 902 с.
12. Зеленская О.В. Динамика численности сорных растений семейства Poaceae на рисовых полях Кубани // Рисоводство. 2019. № 1 (42). С. 37–42.
13. Зеленская О.В. Экологический риск распространения на рисовых полях сорных растений, устойчивых к гербицидам. Обзор // Рисоводство. 2021. № 1 (50). С. 76–87. DOI: 10.33775/1684-2464-2021-50-1-76-87.
14. Берестецкий А.О. Перспективы разработки новых гербицидов на основе природных соединений // Вестник защиты растений. 2023. № 1 (106). С. 5–25. DOI: 10.31993/2308-6459-2023-106-1-15502.
15. Колупаев М.В. Резистентность сорняков к гербицидам нарастает // Защита и карантин растений. 2021. № 4. С. 15–16.
16. Кулагин О.В. Устойчивость однолетних мятликовых сорняков к гербицидам // Защита и карантин растений. 2012. № 11. С. 12–15.
17. Брагина О.А. О резистентности сорняков к гербицидам // Рисоводство. 2016. № 1/2 (30/31). С. 46–49.
18. Лукачёва Н.Г., Костюк А.В. Формирование резистентности к гербициду. Сегмент в популяциях ежовников *Echinochloa* // Вестник ДВО РАН. 2019. № 3. С. 97–102. DOI: 10.25808/08697698.2019.205.3.017.
19. Лукачёва Н.Г., Костюк А.В. Устойчивость ежовников к гербициду. Цитадель в посевах риса в Приморском крае // Вестник ДВО РАН. 2020. № 4. С. 100–104. DOI: 10.37102/08697698.2020.212.4.016.
20. Лукачёва Н.Г., Костюк А.В. Формирование устойчивости биотипами сорняков рода *Echinochloa* к гербициду Номини, СК на рисовых полях Приморского края // Вестник ДВО РАН. 2021. № 3 (217). С. 63–69. DOI: 10.37102/0869-7698 2021 217 03 10.

21. Manabu Saeiki, Tetsuhiko Yano, Yoshihiko Nakaya, Yoshitake Tamada. Development of the novel herbicide metazosulfuron // J. Pest. Sci. 2016. Vol. 41. No. 3. P. 102–106.
22. Спиридонов Ю.Я., Ларина Г.Е., Шестаков В.Г. Методическое руководство по изучению гербицидов, применяемых в растениеводстве. М.: Печатный город, 2009. 252 с.
23. Короневский В.А. К методике статистической обработке данных многолетних полевых опытов // Земледелие. 1985. № 11. С. 56–57.

REFERENCES

1. Baliashnii I.V., Skazhennik M.A., Kovalyov V.S., Pshenitsyna T.S. Sopryazhennost' urozhainosti i ehlementov ee struktury agrotsenozov risa = [Connectivity of yield elements of its structure rice agriculture]. *Rice Growing*. 2023;59(2);25–30. (In Russ.). DOI: 10.33775/1684-2464-2023-59-2-25-30.
2. Esaulova L.V., Lisko I.A. Analiz sostoyaniya otrasli risovodstva Krasnodarskogo kraia = [Analysis of the rice growing industry in Krasnodar Krai]. *Rice Growing*. 2022;56(3);6–10. (In Russ.). DOI: 10.33775/1684-2464-2022-56-3-6-10.
3. Belousov I.Ye. Izmenenie pokazatelei ehffektivnogo plodorodiya pochvy v risovom sevoobrote = [Changing soil efficiency rates in rice crop rotation]. *Rice Growing*. 2021;52(3);47–52. (In Russ.). DOI: 10.33775/1684-2464-2021-52-3-47-52.
4. Skazhennik M.A., Kovalyov V.S., Grigoriev A.O., Pshenitsyna T.S. Formirovanie urozhainosti sortov risa i ehlementov ee struktury = [Formation of yield of rise varieties and elements of its structure]. *Rice Growing*. 2023;59(2);19–24. (In Russ.). DOI: 10.33775/1684-2464-2023-59-2-19-24.
5. Guchenko S.S., Borzanitsa A.A., Belskaya N.G. Otsenka selektsionnykh obraztsov risa konkursnogo sortoispytaniya v usloviyakh Primorskogo kraia = [The evaluation of selection rice samples of competitive variety trial in the conditions of Primorsky Krai]. *Far Eastern Agrarian Bulletin*. 2021;60(4);40–45. (In Russ.). DOI: 10.24412/1999-6837-2021-4-40-45.
6. Ilyushko M.V., Guchenko S.S., Lelyavskaya V.N., Bezmutko S.V., Romashova M.V. Vliyanie fertil'nosti pyl'tsy gibridnykh rastenii-donorov na androgenez *in vitro* risa *Oryza sativa* L. = [Pollen fertility effect of hybrid donor plants on androgenesis *in vitro* in rice *Oryza sativa* L.]. *Rice Growing*. 2023;59(2);6–12. (In Russ.). DOI: 10.33775/1684-2464-2023-59-2-6-12.
7. Kovalevskaya V.A. Selektsiyarisa v Dal'nevostochnoi zone risoseyaniya = [Rice breeding in the Far Eastern rice cultivation zone]. *Achievements of Science and Technology of the Agro-industrial Complex*. 2008;(6);8–11. (In Russ.).
8. Bershitsky Yu.I., Zelensky P.G. Perspektivy innovatsionnogo razvitiya agrarnogo proizvodstva na primere otrasli risovodstva = [Prospects for innovative Development of Agricultural Production on the example of the rice industry]. *Economics and Entrepreneurship*. 2019;(1);481–485. (In Russ.).
9. Kostyuk A.V., Lukacheva N.G., Ginevsky N.K. Vredonosnost' sornyakov v posevakh risa v Primorskom krae = [The harmfulness of weed in rice sowing in the Primorsky Krai]. *Agriculture*. 2006;(2);42–43. (In Russ.).
10. Zelenskaya O.V., Moskvitin S.A., Shvydkaya N.V. Sornye rasteniya semeistva Polygonaceae Juss. na risovykh sistemakh Krasnodarskogo kraia = [Weedy plants of Polygenaceae Juss. Family on rice irrigation systems of Krasnodar Krai]. *Rice Growing*. 2011;52(3);61–66. (In Russ.). DOI: 10.33775/1684-2464-2021-52-3-61-66.
11. Spisok pestitsidov i agrokhimikatov, razreshennykh k primeneniyu na territorii Rossiiskoi Federatsii. 2023 god = [List of pesticides and agrochemicals approved for use on the territory of the Russian Federation in 2023]. Moscow; 2023. 902 p. (In Russ.).
12. Zelenskaya O.V. Dinamika chislennosti sornykh rastenii semeistva Poaceae na risovykh polyakh Kubani = [Dynamics of the number of weeds of the Poaceae family in the rice fields of the Kuban]. *Rice Growing*. 2019;42(1);37–42. (In Russ.).
13. Zelenskaya O.V. Ehkologicheskii risk rasprostraneniya na risovykh polyakh sornykh rastenii ustoi-chivyykh k gerbitsidam. Obzor = [Ecological of herbicide resistant weeds distribution in rice fields. Overview]. *Rice Growing*. 2021;50(1);76–87. (In Russ.). DOI: 10.33775/1684-2464-2021-50-1-76-87.

14. Berestetskii A.O. Perspektivy razrabotki novykh gerbitsidov na osnove prirodnnykh soedinenii = [Prospects for the development of new herbicides based on natural compounds]. *Plant Protection News*. 2023;106(1):5–25. (In Russ.). DOI: 10.31993/2308-6459-2023-106-15502.
15. Kolupaev M.V. Rezistentnost' sornyakov k gerbitsidam narastaet = [Resistance of weeds to herbicides is being progressively promoted]. *Plant Protection and Quarantin*. 2021;(4):15–16. (In Russ.).
16. Kulagin O.V. Ustoichivost' odnoletnikh myatlikovykh sornyakov k gerbitsidam = [Resistance of annual bluegrass weeds to herbicides]. *Plant Protection and Quarantin*. 2012;(11):12–15. (In Russ.).
17. Bragina O.A. O rezistentnosti sornyakov k gerbitsidam = [Weeds resistance to herbicides Rice growing]. *Rice Growing*. 2016;30/31(1/2):46–49. (In Russ.).
18. Lukacheva N.G., Kostyuk A.V. Formirovanie rezistentnosti k gerbitsidu. Segment v populyatsiyakh ezhovnikov *Echinochloa* = [Formation of resistance to Segment herbicide in populations of *Echinochloa* barnacles]. *Vestnik of the FEB RAS*. 2019;(3):97–102. (In Russ.). DOI: 10.25808/08697698.2019.205.3.017.
19. Lukacheva N.G., Kostyuk A.V. Ustoichivost' ezhovnikov k gerbitsidu 'Tsitadel' v posevakh risa v Primorskom krae = [Barnyard grass resistance to the herbicide Citadel in rice crops in Primorsky Krai]. *Vestnik of the FEB RAS*. 2020;(4):100–104. (In Russ.). DOI: 10.37102/08697698.2020.212.4.016.
20. Lukacheva N.G., Kostyuk A.V. Formirovanie ustoichivosti biotipami sornyakov roda *Echinochloa* k gerbitsidu Nomini, SK na risovykh polyakh Primorskogo kraya = [Formation of resistance by biotypes of weeds of the genus *Echinochloa* to the herbicide Nomini, SC in the rice fields of the Primorsky Territory]. *Vestnik of the FEB RAS*. 2021;217(3):63–69. (In Russ.). DOI: 10.37102/0869-7698 2021 217 03 10.
21. Manabu Saeki, Tetsuhiko Yano, Yoshihiko Nakaya, Yoshitake Tamada. Development of then ovel herbicide metazosulfuron. *J. Pest. Sci*. 2016;41(3):102–106.
22. Spiridonov Yu.Ya., Larina G.E., Shestakov V.G. Metodicheskoe rukovodstvo po izucheniyu gerbitsidov, primenyaemykh v rastenievodstve = [Methodological guide for the study of herbicides used in crop production]. Moscow: Pechatnii Gorod; 2009. 252 p. (In Russ.).
23. Koronevskii V.A. K metodike statisticheskoi obrabotki dannyykh mnogoletnikh polevykh opytov = [To the method of statistical data processing of long-term field experiments]. *Agriculture*. 1985;(11):56–57. (In Russ.).

Научная статья

УДК 575.17;636.082

DOI: 10.31857/S0869769825030118

EDN: PNNFZF

Изменения селекционно-генетических свойств сахалинской популяции голштинской породы за период многолетнего разведения

В.М. Кузнецов✉, Г.Б. Ревина

Виктор Макарович Кузнецов

доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник
Сахалинский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ВИР,
Южно-Сахалинск, Россия
sakhnii_sakhalin@mail.ru, vik79344625@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4366-7628>

Галина Борисовна Ревина

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
Сахалинский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ВИР,
Южно-Сахалинск, Россия
sakhnii_sakhalin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8998-2826>

Аннотация. В результате проведенных исследований изучен селекционно-генетический механизм формирования продуктивных признаков у коров сахалинской популяции. Современная породная группа сочетает в себе четыре родственных между собой популяции – американскую, канадскую, японскую и сахалинскую. Исследования показали, что популяция ограниченной численности ограничивает фертильность, не проявляет гетерозиса и снижает адаптивность в последующих поколениях. Определены основные селекционно-генетические параметры племенных стад. Коэффициент корреляции между удоем коров за 305 дней первой лактации и сервис-периодом составил $-0,227 \pm 0,013$, коэффициент линейной регрессии соответственно ($b_{yx} = 0,45 \pm 0,033$, F тест 5,2). Между удоем полновозрастных коров за 305 дней лактации и количеством выбывших коров по плодовитости выявлена положительная коррелятивная связь ($r = +0,52 \pm 0,012$).

Ключевые слова: селекционно-генетические параметры стад, сахалинская популяция голштинской породы, молочная продуктивность, воспроизводительная способность

Для цитирования: Кузнецов В.М., Ревина Г.Б. Изменения селекционно-генетических свойств сахалинской популяции голштинской породы за период многолетнего разведения // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 3. С. 114–125. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030118>

Финансирование. Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту FGEM-2025-0003.

Changes in breeding and genetic properties of the Sakhalin population of the Holstein breed over the period of long-term breeding

V.M. Kuznetsov, G.B. Revina

Victor M. Kuznetsov

Doctor of Sciences in Agriculture, Leading Researcher
Sakhalin Scientific Research Institute of Agriculture – VIR Branch, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
sakhnii_sakhalin@mail.ru, vik79344625@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-4366-7628>

Galina B. Revina

Candidate of Sciences in Biology, Senior Researcher
Sakhalin Scientific Research Institute of Agriculture – VIR Branch, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
sakhnii_sakhalin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8998-2826>

Abstract. As a result of the conducted research, the breeding and genetic mechanism of the formation of productive traits in cows of the Sakhalin population has been studied. The modern breed group combines four related populations – American, Canadian, Japanese and Sakhalin. Studies have shown that a limited population limits fertility, does not show heterosis, and reduces adaptability in subsequent generations. The main breeding and genetic parameters of breeding herds have been determined. The correlation coefficient between the milk yield of cows for 305 days of the first lactation and the service period was $-0,227 \pm 0,013$, the coefficient of linear regression, respectively ($b_{yx} = 0,45 \pm 0,033$, F test 5.2). A positive correlation was found between the milk yield of full-aged cows over 305 days of lactation and the number of retired cows in fertility ($r = +0,52 \pm 0,012$).

Keywords: breeding and genetic parameters of herds, sakhalin population of Holstein breed, milk productivity, reproducibility

For citation: Kuznetsov V.M., Revina G.B. Changes in breeding and genetic properties of the Sakhalin population of the Holstein breed over the period of long-term breeding. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(3):114–125. (In Russ.). <https://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030118>

Funding. The work was carried out in accordance with the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project FGEM-2025-0003.

Введение

Разведение первой в стране популяции голштинской породы на островной территории – это эволюция ее на протяжении более 30 поколений. Особенность ее происхождения в том, что она возникла на основе четырех пород – симментальской, швицкой, ост-фризской и красной степной. Современная популяция включает четыре разные по происхождению родственные группы: американскую, канадскую, японскую и сахалинскую. Особенность эволюции современной сахалинской популяции сложилась за несколько периодов разведения:

- 1) 1906–1946 гг. (импорт молочных пород скота с о-ва Хоккайдо);
- 2) 1946–1956 гг. (выращивание и собственное воспроизводство животных молочных пород для искусственного осеменения коров и телок в совхозах);

3) 1957–1975 гг. (вводное скрещивание маточного стада с быками голландской и голштинской пород в совхозах области);

4) 1975–2000 гг. (внутрипородное разведение на основе использования импортных быков-производителей, зональный подбор и ротация линий по территориальным зонам области);

5) 2000–2010 гг. (внутрипородная селекция, индивидуальный подбор родительских пар с учетом оценки быков-производителей по качеству потомства);

6) 2010 г. по настоящее время (чистопородное разведение, групповой подбор родительских пар с учетом племенной ценности быков-производителей) [1].

Цель исследования – изучить эффективность селекции голштинской породы в стадах сельскохозяйственных предприятий и в племенных репродукторах и степень ее генетической адаптивности в условиях Сахалинской области.

Методика исследований

Исследования проведены в Сахалинском НИИСХ – филиал ВИР, племенных репродукторах и сельскохозяйственных предприятиях Сахалинской области. Для изучения эволюции сахалинской популяции изучено влияние основных критериев отбора и подбора на формирование хозяйственно полезных признаков в стадах за ряд смежных поколений. Проанализированы архивные документы центральной опытной станции при губернаторстве Карафута 1906–1946 гг. [2], данные первичного зоотехнического учета и бонитировок скота в Сахалинской области за период с 1952 по 2024 г.

При характеристике линий и родственных групп основывались на индивидуальных оценках, придавая равное значение двум компонентам: отклонение средней по линии от средней по стаду и отклонение индивидуальных оценок от средней по линии.

Для определения генетической изменчивости по линиям и внутри линий и родственных групп разделяли аддитивные компоненты дисперсий на фенотипические. В результате генетическую изменчивость признаков с учетом линейной принадлежности определяли согласно выражению

$$h_f^2 = \frac{1 + (n-1)r}{1 + (n-1)t} h_s^2, \quad (1)$$

где h_s^2 – коэффициент генетической изменчивости признаков с учетом линейной принадлежности; h_f^2 – коэффициент внутрилинейной генетической изменчивости; t – коэффициент внутригрупповой корреляции; n – число коров в линии; r – коэффициент родства [3].

Ожидаемый ответ на отбор рассчитывали исходя из стандартизованного селекционного дифференциала (i), который характеризует интенсивность селекции.

$$S = i\sigma_p. \quad (2)$$

где S – селекционный дифференциал; i – интенсивность отбора; σ_p – стандартное отклонение.

Ожидаемый ответ на индивидуальный отбор представляет следующее уравнение:

$$R = ih^2\sigma_p. \quad (3)$$

Для вычисления коэффициента инбридинга (F_x) применена формула Райта

$$F_x = \Sigma (1/2)^n (1 + Fa), \quad (4)$$

где n – число особей по любой линии родства, считая родителей X , общего предка Fa , и всех особей данной линии, связывающей родителей с их общим предком.

Точность оценки племенных качеств оцениваемого животного зависит от наследуемости признака (h^2) и влияния внешней среды (средовая корреляция между полусестрами), поэтому корреляции между средней продуктивностью дочерей и племенной ценностью отца определяли по известной формуле

$$Rg = \frac{n \times h^2}{n \sqrt{1 + (n-1)(0,25h^2 + c^2)}}, \quad (5)$$

где R – коэффициент корреляции потомок–родитель; n – число дочерей; c^2 – коэффициент внутриклассовой корреляции между полусестрами по отцу.

Исследованы особенности репродуктивной системы у коров сахалинской популяции голштинской породы. Генетическую обусловленность и природу фертильности оценивали клинико-генеалогическим и генетико-статистическим методом [4]. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$. Для анализа составляли генеалогические схемы линий и родственных групп. Изучали влияние родственных связей и степени инбридинга на частоту репродуктивных патологий у животных [5]. В генетическом анализе применили критерий согласия хи-квадрат, с помощью которого сравнивали наблюдаемые частоты с ожидаемыми в дискретных классах. Признаки разделяли на два фенотипических класса с единственным разделяющим их порогом. Градации классов рассматривали как норму и восприимчивость [6].

Результаты и обсуждение

Анализ формирования сахалинской популяции показал, что начало разведения ее относится к 1906 г. В это время одна из японских акционерных компаний осуществляла импорт животных, в том числе и животных молочных пород, на оккупированные территории. Через несколько лет интенсивность завоза животных голштинской породы возросла, и к 1914 г. на юге Сахалина уже насчитывалось 1,5 тыс. голов этой породы, а к началу Великой Отечественной войны его количество составило 7,5 тыс. голов. С этого момента голштинская порода стала районированной во всех совхозах южной части острова.

Продуктивность коров-родоначальниц за лактацию, акклиматизированных на Сахалине, была высокой на тот период – 5513 кг молока с жирностью 3,21%. После окончания военных действий и освобождения территории острова завезенную породу животных продолжили разводить по всей территории Сахалинской области. Более интенсивному разведению животных этой породы способствовала работа по воспроизводству и выращиванию молодняка на комплексной сельскохозяйственной опытной станции филиала Дальневосточного института сельского хозяйства (табл. 1).

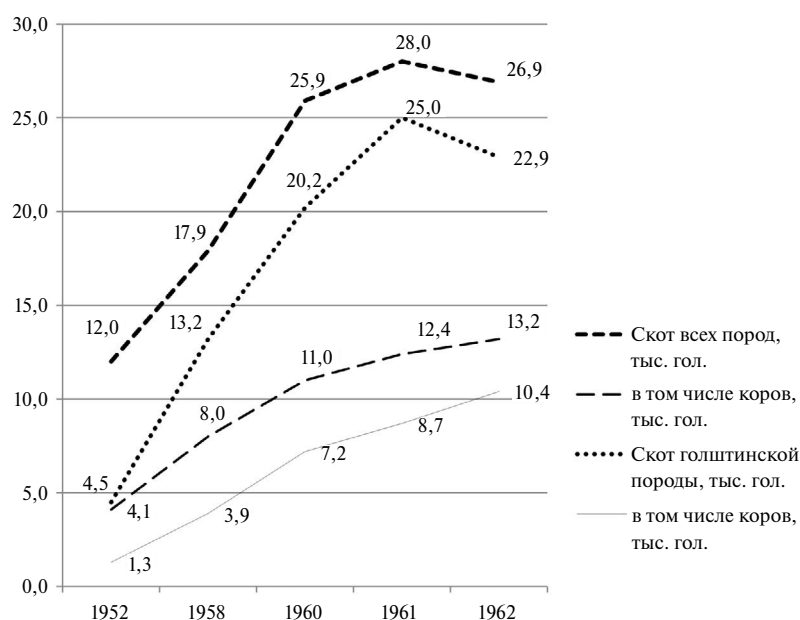
В результате количество животных голштинской породы начало быстро увеличиваться (см. рисунок).

По данным бонитировки 1962 г., удельный вес животных голштинской породы всех степеней кровности составил 79,2%. С 1965 по 1990 г. количество животных

Таблица 1

**Продуктивность родоначальниц сахалинской популяции коров
(племенной репродуктор ОПХ «Тимирязевское» Сахалинского НИИСХ – филиала ВИР)**

Кличка, инв. №	Год рождения	Продуктивность за 300 дней лактации		
		Удой, кг	МДЖ, %	МДЖ, кг
Альфа 6	1935	5637	2,94	165,7
Аргуса 8	1938	7441	3,12	232,2
Ария 9	1942	5017	3,67	225,7
Арагва 11	1941	6447	3,43	221,0
Акация 16	1939	5507	3,22	177,3
Аллея 17а	1940	7639	3,28	250,5
Ася 18	1938	6154	3,32	204,3
Аскания 19	1939	6768	3,00	203,0
Армида 24	1944	5888	3,48	204,7
Орбита 26	1944	7532	3,69	277,9
Весна 32	1945	6765	3,19	209,7



Рост поголовья скота голштинской породы за 1952–1962 гг. в хозяйствах Сахалинской области, тыс. голов

в общественном секторе увеличилось более чем в три раза, а количество чистопородных животных возросло с 3,5 до 99,5%.

Рост породности крупного рогатого скота сопровождался повышением его продуктивности при одинаковых затратах на кормление и выращивание молодняка. Высокая молочная продуктивность чистопородных голштинских коров племенного

репродуктора ОПХ «Тимирязевское» Сахалинского НИИСХ – филиала ВИР позволила развернуть селекционно-племенную работу по выведению племенного молодняка с целью улучшения породных качеств животных в совхозах Сахалинской области. Рекордные показатели в стране на тот период установлены в ОПХ «Тимирязевское». От коровы Арагвы 327 за 1985–1986 гг. по 4 лактации получено 16 836 кг молока. В этом же хозяйстве от коровы Уфы 506 в 1987 г. надоено за 305 дней 4 лактации 11 788 кг молока с массовой долей жира в молоке 4,34%, коровы Звонкой – 279–9797 кг молока с массовой долей жира 3,77%.

Решающее значение при становлении и развитии стад голштинской породы имела работа племенных репродукторов, которые распространяли племенной молодняк по хозяйствам области. Быстрое увеличение продуктивности коров отмечено в ОПХ «Тимирязевское» Сахалинского НИИСХ, где удой коров первой лактации в 1990 г. составил 7173 кг, а продуктивность полновозрастных коров достигла 7945 кг молока за 305 дней последней законченной лактации.

Для изучения степени адаптивной селекции голштинской породы на территории Сахалинского региона проведен прогноз эффективности отбора за несколько поколений на начальном этапе ее разведения. В табл. 2 представлены показатели продуктивности дочерей, внуков, правнуков и последующих поколений потомков в стаде ОПХ «Тимирязевское».

Как показывает анализ, вклад родителей в воспроизводство следующего поколения оказался неодинаков, поэтому количество дочерей, полученных от используемых быков-производителей, различное, из-за неодинаковой жизнеспособности потомства, что является результатом происшедшего и не характеризует эффективность применяемого отбора в будущем. Вместе с тем значительный интерес представляет динамика продуктивности животных в непрерывающихся поколениях. Наблюдаемые фенотипические различия как средних показателей, так и ответа на отбор можно отнести и к негенетическому ответу [7]. Тем не менее ответ имел кумулятивную природу из-за длительного отрезка времени. Этот эффект зависел от невысоких показателей наследуемости признаков продуктивности. В соответствии с проведенными расчетами массовая селекция по продуктивности оказалась более эффективной с высокой наследуемостью и может быть невысокой по признакам

Таблица 2

**Эффективность отбора при чистопородном разведении в стаде коров
(племенной репродуктор ОПХ «Тимирязевское» Сахалинского НИИСХ – филиала ВИР)**

Поколения отбора	Количество коров, <i>n</i>		Коэффициент отбора, %	Удой коров за 305 дней, кг		
	до отбора	после отбора		до отбора	после отбора	выбывших
1	0	21	0	5888	6532	5146
2	61	27	12,5	6532	6284	4741
3	88	66	32,7	6284	5644	4248
4	135	91	48,1	5644	5905	4332
5	133	83	58,9	5905	5827	4588
6	130	71	82,9	5827	6491	5172
7	126	68	85,7	6491	6429	5578
8	157	84	87,0	6429	6855	5676

с низкой наследуемостью, фенотипическая изменчивость которых в основном определяется факторами среды. Различия в величине коэффициентов отбора оказывают влияние и на величину ответов за одно поколение, но незначительно отражаются на реализованной наследуемости [8, 9].

Так как признак молочной продуктивности нелинейно связан с критериями отбора (особенно с воспроизводительной способностью), то в результате разведения наблюдается асимметрия ответа на отбор. Однако причины такой асимметрии в сахалинской популяции сложно идентифицировать, поскольку трудно выделить некоторые из факторов, влияющих на возникновение асимметрии. До тех пор, пока асимметричные ответы не будут выявлены, прогноз ответа на отбор по наследуемости в современной популяции будет оставаться трудно прогнозируемым. Тем не менее если признак продуктивности связан с компонентой фертильности, то следует ожидать асимметрию, поскольку отбор, действующий на увеличение жизнеспособности, дает меньший ответ, чем отбор, направленный на ее уменьшение. Причиной этого явления оказались различная инбредность потомства и невысокая фертильность, которая сама по себе обуславливает асимметрию (табл. 3).

Так как инбредная депрессия существенно влияет на молочную продуктивность, то по мере усиления инбридинга наблюдается тенденция к снижению средних значений удоя коров за лактацию [10]. В результате уменьшалась реакция на селекцию по мере нарастания коэффициента инбридинга, что усиливало асимметрию.

Исследования показали, что популяция ограниченной численности ограничивает фертильность, не проявляет гетерозиса и снижает адаптивность в последующих поколениях. В этой связи адаптивная селекция может рассматриваться как процесс, в соответствии с которым происходит снижение фертильности. Этот показатель представляет собой отношение числа живых потомков в различные возрастные периоды к общей численности популяции. Между возрастом коров первого отела и количеством отелов получен отрицательный коэффициент корреляции ($r = -0,24$), между количеством отелов и индексом осеменения коэффициент корреляции оказался тоже отрицательным ($r = -0,23$), а индексом осеменения и продолжительностью хозяйственного использования – положительным и составил $r = +0,49$. Наиболее точно характеризует адаптивность популяции и близок к индексу фертильности показатель продолжительность хозяйственного использования коров. Эти признаки связаны положительной корреляцией ($r = +0,85$). В то же время адаптация к сильно различающимся условиям среды затрагивала множество различных признаков, так как адаптивная селекция зависела от взаимодействия генотип–среда. В настоящее

Таблица 3

Асимметрия ответа на отбор по удою коров за 305 дней лактации, кг

Коэффициент отбора (s)	Интенсивность отбора (i)	Коэффициент наследуемости (h^2)	Стандартное отклонение (δ_A)	Ответ на отбор (R)		
				ожидаемый	наблюдаемый	разница ($\pm$)
80	1,4	0,22	845	260,7	342,5	+81,8
40	1,23	0,28	730	251,4	238,7	-12,7
25	0,97	0,31	760	228,0	210,2	-17,8
20	0,34	0,32	780	84,8	90,5	+5,7

время генеалогическая структура стад сахалинской популяции представляет собой ограниченное количество линий и родственных групп, состоящих преимущественно из родственных животных. В этой связи генетическая изменчивость внутри родственных групп возрастает с увеличением коэффициента родства и снижением внутриклассовой корреляции.

Как показали исследования, оценка межлинейной генетической изменчивости важна при выборе линий для дальнейшего разведения. Эффективность оценки межлинейных различий основана на том, что средовые отклонения у животных взаимно подавляются при характеристике среднего значения для линии. Тогда среднее фенотипическое значение для линии приближается к его генотипическому значению. Однако общая для одной линии средовая изменчивость снижает эффективность характеристики линии. Кроме того, если этот фактор представляет существенную величину, то он будет маскировать генетические различия между линиями, и отбор по линиям будет малоэффективным. Определены основные селекционно-генетические параметры племенных стад. Коэффициент корреляции между удоем коров за 305 дней первой лактации и сервис-периодом составил $-0,227 \pm 0,013$, коэффициент линейной регрессии соответственно ($b_{yx} = 0,45 \pm 0,033$, F тест 5,2). Между удоем полновозрастных коров за 305 дней лактации и количеством выбывших коров по плодовитости выявлена положительная коррелятивная связь ($r = +0,52 \pm 0,012$). Основные селекционно-генетические показатели стада показаны в табл. 4.

Сложность этой проблемы заключается в особенностях фертильности коров, обеспечивающих непрерывное воспроизведение с одновременной генетической адаптацией популяции [11, 12]. Расчеты показали, что при адаптивной селекции в популяции животных необходима оценка их племенных качеств с учетом уровня

Таблица 4

Селекционно-генетические показатели продуктивных и репродуктивных признаков коров в племенном репродукторе АО «Соколовский» (2021–2023 г.)

Показатель	Первая лактация			Третья лактация и старше		
	Живая масса при первом осеменении, кг	Живая масса при первом отеле, кг	Удой за 305 дней, кг	Сервис-период, дни	Удой за 305 дней, кг	Коэффициент воспроизводительной способности
Коэффициент наследуемости, h^2	0,35	0,33	0,18	0,093	0,023	0,020
Стандартное отклонение, δ_s	32,669	117,3	1081,4	45,08	174,3	0,034
Стандартное отклонение, δ_t	64,46	67,9	1183,4	139,1	1139,4	0,182
Средняя арифметическая, $\bar{x} \pm s_x$	405,4	491,2	4744,0	193,54	5577,66	0,822
Коэффициент вариации (фенотипической изменчивости C_v), %	15,9	13,8	24,9	71,87	20,42	22,14
Коэффициент генетической изменчивости, C_{vg} , %	8,0	13,8	22,78	23,25	3,119	4,136

развития адаптивного признака. Установлено, что чем однороднее в генетическом отношении популяция, тем ниже в ней генетическая изменчивость, и, наоборот, значения их возрастают с увеличением гетерогенности. Коэффициенты генетической изменчивости сильно варьировали у разных селекционных признаков. Кроме того, признаки, непосредственно связанные с фертильностью, как правило, имели невысокие коэффициенты генетической изменчивости.

В настоящее время при разведении голштинской породы в репродукторах Сахалинской области нарушения репродуктивной функции у коров являются наиболее важной проблемой. Основные показатели воспроизводства в этих хозяйствах даны в табл. 5. Из-за низкого выхода телят на 100 коров ежегодно из стада выбывает от 20 до 50% высокопродуктивных коров.

Проведенные исследования показали, что средний возраст при первом осеменении и при первом отеле во всех сельскохозяйственных предприятиях области превышает норму. При этом живая масса телок при первом осеменении соответствовала норме. Продолжительность сервис-периода коров в сельхозпредприятиях разных видов собственности значительно превышала физиологическую норму.

Выход телят в племенных репродукторах за последние два года снизился с 83 до 67%.

Происхождение коров из разных родственных групп и от разных быков-производителей значительно влияло на их воспроизводительную способность. Коровы, отцы которых принадлежали к линии Вис Бек Айдиал 1013415, характеризовались наиболее коротким сервис-периодом – 176 дней. Наиболее продолжительным сервис-период оказался у дочерей быка-производителя Миража 49025 – 368 дней. Дочери быка производителя Орлана 3376 по первой лактации отличались наиболее коротким сервис-периодом – 138 дней – и высоким уровнем молочной продуктивности – 5548 кг. По третьей лактации и старше лучшие результаты имели дочери быка производителя Дракона 85. Продолжительность сервис-периода дочерей этого быка составила 130 дней при молочной продуктивности 5677 кг (табл. 6).

Таблица 5

**Основные показатели воспроизводительной способности коров и телок
в племенных репродукторах и сельскохозяйственных предприятиях (2019–2023 гг.)**

Показатель	Сельскохозяйственные предприятия					Племенные репродукторы				
	2019	2020	2021	2022	2023	2019	2020	2021	2022	2023
Средний возраст при первом отеле, дни	779	792	780	785	779	879	874	916	942	1010
Живая масса телок при осеменении, кг	401	398	390	383	401	400	410	415	424	419
Индекс осеменения телок, раз	2,1	2,3	2,1	1,7	1,8	1,8	2,3	2,5	2,2	2,7
Индекс осеменения коров	2,6	2,6	1,9	2,1	2,0	2,5	2,0	2,2	2,4	2,7
Межотельный период, дни	416	430	422	421	422	429	430	436	451	482
Количество трудных отелов, %	14	12	14	12	11	10	10	12	10	13
Сервис-период, дней	141	155	147	146	140	154	155	161	176	197
Выход телят на 100 коров, %	70,0	74,0	75,0	74,0	74	82,5	83,0	74,0	70,0	67

**Продуктивные и репродуктивные признаки дочерей быков основных линий
в АО «Соколовский» (коровы первой лактации)**

Кличка, инв. № быка	n	Возраст первого отела, мес.		Живая масса при первом осеменении, кг		Живая масса при первом отеле, кг		Период между отелами, дни		Сервис-период, дни		Удой за 305 дней первой лактации, кг	
		$(\bar{x} \pm s_x)$	δ	$(\bar{x} \pm s_x)$	δ	$(\bar{x} \pm s_x)$	δ	$(\bar{x} \pm s_x)$	δ	$(\bar{x} \pm s_x)$	δ	$(\bar{x} \pm s_x)$	δ
Вис Бек Айдиал 1013415													
Орлан 3376	9	38±1,066	3,2	364,5±6,43	19,3	499,5±6,8	20,3	407,4±17,3	51,9	138,3±27,1	81,3	5548,4±350	1050,1
Опал 5376	6	38±0,898	2,2	366±5,839	14,3	541±21,5	52,7	449±21,43	52,5	168±19,9	48,9	4722±363,0	889,0
Аляска 423	9	33±0,400	1,2	479±13,90	41,7	351±5,8	17,3	396±12,8	38,4	112±12,0	36	5386±292,0	878,1
Маркиз 49567	19	41±0,988	4,3	386±8,306	36,2	536±9,5	41,2	513±35,1	152,8	243±34,8	151,7	4759±225,0	982,2
Ланселот 2082	8	39±0,671	1,9	362±5,410	15,3	528±12,6	35,7	423±14,5	35,7	157±12,6	35,7	4984±12,6	35,7
Рефлекшн Соверинг 198998													
Шекспир 4713	9	35±0,700	2,1	347±5,43	16,3	498±13,2	39,5	418±24,77	74,3	137±23,5	70,5	5397±271,4	814,1
Байфаль 462484	10	39±0,569	1,8	369±8,67	27,4	532±16,7	52,9	500±26,41	83,5	216±26,9	85,0	5171±453,0	1432,4
Гордый 48650	21	39±1,047	4,8	533±11,69	53,6	389±9,4	43,1	488±32,36	148,3	214±33,2	151,9	4773±203,2	931,0
Граф 49519	30	45±1,095	6,0	379±2,56	14,0	518±6,5	35,8	508±31,01	170,3	225±28,4	155,8	3679±228,3	1250,5
Мираж 49025	4	37±3,15	6,3	392±14,20	28,4	511±13,8	27,5	650±145,6	291,1	368±146,8	293,6	2933±340,6	681,1
Монтвик Чифтейн 95679													
Дракон 48557	25	40±0,500	2,5	374±4,56	22,8	510±10,90	54,5	499±20,48	102,4	218±20,1	100,6	5026±197,4	987,2
Баттерфляй 554	5	37±2,46	5,5	372±23,17	51,8	500±17,98	40,2	431±50,18	112,2	151±46,5	103,9	4690±230,2	514,8
Ног Бадус 48521820	5	33±0,94	2,1	354±6,62	14,8	494±19,86	44,4	375±20,26	45,3	95±45,3	40,9	5266±289,9	648,2

Заключение

Продолжительное разведение животных голштинской породы в условиях Сахалинской области способствовало формированию новой популяции, обладающей адаптивными селекционно-генетическими свойствами. Дальнейшее чистопородное разведение возможно при использовании геномной оценки, что позволит выявить новые адаптивные признаки и не допустить снижение ценной комбинации адаптивных генов в стаде. Однако скорость уменьшения изменчивости будет зависеть от эффективности селекционной адаптации скорости отбора, а также от числа локусов, детерминирующих структуру и уровень индивидуальных эффектов генов. Сохранение же изменчивости показало преимущество гетерозигот как фактора поддержания адаптивности. Использование животных при адаптивной селекции, находящихся в родстве и под воздействием стабилизирующего отбора, как и отбор, основанный на геномной селекции, необходим при современных методах разведения. Происхождение коров из разных родственных групп и от разных быков-производителей значительно влияло на их воспроизводительную способность и адаптивность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кузнецов В.М. Сахалинская популяция голштинской породы: монография. Чебоксары: ИД «Среда», 2020. 248 с.
2. Дзилиева Т.И., Никифоров М.А. Характеристика голштино-фризского скота, разводимого на Сахалине, и организация с ним племенной работы: годовой отчет СахКНИИ 1947. 20 с. (Рукопись).
3. Фолкнер Д.С. Введение в генетику количественных признаков / пер. с англ. А.Г. Креславского, В.Г. Черданцева; под ред. Л.А. Животовского. М.: Агропромиздат, 1985. 486 с.
4. Van Schyndel S.J., Bauman C.A., Pascottini O.B., Renaud D.L., Dubuc J., Kelton D.F. Reproductive management practices on dairy farms: The Canadian national dairy study – 2015 // *Journal of Dairy Science*. 2019. T. 102 (2). P. 1822–1831.
5. Edwards-Callaway L.N., Walker J., Tucker C.B. Culling decisions and dairy cattle welfare during transport to slaughter in the United States // *Frontiers in Veterinary Science*. 2019. Vol. 5. P. 343.
6. Bauman C.A., Barkema H.W., Dubuc J., Keefe G.P., Kelton D. Canadian National Dairy Study: Herd-level milk quality // *J. Dairy Sci.* 2018. P. 2679–2691.
7. Foksha V., Konstandoglo A. Dairy productivity of Holstein cows and realization of their genetic potential // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2019. P. 31–36.
8. Зиновьева Н.А., Позябин С.В., Чинаров Р.Ю. Вспомогательные репродуктивные технологии: история становления и роль в развитии генетических технологий в скотоводстве (обзор) // *Сельскохозяйственная биология*. 2020. Т. 55. № 2. С. 225–242.
9. Van Raden P.M., Van Tassell C.P., Wiggans G.R., Sonstegard T.S., Schnabel R.D., Taylor J.F., Schenkel F.S. Invited review: reliability of genomic predictions for North American Holstein bulls // *Journal of Dairy Science*. 2009. Vol. 92 (1). P. 16–24.
10. Wright J.R., Van Raden P.M. Genetic evaluation of dairy cow livability // *Journal of Animal Science*. 2016. Vol. 94. P. 178.
11. Hagan B.A., Cue R. Generation intervals in Canadian dairy cattle herds. // *Can. J. Anim. Sci.* 2020. Vol. 100. P. 175–183.
12. Dechow C.D., Rogers G.W. Short communication: Genetic lag represents commercial herd genetic merit more accurately than the 4-path selection model // *J. Dairy Sci.* 2018. P. 4312–4316.

REFERENCES

1. Kuznetsov V.M. Sakhalin population of the Holstein breed: monograph. Cheboksary: Publishing house “Sreda”; 2020. 248 p. (In Russ.).

2. Dzilieva T.I., Nikiforov M.A. Characteristics of Holstein-Frisian cattle bred on Sakhalin and the organization of breeding work with it. Annual report of the SAKHKNII (Manuscript). 1947. 20 p. (In Russ.).
3. Falconer D.S. Introduction to the genetics of quantitative traits. Moscow: Agropromizdat; 1985. 486 p. (In Russ.).
4. Van Schyndel S.J., Bauman C.A., Pascottini O.B., Renaud D.L., Dubuc J., Kelton D.F. Reproductive management practices on dairy farms: Canadian national dairy study – 2015. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(2):1822–1831.
5. Edwards-Callaway L.N., Walker J., Tucker C.B. Culling decisions and dairy cattle welfare during transport to slaughter in the United States. *Frontiers in Veterinary Science*. 2019;5:343.
6. Bauman C.A., Barkema H.W., Dubuc J., Keefe G.P., Kelton D. Canadian National Dairy Study: Herd-level milk quality. *J. Dairy Sci*. 2018:2679–2691.
7. Foksha V., Konstandoglo A. Dairy productivity of Holstein cows and realization of their genetic potential. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2019:31–36.
8. Zinovieva N.A., Pozyabin S.V., Chinarov R.Y. Assisted reproductive technologies: the history of their formation and their role in the development of genetic technologies in cattle breeding (review). *Agricultural Biology*. 2020;55(2):225–242. (In Russ.).
9. Van Raden P.M., Van Tassell C.P., Wiggans G.R., Sonstegard T.S., Schnabel R.D., Taylor J.F., Schenkel F.S. Invited review: reliability of genomic predictions for North American Holstein bulls. *Journal of Dairy Science*. 2009;92(1):16–24.
10. Wright J.R., Van Raden P.M. Genetic evaluation of dairy cow livability. *Journal of Animal Science*. 2016;94:178.
11. Hagan B.A., Cue R. Generation intervals in Canadian dairy cattle herds. *Can. J. Anim. Sci*. 2020;100:175–183.
12. Dechow C.D., Rogers G.W. Short communication: Genetic lag represents commercial herd genetic merit more accurately than the 4-path selection model. *J. Dairy Sci*. 2018:4312–4316.

Научная статья

УДК 636.086.2

DOI: 10.31857/S0869769825030128

EDN: POAMYI

Продуктивность и кормовая ценность однолетних травосмесей при разных сроках уборки в Камчатском крае

Н.М. Шалагина, А.А. Чебурина✉

Наталья Михайловна Шалагина

кандидат сельскохозяйственных наук
Камчатский край, с. Сосновка, Россия
Khasbiullina@kamniish.ru

Анастасия Андреевна Чебурина

младший научный сотрудник
Камчатский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал
Федерального исследовательского центра Всероссийский институт генетических ресурсов
растений имени Н.И. Вавилова, Камчатский край, с. Сосновка, Россия
Nastysha-kam@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0006-9451-8637>

Аннотация. В статье представлена сравнительная оценка кормовых травосмесей. Выявлено существенное превышение урожайности зеленой массы травосмесей над контрольными вариантами (овес и ячмень) в фазу выхода в трубку зерновых соответственно на 129,7–69,0% и 101,5–60,9%, в фазу колошения – на 33,5–127,7%. Урожайность зеленой массы при этом находилась в диапазоне 65,3–88,7 и 133,5–220,0 ц/га. Наибольшее содержание протеина в кормосмесях отмечалось в фазу выхода в трубку зерновых (у капустных – в фазу бутонизации) – 15,3–17%. В фазу колошения и молочной спелости зерновых содержание протеина снизилось до 8,0–11,0%, за исключением травосмеси овес + редька масличная, где протеина было 14,19%. Рациональные сроки уборки кормовых смесей – выход в трубку, по отдельным вариантам – колошение зерновых (овес, ячмень).

Ключевые слова: однокомпонентные и двухкомпонентные травосмеси, урожайность, питательные вещества, протеин

Для цитирования: Шалагина Н.М., Чебурина А.А. Продуктивность и кормовая ценность однолетних травосмесей при разных сроках уборки в Камчатском крае // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 3. С. 126–132. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030128>

Productivity and feed value of annual grass mixtures at different harvesting times in the Kamchatka Territory

N.M. Shalagina, A.A. Cheburina

Natalia M. Shalagina

Candidate of Agricultural Sciences

Kamchatka Krai, Sosnovka village, Russia

Khasbiullina@kamniish.ru

Anastasiya A. Cheburina

Junior Researcher

Kamchatka Scientific Research Institute of Agriculture – branch of the Federal Research Center

All-Russian Institute of Plant Genetic Resources named after N.I. Vavilov,

Kamchatka Krai, Sosnovka village, Russia

Nastysha-kam@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0006-9451-8637>

Abstract. The article presents data on the comparative assessment of fodder grass mixtures. A significant excess of the yield of the green mass of grass mixtures over the control variants (oats and barley) was revealed in the phase of entering the grain tube by 129,7–69,0% and 101,5–60,9%, respectively, in the earing phase by 33,5–127,7%. At the same time, the yield of green mass was in the range of 65,3–88,7 c/ha and 133,5–220,0 c/ha. In the phase of earing and milky ripeness of cereals, the protein content decreased to 8,0–11,0%, with the exception of oats + oilseed radish, where the protein was 14,19%. Rational timing of harvesting feed mixtures – exit into the tube, according to some options – earing of cereals (oats, barley).

Keywords: one-component and two-component herbal mixtures, yield, nutrients, protein

For citation: Shalagina N.M., Cheburina A.A. Productivity and feed value of annual grass mixtures at different harvesting times in the Kamchatka Territory. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(3):126–132. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030128>

В современных условиях развития животноводства для повышения его эффективности и снижения зависимости от зарубежной продукции возрастает роль зонального кормопроизводства. Одной из актуальных задач кормопроизводства является получение сбалансированного и высокопитательного корма. Решение данной задачи возможно за счет внедрения адаптивных сортов и создания травосмесей на их основе. Для травосмесей используются злаковые, зернобобовые и капустные культуры. Учитывая явление аллелопатии, подбираются такие культуры, которые благоприятно влияют друг на друга и повышают общую урожайность. Из злаковых культур в состав смесей включают рожь яровую, ячмень, тритикале, овес; из зернобобовых – горох кормовой и посевной, люпин узколистный; из капустных – горчицу белую, редьку масличную, рапс яровой. Эти культуры по биологическим особенностям роста и развития характеризуются как холодостойкие, быстрорастущие, требовательные к влаге и отличающиеся протеиновой питательностью [2]. Наиболее распространены двухкомпонентные и трехкомпонентные смеси однолетних культур, где соотношение компонентов составляет: злаковых – 40–60%, капустных – 25–50%. Поэтому при конструировании смесей ранних яровых культур нужно наряду с их

высокой биологической продуктивностью учитывать и кормовую ценность, прежде всего содержание в корме переваримого протеина (105–110 г в одной к.е.) и клетчатки, которой должно быть не более 24–26% в сухом веществе, с сахаропротеиновым отношением 1:1,4 [4, 5]. В общем балансе кормов в среднем 60% занимают объемистые корма, в сухом веществе зеленой массы которых содержание сырого протеина должно составлять 14–15%, тогда как в настоящее время оно не превышает 10–12%. Увеличение доли бобового и бобово-злакового растительного компонента до 70% повысит содержание сырого протеина в сухом веществе объемистых кормов до нормы. Известно, что зернобобовые дают самый высокий выход протеина, в 1,5–3 раза больше, чем у злаков. Ряд авторов рекомендуют люпин узколистный безалкалоидных или низкоалкалоидных сортов, а также рапс яровой, горчицу белую и редьку масличную выращивать в одновидовых или двухкомпонентных смесях с зерновыми культурами (овес, ячмень) [1, 3].

Лучшим сроком уборки на зеленый корм злаковых культур рекомендуют фазу выметывания (колошения), бобовых – фазу цветения. В это время зеленая масса содержит в оптимальном количестве необходимые животным питательные вещества [6, 7].

Обеспечение крупного рогатого скота круглый год достаточным количеством кормов – основная задача кормопроизводства Камчатского края. Для полноценной продуктивности в рацион животных необходимо включить «зеленый конвейер» – подкормку в течение лета свежескошенной зеленой массой (одновидовых и двухкомпонентных кормовых смесей) с достаточным количеством протеина.

Цель исследования – оценка продуктивности и кормовой ценности различных смесей однолетних кормовых культур: злаковых, бобовых и капустных при разных сроках уборки в Камчатском крае.

Задачи – провести подбор перспективных однолетних кормовых культур (редька масличная, горчица белая, люпин узколистный, рапс яровой) для создания травосмесей в сочетании со злаковыми яровыми (ячмень, овес), определить урожайность, химический состав и питательную ценность зеленой массы однолетних бинарных травосмесей по срокам уборки.

Новизна исследований состоит в том, что ранее данные исследования на кормовых культурах с изучением различных однолетних травосмесей при разных сроках уборки не проводились.

Условия, материалы и методы

Исследования проводились на экспериментальном поле Камчатского научно-исследовательского института сельского хозяйства на охристой вулканической дерново-перегнойной почве по механическому составу легко суглинистой, с низким содержанием нитратного азота (3,5 мг/кг почвы) и подвижного фосфора (35,25 мг/кг почвы), магния – 0,38 и кальция – 1,46 ммоль/100 г почвы, органического вещества – 8,89%, pH солевое – 4,4.

В схему опыта были включены следующие кормовые смеси: овес + редька масличная, ячмень + редька масличная, овес + горчица белая, ячмень + горчица белая, овес + рапс яровой, ячмень + рапс яровой, овес + люпин узколистный, ячмень + люпин узколистный; из одновидовых – овес, ячмень, рапс, люпин узколистный. Применялись сорта: овес – Покров 2, ячмень – Восточный, люпин – Орловский, рапс яровой – Грант, редька масличная – Снежана. В качестве базовых (контрольных) культур применяли овес и ячмень яровой. Предшественник – чистый пар. Предпосевная обработка почвы состояла из дискования с последующей культивацией. Минеральные удобрения из расчета (NPK)90 вносились перед посевом. Посев кормовых смесей проводился 1 июня. Учетная площадь опытной делянки 30 м², повторность четырехкратная,

общая площадь опытного участка 1500 м². Уборка зеленой массы проводилась в три срока: на ячмене и овсе – в фазы выхода в трубку, колошения, выбрасывания метелки (овес), молочной спелости зерна; на капустных – в фазы бутонизации, цветения, образования стручков, на люпине узколистом – в фазы бутонизации, цветения, сизого боба. Наблюдения и учеты велись по методике ВНИИ кормов. Биохимические анализы растительных проб выполнялись в лаборатории агрохимических анализов Камчатского НИИСХ. Математическая обработка опытных данных проводилась по Б.А. Доспехову.

Результаты исследований

В фазе выхода в трубку зерновых (овес, ячмень) урожайность зеленой массы двухкомпонентных кормовых смесей существенно превысила одновидовой посев овса (контроль) в вариантах: овес + редька масличная на – 129,8%, овес + горчица белая – на 67,1% и овес + рапс яровой – на 69,2%. Существенное превышение над контролем (ячмень) отмечалось также в смесях: ячмень + редька масличная – на 101,5%, ячмень + горчица белая – на 63,0%, ячмень + рапс яровой – на 60,9%. В первый срок уборки зеленая масса одновидового посева рапса была практически на уровне двухкомпонентных смесей рапса с овсом и ячменем. Урожайность одновидового люпина была ниже его смесей с овсом и ячменем на 13,5 и 10,5 ц/га. В фазу колошения значительное превышение урожайности зеленой массы над контролем (овес) было отмечено в кормовых смесях: овес + редька масличная – на 127,7%, овес + горчица белая – на 26,3, овес + рапс яровой – на 35,6%; над контрольным ячменем превышение отмечалось в вариантах: ячмень + редька масличная – на 90,9%, ячмень + горчица белая – на 27,1%, ячмень + рапс яровой – на 33,5%. Урожайность одновидового посева рапса была ниже его травосмесей с овсом и ячменем соответственно на 16,5 и 19,0 ц/га, урожайность люпина – почти на уровне его травосмесей. В фазу молочной спелости зерна существенное повышение урожайности кормовых смесей над овсом и ячменем было в вариантах овес + редька масличная и ячмень + редька масличная – соответственно на 63,0 и на 46,1%. Урожайность одновидовых посевов рапса и люпина в третий срок уборки была практически на одном уровне с их травосмесями (табл. 1).

На питательности зеленого корма сказываются сроки его уборки. Содержание протеина в первый срок уборки в фазе выхода в трубку (зерновые) и цветение (капустные и люпин) было наибольшим в смесях, где присутствовала редька масличная, – 15,30–17,10%. По отдельным вариантам опыта также отмечалось увеличение содержания протеина по сравнению с овсом и ячменем соответственно на 1,70–2,60 и на 0,80–1,60%. Следует отметить, что в одновидовом посеве люпина содержание протеина было также на оптимальном уровне (14,60%), что выше содержания его в травосмесях на 4,3 и 4,6%. В фазе колошения зерновых и молочной спелости зерна количество протеина снизилось почти по всем вариантам с травосмесями до 8,00–11,06%, за исключением оптимальных вариантов: рапс яровой (15,44 и 20,94%), люпин узколистый (13,88 и 18,56%) и овес + редька масличная – фаза молочной спелости овса (14,19%). Известно, что сухое вещество корма делится на органическую (сгораемую) часть и неорганическую (несгораемую) – минеральные (зольные) вещества. Содержание золы в кормовых смесях по трем срокам уборки несколько превышало содержание в контрольных вариантах и находилось в диапазоне: 1-й срок – от 4,4 до 9,0%, 2-й – 4,9–8,6% и 3-й – 5,7–8,8% (табл. 2).

Основным источником кальция для сельскохозяйственных животных как в летний, так и в зимний период являются корма растительного происхождения. Известно, что

Таблица 1

**Урожайность кормовых смесей однолетних культур в различных сочетаниях
при разных сроках уборки, в среднем за 2021–2022 гг., ц/га**

Вариант опыта	1-й срок уборки		2-й срок уборки		3-й срок уборки	
	Зеленая масса	Сухое вещество	Зеленая масса	Сухое вещество	Зеленая масса	Сухое вещество
Овес (контр.)	38,6	8,24	96,6	36,77	108,0	32,46
Ячмень (контр.)	39,7	8,48	100,0	40,58	109,5	26,90
Рапс яровой	62,0	14,92	114,5	24,99	131,0	30,36
Люпин узколистный	30,5	6,08	96,0	17,17	120,0	15,35
Овес + редька масличная	88,7	18,86	220,0	58,76	176,0	26,93
Ячмень + редька масличная	80,0	14,57	190,9	35,51	160,0	30,62
Овес + горчица белая	64,5	11,21	122,0	29,16	118,0	30,74
Ячмень + горчица белая	64,7	10,41	127,1	35,71	111,0	28,98
Овес + рапс яровой	53,0	10,32	131,0	28,75	121,5	25,33
Ячмень + рапс яровой	63,9	9,81	133,5	41,05	115,5	30,48
Овес + люпин узколистный	44,0	9,26	105,2	24,59	96,0	18,48
Ячмень + люпин узколистный	41,0	7,63	102,5	22,11	105,5	20,89
НСР овес	14,1	–	7,6	–	25,6	–
НСР ячмень	7,1	–	22,8	–	7,3	–

Таблица 2

Содержание золы и сырого протеина в кормах, среднее за 2021–2022 гг., %

Вариант опыта	1-й срок		2-й срок		3-й срок	
	Зола	Сырой протеин	Зола	Сырой протеин	Зола	Сырой протеин
Овес (контроль)	5,99	8,0	4,88	7,63	4,90	9,44
Ячмень (контроль)	3,92	11,60	5,69	9,13	4,89	7,50
Рапс яровой	9,04	12,00	8,41	15,44	8,37	20,94
Люпин узколистный	8,64	14,60	6,50	13,88	8,88	18,56
Овес + редька масличная	7,79	15,30	–	10,69	7,25	14,19
Ячмень + редька масличная	4,40	17,10	6,57	11,88	6,12	11,00
Овес + горчица белая	6,89	10,60	4,99	8,00	6,33	10,88
Ячмень + горчица белая	6,56	13,20	8,67	11,06	5,72	11,19
Овес + рапс яровой	7,52	10,30	6,81	11,06	5,78	11,13
Ячмень + рапс яровой	7,84	12,40	4,92	10,56	5,77	11,25
Овес + люпин узколистный	–	10,30	7,10	8,44	7,60	11,31
Ячмень + люпин узколистный	5,82	10,00	6,79	10,19	6,83	9,75

Таблица 3

Содержание кальция и фосфора в зеленой массе травосмесей, среднее за 2021–2022 гг., %

Вариант опыта	1-й срок		2-й срок		3-й срок	
	Ca	P	Ca	P	Ca	P
Овес (контроль)	0,55	–	1,55	0,60	1,74	1,10
Ячмень (контроль)	0,65	0,42	2,85	0,81	0,24	0,15
Рапс яровой	1,10	0,66	2,28	0,51	0,35	0,11
Люпин узколистый	2,74	0,88	2,70	0,15	0,70	0,44
Овес + редька масличная	0,77	0,54	0,93	0,39	2,64	0,62
Ячмень + редька масличная	1,25	0,47	0,64	0,61	0,71	0,45
Овес + горчица белая	0,66	0,57	0,65	0,32	1,28	0,67
Ячмень + горчица белая	0,86	0,49	0,71	0,33	0,56	0,33
Овес + рапс яровой	0,84	0,55	0,91	0,34	0,93	0,45
Ячмень + рапс яровой	1,05	0,60	0,68	0,43	1,94	1,14
Овёс + люпин узколистый	1,04	0,45	0,86	0,16	0,35	0,15
Ячмень + люпин узколистый	–	–	1,55	0,20	0,30	0,21

оптимальное содержание кальция для бобовых – 1,20–1,85%, для злаковых культур – 0,65–0,80% в сухом веществе. В нашем опыте вариант с люпином узколистым отличался высоким содержанием кальция до 2,70% в сухом веществе с понижением в 3-м сроке уборки кормовых смесей до 0,70%. В целом количество кальция по всем вариантам было на уровне средней обеспеченности и колебалось от 0,66 до 1,25% в сухом веществе. Наметилась тенденция превышения содержания кальция над контролями (овес и ячмень) в первом сроке уборки кормовых смесей соответственно на 0,10–0,30 и на 0,20–0,60%. Основным источником фосфора для животных являются корма растительного происхождения. Содержание фосфора в растениях составляет в среднем 0,5% сухого вещества, изменяясь от 0,1 до 1,5%, и зависит от биологических особенностей культур, возраста растений и их органов, условий фосфорного питания. Оптимальное содержание фосфора в кормах – 0,35–0,55% в сухом веществе [5]. В наших исследованиях содержание фосфора в кормовых смесях находилось на оптимальном уровне и составляло по 1-му сроку уборки 0,45–0,88%, по 2-му – 0,32–0,61%, по 3-му – 0,33–1,14% в сухом веществе. Отмечалось некоторое снижение (ниже оптимального) содержания фосфора в кормовых смесях с люпином узколистым (табл. 3).

Заключение

В результате проведенных исследований установлено существенное увеличение урожайности кормовых смесей в фазу выхода в трубку зерновых: превышение над контрольными вариантами (овес, ячмень) составило соответственно 50,1 ц/га (129,7%) и 40,8 ц/га (101,5%). Урожайность зеленой массы была 65,3–88,7 ц/га. В фазу колошения достоверная прибавка урожайности зеленой массы по сравнению с контролями составила 25,4 ц/га (26,3%) – 123,4 ц/га (127,7%). В фазу мо-

лочной спелости зерна смеси овес + редька масличная и ячмень + редька масличная по урожайности превысили контроль соответственно на 68 и 51 ц/га (62,9 и 46,1%). Урожайность зеленой массы при этом составила 176,0 и 160,0 ц/га. Оптимальное содержание протеина в травосмесях – в фазе выхода в трубку зерновых (у капустных – в фазе бутонизации) – 15,3–17,0%. В фазе колошения и молочной спелости зерна содержание снижалось до 8–11%. Сроки уборки – фаза выхода в трубку, фаза колошения – у кормовой смеси овес + редька масличная. Содержание кальция и фосфора в сухом веществе по всем вариантам опыта в основном было на уровне средней обеспеченности и колебалось соответственно от 0,66 до 1,25 и от 0,45 до 1,14%.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Артюхов А.И., Исаев Е.И. Люпин в кормопроизводстве Нечернозёмной зоны России // Кормопроизводство. 2010. № 4. С. 25–26.
2. Брусникина Т.П., Рысин Е.Н. Урожайность кормовых посевов однолетних семей в условиях Костромской области // Вестник КрасГАУ. Сельскохозяйственные науки. 2018. № 3. С. 35–39.
3. Ползухин П.В., Николаев П.Н. Оценка продуктивности и адаптивных свойств сортов ярового ячменя в условиях Сибирского Прииртышья // Земледелие. 2018. № 3. С. 40–41.
4. Такунов И.П., Новиков М.Н. Смешанные посевы белого люпина с яровой пшеницей // Кормопроизводство. 2016. № 3. С. 25–27.
5. Чуйков В.А., Худякова Х.К., Косолапова В.Г. Минеральные элементы в кормах и методы их анализа: монография. М.: ООО «Угрешская типография», 2019. С. 12–23.
6. Шелото А.А. Кормопроизводство: учебник для студентов высших учебных заведений по агрономическим специальностям. ИВЦ Минфина, 2009. С. 165–170.
7. Яковчик Н.С. Кормопроизводство. Современные технологии. Барановичи: Баранов. укрупн. тип., 2004. С. 31–46.

REFERENCES

1. Artyukhov A.I., Isaev E.I. Lupin v kormoproizvodstve Nechernozemnoj zony Rossii. *Kormoproizvodstvo*. 2010;(94):25–26. (In Russ.).
2. Brusnikina T.P., Rysin E.N. Yield of fodder crops of one-year families in the conditions of the Kostroma region. *Agricultural Sciences. Vestnik KrasGAU*. 2018;(3):35–39. (In Russ.).
3. Polzukhin P.V., Nikolaev P.N. Evaluation of productivity and adaptive properties of spring barley varieties in the conditions of the Siberian Irtyshya. *Agriculture*. 2018;(3): 40–41. (In Russ.).
4. Takunov I.P., Novikov M.N. Mixed crops of white lupine with spring wheat. *Kormoproizvodstvo*. 2016;(3):25–27. (In Russ.).
5. Chuikov V.A., Khudyakova Kh.K., Kosolapova V.G. Mineral elements in kormah and methods of their analysis: monograph. Moscow: ООО “Ugreshskaya tipografiya”; 2019. 12 s. (In Russ.).
6. Sheluto A.A. Forage production: a textbook for students of higher educational institutions in agroeconomic specialties. Information Center of the Ministry of Finance; 2009. P. 165–170. (In Russ.).
7. Yakovchik N.S. Forage production. Modern technologies. Baranovich: Baranov. enlarged. type.; 2004. P. 31–46. (In Russ.).

Научная статья

УДК 635.21:631.527

DOI: 10.31857/S0869769825030133

EDN: POAPKU

Перспективные гибридные комбинации при селекции картофеля на фитофтороустойчивость в Магаданской области

Г.В. Тищенко

Галина Васильевна Тищенко

старший научный сотрудник

Магаданский НИИСХ – филиал ВИР, Магадан, Россия

galinataiga@mail.ru

<http://orcid.org/0009-0003-5901-1193>

Аннотация. Фитофтороз является наиболее распространенным заболеванием картофеля на Севере Дальнего Востока. В случае благоприятных для развития фитофтороза условий, вызванных наступлением периода дождей и резкого колебания ночных и дневных температур, болезнь быстро распространяется и через 5–10 дней приводит к полной гибели растений. Цель исследований заключалась в оценке гибридных комбинаций на устойчивость к фитофторозу и выявлении среди них высокопродуктивных образцов, перспективных для создания новых сортов картофеля с высокой полевой устойчивостью к фитофторозу. Всего исследовано около 200 гибридных популяций, среди которых определены гибридные комбинации перспективные для селекции на фитофтороустойчивость и высокую продуктивность. Комбинации представлены среднеспелыми и ранними сортами с высокой полевой устойчивостью к фитофторозу Барака × Аусония, Удача × Аусония, Дар × 1198-2. Гибридные комбинации, представленные высокоустойчивыми к фитофторозу среднепоздними или позднеспелыми сортами, такими как Зарево, Кардинал, Гранола, Пикассо, низкоурожайны, но могут стать основой для нового сорта, способного сформировать достаточно высокий урожай в годы эпифитотий. Потомство гибридных комбинаций с раннеспелыми сортами Удача, Аусония, хотя и характеризуется восприимчивостью к фитофторозу, но способно сформировать высокий урожай в ранние сроки, что позволяет получить высокий товарный урожай до массового развития фитофтороза. Бесперспективны для исследований гибридные комбинации, происходящие от сортов Адора, Волжанин, Жуковский ранний, Черниговский, Лира, Лина. Для их потомства характерны не только сильная восприимчивость к фитофторозу по ботве, но и низкая лежкость, связанная с загниванием клубней в период хранения.

Ключевые слова: сорт, гибриды, гибридные комбинации, эпифитотии, фитофтора, фитофтороустойчивость, продуктивность

Для цитирования: Тищенко Г.В. Перспективные гибридные комбинации при селекции картофеля на фитофтороустойчивость в Магаданской области // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 3. С. 133–145. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030133>

Promising hybrid combinations for potato breeding for late blight resistance in the Magadan Region

G.V. Tishchenko

Galina V. Tishchenko

Senior Researcher

Magadan Research Institute of Agriculture – branch of VIR, Magadan, Russia

galinataiga@mail.ru

<http://orcid.org/0009-0003-5901-1193>

Abstract. Late blight is the most common potato disease in the North of the Far East. In the case of conditions favorable for the development of late blight, caused by the onset of a rainy period and sharp fluctuations in night and day temperatures, the disease spreads quickly and after 5–10 days leads to the complete death of plants. The purpose of the research was to evaluate hybrid combinations for their resistance to late blight and to identify among them highly productive samples that are promising for creating new potato varieties with high field resistance to late blight. In total, about 200 hybrid combinations were studied, among which hybrid combinations were identified that were promising for breeding for late blight resistance and high productivity. These are combinations represented by mid-season and early varieties with high field resistance to late blight Baraka × Ausonia, Udacha × Ausonia, Dar × 1198-2. Hybrid combinations represented by mid-late or late-ripening varieties highly resistant to late blight, such as Zarevo, Cardinal, Granola, Picasso, are low-yielding, but can become the basis for a new variety that can form a fairly high yield in epiphytotic years. The offspring of hybrid combinations with early ripening varieties Udacha and Ausonia, although characterized by susceptibility to late blight, are able to form a high yield in the early stages, which makes it possible to obtain a high commercial yield before the massive development of late blight. Hybrid combinations having in their origin the varieties Adora, Volzhanin, Zhukovsky ranniy, Chernigovsky, Lira, Lina are unpromising for research. Their offspring are characterized not only by a strong susceptibility to late blight on the tops, but also by low shelf life associated with rotting of the tubers during storage.

Keywords: variety, hybrids, hybrid combinations, epiphytotic, late blight, late blight resistance, productivity

For citation: Tishchenko G.V. Promising hybrid combinations for potato breeding for late blight resistance in the Magadan Region. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(3):133–145. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030133>

Введение

Картофель относится к числу культур, в сильной степени поражаемых болезнями. Вегетативное размножение последнего определяет возможность постоянного существования возбудителей болезней в паразитически активной форме: на ботве в период вегетации и в клубнях в период хранения. Сочные, богатые углеводами и водой ботва и клубни являются благоприятной средой обитания для всех групп возбудителей болезней. Условия, определяющие возможность возбудителей вести активный паразитический образ жизни на протяжении периода вегетации и периода хранения, определяют и многообразие микроорганизмов, являющихся возбудителями болезней картофеля (грибы, бактерии, вирусы, вирионы, микоплазмы) [1].

Среди болезней картофеля особое место занимает фитофтороз, возбудителем которого служит оомицет *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary. Потери урожая резко возрастают при эпифитотийном развитии заболевания в климатических условиях, благоприятных для развития патогена, или вследствие появления новых патотипов *P. infestans*, которые менее восприимчивы к фунгицидам и поражают сорта картофеля, ранее устойчивые к этой болезни [2].

Фитофтороз (*Phytophthora infestans* Mont. de Bary) – одна из самых вредоносных, быстро распространяющихся болезней картофеля, которая резко снижает его урожай и поражает клубни во время хранения. Проявляется фитофтороз чаще всего с конца мая по август. Особенно быстро распространяется в дождливые годы, а также при резкой смене дневной и ночной температур, сопровождающейся обильными росами и туманами [3].

Фитофтороз, возбудителем которого является оомицет *Phytophthora infestans* Mont. (de Bary), был и остается фактором, существенно снижающим урожай картофеля во всех картофелепроизводящих странах мира [4].

В последние годы вредоносность этого заболевания возрастает. Оомицет *P. infestans* начал поражать картофель на протяжении всей вегетации, начиная со времени появления всходов и до естественного отмирания ботвы. Болезнь появляется на всех сортах, независимо от группы спелости. Начальные симптомы чаще всего появляются на верхних листьях и стеблях, затем только на средних и нижних, что сделало фитофтороз еще более вредоносным [5].

В течение последних лет фитофтороз обнаруживается на картофельных полях необычно рано. За последние 3–4 десятилетия произошло смещение календарных сроков первого проявления заболевания на 1–1,5 месяца. В настоящее время первые инфекционные пятна находят уже начиная с фазы смыкания ботвы в рядах, а иногда даже раньше – со времени полных всходов картофеля. Увеличился риск сильного заражения клубней [6].

Существенно возросла и агрессивность патогена, он стал менее зависим от температуры и влажности воздуха. Так, изоляты «новых» популяций способны инфицировать растения картофеля в интервале от 3 до 27°C, в то время как для изолятов «старых» популяций этот интервал составлял 8–23°C. При одинаковой температуре для инфекции растений изолятами «новых» популяций требуется почти в два раза меньший период капельно-жидкой влаги на листьях [7].

Наиболее эффективным в борьбе с вредителями и болезнями является селекционный путь – выведение генетически устойчивых сортов картофеля, способных давать урожай при минимальном количестве химических обработок или вовсе без них [8].

Лучший способ противостоять такой угрозе – упреждающая селекция: создание устойчивых к фитофторозу сортов картофеля с использованием доноров на основе межвидовых гибридов, которые содержат гены устойчивости, перенесенные из дикорастущих сородичей культуры [2].

Контролирование полевой устойчивости к фитофторе аддитивно действующими полигенами показывает, что подбор и отбор по фенотипу высокоэффективны для использования в селекционных программах. Чем выше устойчивость родительских форм, тем выше устойчивость потомства и тем ценнее исходная форма [7].

Среди сортов разных сроков созревания позднеспелые чаще проявляют высокую устойчивость к болезни. Задачей многих селекционных программ является создание фитофтороустойчивых клонов с ранними сроками созревания [9].

Выведение новых продуктивных сортов подразумевает сочетание высокой устойчивости с хорошим качеством клубней. Важным признаком является также раннеспелость сортов, уводящая растения от поражения фитофторозом во второй половине августа, когда развитие инфекции достигает высокого уровня [9].

На севере Дальнего Востока фитофтороз является наиболее распространенным заболеванием картофеля. В Магаданской области фитофтороз впервые зарегистрирован в 1957 г., а в 1958 г. отмечалось его эпифитотийное развитие заболевания [10].

Главный источник распространения фитофтороза на севере Дальнего Востока – больные клубни. Высаженные в поле, они создают очаги инфекции. При наличии благоприятных для развития болезни условий (умеренная температура 10–15°C, часто выпадающие осадки, туманы) фитофтора очень быстро распространяется в поле и в течение 7–10 дней может уничтожить всю ботву [11].

В массовом масштабе фитофтороз на севере Дальнего Востока наблюдается не каждый год. По нашим наблюдениям, первые признаки, в зависимости от погодных условий, начинают проявляться в конце I – начале II декады августа. Связано это с наступлением периода обильного выпадения осадков, понижением дневных и ночных температур, что и создает благоприятные условия для его развития. Чаще всего массовое развитие фитофтороза наблюдается в III декаде августа, непосредственно перед уборкой. Это не столько приводит к снижению урожайности, сколько существенно влияет на его сохранность. В период уборки при контакте с больной ботвой происходит заражение клубней. Даже при слабом поражении надземной массы степень заражения клубней может быть значительной. Объясняется это тем, что в условиях севера клубни физиологически не вызревают, имеют тонкую и непрочную кожуру, которая даже при самом небольшом механическом воздействии разрушается. Поэтому наибольший вред фитофтороз приносит во время хранения. Пораженные клубни загнивают уже в первый период хранения. Потери от фитофтороза в этом случае достигают 15–20%, а в некоторые годы до 50%, и, если своевременно не будет произведена переборка клубней, может произойти загнивание всей партии [12, 13].

Особенностью проявления фитофтороза в условиях севера Дальнего Востока является его более позднее наступление по сравнению с центральными регионами страны. По нашим наблюдениям, первые признаки фитофтороза в виде единичных пятен обычно появляются в начале I декады августа на раннеспелых слабоустойчивых сортах и гибридах. В случае благоприятных для развития фитофтороза условий, возникающих с наступлением периода дождей и резкого колебания ночных и дневных температур, заболевание распространяется быстро, и через 5–10 дней у неустойчивых к фитофторозу образцов ботва погибает полностью. Поэтому создание сортов, сочетающих в себе скороспелость и устойчивость к фитофторозу, является приоритетным направлением в селекции картофеля на севере Дальнего Востока.

Цель исследований – оценить гибридные комбинации по фитофтороустойчивости и выделить среди них высокопродуктивные образцы, перспективные для создания новых сортов картофеля с высокой полевой устойчивостью к фитофторозу.

Материалы и методика исследований

Исследования проводились на опытном поле Магаданского научно-исследовательского института сельского хозяйства, расположенном в Приохотской зоне Магаданской области. Почвы участка дерново-аллювиальные, галечниково-супесчаные. Для почв характерна незначительная биологическая активность и пониженная степень усвояемости элементов питания.

Содержание питательных веществ высокое, агрохимические показатели почвы следующие (в мг/100 г): азот аммиачный – 0,8–1,35; азот нитратный – 0,41–0,65; фосфор (P_2O_5) – 82,0–131,0; калий (K_2O) – 9,93–12,04. Почвы слабокислые, pH соле-

вая от 4,36 до 4,93. Содержание гумуса в пределах показателей, характерных для дерново-подзолистых почв района проводимых исследований, и составляет 2,59–3,26.

Микрорельеф слабовыраженный, имеются незначительные понижения. Предшественник – однолетние травы.

Исследования велись согласно Методическим указаниям по технологии селекционного процесса картофеля, разработанным в ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха и на основе их гибридного материала (ботанические семена) и Методики проведения полевых обследований и послеуборочного контроля качества семенного картофеля [14, 15].

Полевую оценку устойчивости к фитофторозу на естественном инфекционном фоне проводили каждые 5 дней с начала появления первых признаков фитофтороза *P. infestans* на растениях по 9-балльной шкале, где 9 баллов – поражение отсутствует, 7 – слабая степень поражения, 5 – средняя, 3 – сильная, 1 – очень сильная степень поражения [16].

Высадку семян в поле осуществляли во II декаде июня при температуре почвы 8–10°C по схеме 40×70 см с обязательным поливом.

Оценку клубней на поражаемость фитофторозом проводили дважды: после проведения лечебного хранения (через месяц после уборки) и перед выкладкой клубней на яровизацию. Клубни выкладывали на яровизацию за 45 дней до предполагаемой посадки.

Минеральные удобрения вносились вручную при посадке локально из расчета в действующем веществе $N_{60} P_{60} K_{60}$ и в подкормку перед окучиванием $N_{60} P_{60} K_{60}$.

Уход за посадками включал обработку против личинок мертвоеда гладкого инсектицидом Инта-Вир и две междурядные обработки. Уборка проводилась вручную поделаячно и покустно.

Результаты и обсуждение

Исследования по селекции картофеля впервые начались в 2002 г. и продолжаются по настоящее время. За этот период массовое развитие фитофтороза наблюдалось в 2002 и 2005 гг., умеренное – в 2006, 2010, 2012, 2013, 2016 и 2022 гг.

Предварительная оценка фитофтороустойчивости гибридных комбинаций была дана в питомнике перспективных семян в годы массового и умеренного развития фитофтороза, где уже на начальных этапах были отбракованы образы с устойчивостью к фитофторозу в пределах 1–3 балла. По нашим наблюдениям, первые признаки фитофтороза в виде единичных пятен обычно появляются в начале I декады августа на раннеспелых слабоустойчивых сортах и гибридах. В случае благоприятных для развития фитофтороза условий, возникающих с наступлением периода дождей и резкого колебания ночных и дневных температур, заболевание распространяется быстро, и через 5–10 дней у неустойчивых к фитофторозу образцов ботва погибает полностью.

Всего изучено около 200 гибридных комбинаций. В таблицах показаны результаты исследований гибридных комбинаций, изучаемых в годы с массовым и умеренным развитием фитофтороза, поскольку в годы, благоприятные по фитопатологической обстановке, достоверно оценить фитофтороустойчивость гибридных комбинаций в полевых условиях не представляется возможным. Исследовались гибридные комбинации, представленные сортами с разной степенью устойчивости к фитофторозу.

В табл. 1 дана оценка гибридных комбинаций, имеющих в своем происхождении фитофтороустойчивые сорта. Анализ этих гибридных комбинаций показывает,

что при селекции наибольшим выходом фитофтороустойчивых образцов в условиях Севера Дальнего Востока области являются комбинации, представленные сортами с устойчивостью к фитофторозу 7–9 баллов (табл. 1).

При этом в целом более высоким выходом фитофтороустойчивых образцов отмечались комбинации, где фитофтороустойчивый родитель был представлен материнской

Таблица 1

Оценка гибридных комбинаций, имеющих в своем происхождении фитофтороустойчивые сорта

№ п/п	Гибридная комбинация	Тип скрещивания	Высажено в поле, шт.	Частота отбора, %	Доля образцов с устойчивостью к фитофторозу 1–3 балла, %
1	128-6/ × Верб	С × У	18	33,3	5,5
2	733-65 × Черниговский	С × У	112	47,3	27,6
3	81.14/61 × Выток	С × У	78	82,2	18,0
4	81.14/61 × Верб	С × У	58	27,6	31,0
5	Saturna × Луговской	С × У	108	38,9	6,5
6	Аусония × Верб	С × У	31	12,9	45,2
7	Волжанин × Черниговский	С × У	72	52,8	26,4
8	Накра × Рая	С × У	90	40,0	15,5
В среднем по группе					22,0
1	Зарево × Адора	У × Н	22	0,0	4,5
2	Зарево × Конкорд	У × Н	76	15,8	31,6
3	Зарево × 733-65	У × С	140	7,9	2,1
4	Зарево × Выток	У × С	188	36,2	13,9
5	Зарево × Кардинал	У × С	81	50,6	11,1
6	Зарево × Пост-86	У × С	199	31,2	19,1
7	Ласунак × Симбирянин	У × С	137	20,4	18,8
8	Лина × Аусония	У × С	41	26,8	36,7
9	Лина × Свитанок киевский	У × С	51	94,1	5,9
10	Сату × Белорусский-3	У × С	122	24,6	18,0
11	Удача × Амадеус	У × С	240	20,8	14,6
12	Удача × Аусония	У × С	182	26,4	28,1
13	Удача × Гранола	У × С	240	61,3	9,2
14	Удача × Пост-86	У × С	140	69,3	7,7
15	Удача × Романо	У × С	272	29,8	23,1
В среднем по группе					16,3

Примечание. Устойчивость: У – 7–9 баллов, С – 5–6 баллов, Н – 1–3 балла.

формой. В среднем здесь сильно поразило фитофторой 16,3% образцов против 22,0% в комбинациях, где фитофтороустойчивый сорт представлен отцовской формой. В целом наименьшая степень поражения гибридного потомства фитофторозом здесь отмечена в комбинациях, представленных сортами Зарево и Удача, таких как Зарево × Адора – 4,5%, Зарево × 733-65 – 2,1%, Удача × Пост-86 – 7,7% и Удача × Гранола – 9,2% (см. табл. 1). Больше всего больных растений отмечено в комбинациях с сортом Аусония, таких как Аусония × Верба – восприимчиво 45,2% растений, Лина × Аусония – 36,7% и Удача × Аусония – 28,1%, а также Зарево × Конкорд и 81.14/61 × Верба, 31,6% и 31,0% соответственно. В этих же комбинациях отмечается и невысокая частота отбора (см. табл. 1).

Низкая восприимчивость к фитофторе отмечалась также у гибридов комбинаций 128-6 × Верба – сильно восприимчиво 5,5%, Saturna × Луговской – сильно восприимчиво 6,5% и Лина × Свитанок киевский – 5,9% от количества высаженных в поле (см. табл. 1). Однако большинство выделенных здесь фитофтороустойчивых образцов характеризовались низкой продуктивностью, связанной с их позднеспелостью. Растения имели длинные столоны, клубни плохо отходили от них, в связи с чем дальнейшее исследование по ним было признано нецелесообразным.

Как наиболее перспективные в этой группе выделены комбинации с сортом Удача. Здесь в дальнейшем в конкурсном испытании было изучено 16 гибридов, характеризующихся высокой урожайностью и устойчивостью к фитофторозу.

В группе гибридных комбинаций, представленных среднеустойчивыми сортами, была выявлена взаимосвязь между скороспелостью родительских форм и степенью восприимчивости к фитофторозу. Так, наибольшее количество восприимчивых к фитофторозу гибридов было отмечено там, где одна из родительских форм представлена ранними сортами, такими как Аусония, Адора, Тимо, Жуковский ранний, независимо от того, материнской или отцовской формой она представлена. В таких комбинациях, как Волжанин × Аусония, Лира × Аусония, Тимо × Аусония, Жуковский ранний × Раджа, около половины исследуемых образцов было сильно поражено фитофторозом. Существенное снижение восприимчивости к фитофторозу наблюдается в комбинациях с сортом Мавка, особенно в комбинации с позднеспелым сортом. Например, в комбинации раннего сорта Мавка со среднепоздним сортом Кардинал сильно восприимчивыми к фитофторозу оказались всего 6,2% растений, а в комбинации Мавка × Arnika – 8,0% (табл. 2).

Самая низкая поражаемость растений фитофторозом отмечена в группе гибридов, представленных комбинацией среднеранних и среднеспелых сортов. Здесь доля восприимчивого потомства в среднем более чем в 2 раза ниже, чем в комбинациях с раннеспелыми сортами, и составляет в среднем 14,7% (см. табл. 2). Наиболее устойчивыми оказались гибриды комбинаций 81.14/61 × Ягодка – 6,2%, Мавка × Кардинал – 6,5% сильно восприимчивых семян.

Снижение доли восприимчивого потомства наблюдалось и в комбинациях со среднепоздними и поздними сортами, где лучшие показатели у комбинации Гранола × Пикассо – 8,6% восприимчивых к фитофторозу семян от общего числа высаженных в поле (см. табл. 2).

Наличие в гибридной комбинации неустойчивых к фитофторе сортов значительно повышало долю неустойчивого к фитофторозу потомства, особенно если неустойчивый к фитофторе сорт был представлен в виде материнской формы. Так, если среди гибридного потомства, где восприимчивый сорт представлен отцовской формой, восприимчивость к фитофторе в среднем составила 29,9%, то в группе с неустойчивой материнской формой восприимчивых семян было от 33,3% в комбинации Белая ночь × 1198-2 до 62,8% в комбинации Жуковский ранний × Arnika. А в среднем по группе этот показатель составил 45,3% (табл. 3).

Таблица 2

Оценка гибридных комбинаций, имеющих в своем происхождении среднеустойчивые сорта

№ п/п	Гибридные комбинации	Тип скрещивания по фитофтороустойчивости	Тип скрещивания по скороспелости	Высажено в поле, шт.	Частота отбора, %	Доля образцов с устойчивостью к фитофторозу 1–3 балла, %
1	81.14/61 × Аусония	С × С	Ср. ран × ран.	112	66,7	8,9
2	Барака × Аусония	С × С	Ср. ран. × ран.	359	25,9	17,9
3	Волжанин × Адора	С × С	Ср. ран. × ран.	108	34,3	28,7
4	Волжанин × Аусония	С × С	Ср. ран. × ран.	90	1,1	46,7
5	Лира × Аусония	С × С	Ср. ран. × ран.	50	28,0	58,0
6	Симбирянин × 128-б	С × С	Ср. ран. × ран.	180	35,6	40,2
7	Тимо × Аусония	С × С	Ран. × ран.	88	18,2	46,6
8	Мавка × Arnika	С × С	Ран. × ср. ран.	75	37,3	8,0
9	Жуковский ранний × Раджа	С × С	Ран. × ср. ран.	176	21,6	53,4
10	Мавка × Кардинал	С × С	Ран. × ср. позд.	31	58,0	6,5
В среднем по группе						31,4
1	Дар × 1198-2	С × С	Ср. сп. × ср. ран.	75	73,3	10,7
2	81.14/61 × Ягодка	С × С	Ср. ран. × ср. ран.	130	69,2	6,2
3	Свитанок киевский × Романо	С × С	Ср. ран. × ср. ран.	250	12,0	11,1
4	Пост-86 × Гранола	С × С	Ср.ран. × ср. сп.	65	27,7	30,8
В среднем по группе						14,7
1	Волжанин × Saturna	С × С	Ср. ран. × ср. позд.	140	70,7	18,6
2	Свитанок киевский × Saturna	С × С	Ср. ран. × ср. позд.	82	50,0	13,4
3	Волжанин × Лыковский	С × С	Ср. ран. × ср. позд.	65	50,8	27,7
4	Симбирянин × Кардинал	С × С	Ср. ран. × ср. позд.	145	14,5	46,9
5	Кардинал × Ягодка	С × С	Ср. позд. × ср. позд.	100	33,0	16,0
6	Гранола × Пикассо	С × С	Ср. позд. × позд.	140	74,3	8,6
В среднем по группе						21,9

Наибольшее количество пораженных фитофторой семян было зафиксировано в гибридных комбинациях, где оба сорта были восприимчивы к фитофторозу. В среднем здесь около половины исследуемых семян оказались сильно восприимчивы к фитофторозу. А максимальное поражение семян было отмечено в комбинациях, представленных сортом Жуковский ранний, таких как Аусония × Жуковский ранний – 62,6%, Жуковский ранний × Arnika – 62,8% и Жуковский ранний × Адретта –

**Оценка гибридных комбинаций, имеющих в своем происхождении
среднеустойчивые и неустойчивые к фитофторозу сорта**

№ п/п	Гибридные комбинации	Тип скрещивания	Высажено в поле сеянцев, шт.	Частота отбора, %	Доля образцов с устойчивостью к фитофторозу 1–3 балла, %
Среднеустойчивый × неустойчивый					
1	733-65 × Нида	С × Н	50	56,0	16,0
2	Аусония × Жуковский ранний	С × Н	219	14,6	62,6
3	Волжанин × Жуковский ранний	С × Н	30	56,7	20,0
4	Ягодка × Импала	С × Н	70	50,0	25,7
5	807-8 × Конкорд	С × Н	16	75,0	25,0
В среднем по группе					29,9
Неустойчивый × среднеустойчивый					
1	Адретта × Аусония	Н × С	189	17,5	51,8
2	Белая ночь × 1198-2	Н × С	18	33,3	33,3
3	Жуковский ранний × 276-662	Н × С	280	35,7	42,2
4	Жуковский ранний × Arnika	Н × С	70	0,0	62,8
5	Жуковский ранний × Аусония	Н × С	85	52,9	36,5
В среднем по группе					45,3
Неустойчивый × неустойчивый					
1	Жуковский ранний × Адретта	Н × Н	133	21,1	63,9
2	Нида × Жуковский ранний	Н × Н	42	40,5	38,1
3	Шурминский-2 × Жуковский ранний	Н × Н	250	24,8	40,8
В среднем по группе					47,6

63,9% сильно пораженных растений. Здесь отмечалось сильное поражение растений не только по ботве, но и по клубням (см. табл. 3).

Анализ гибридных комбинаций, чье потомство дошло до исследования в конкурсном испытании, говорит о том, что наибольший выход фитофтороустойчивых образцов могут обеспечить гибридные комбинации, представленные преимущественно среднеспелыми и среднепоздними фитофтороустойчивыми сортами. Прежде всего это комбинации с сортом Зарево, взятым в качестве материнской формы. Существенное снижение доли фитофтороустойчивых образцов в комбинациях с сортом Зарево происходит лишь в том случае, если в качестве опылителя взяты сильно восприимчивые к фитофторозу сорта. Например, исследование гибридов в комбинации Зарево × Конкорд закончились на этапе клонов 2-го года.

Недостатком комбинаций, представленных сортом Зарево, является большое количество позднеспелых форм и низкая в связи с этим частота отбора (см. табл. 1). Лучшие образцы способны сформировать массу клубней немногим более 700 г/куст.

В конкурсном испытании было изучено всего четыре гибрида, представленных сортом Зарево. Это гибриды комбинаций Зарево × 733-65 – два гибрида и по одному гибриду в комбинациях Зарево × Выток и Зарево × Кардинал (табл. 4).

Несмотря на это выделенные здесь гибриды могут иметь ценность как основа для создания сорта, отличающегося значительной устойчивостью к основным фитопатогенам, распространенным в данном регионе, обладающего высокими вкусовыми качествами, хорошей лежкостью при хранении, способного сформировать достаточно высокий урожай в годы эпифитотий фитофтороза.

Высокой частотой отбора фитофтороустойчивых форм характеризуются комбинации с раннеспелым сортом Удача. Сорт обладает высокой, до 7 баллов, устойчивостью к фитофторозу по ботве и клубням. И хотя комбинация сорта Удача с ранними и среднеранними, восприимчивыми к фитофторозу сортами приводит

Таблица 4

**Характеристика перспективных гибридных комбинаций
с высоким выходом фитофтороустойчивых форм**

Гибридная комбинация	Причины отбраковки, % от количества отбракованных образцов в питомнике сеянцев			Пределы урожайности, г/куст	Изучено в конкурсном испытании, шт.
	Фитофтороз	Позднее- спелость	Негативные признаки		
81.14/61 × Аусония	24,0	52,0	24,0	300–840	2
Адретта × Аусония	62,8	5,7	31,5	250–960	1
Барака × Аусония	17,3	30,8	51,9	580–1260	5
Гранола × Пикассо	33,3	52,8	13,9	282–882	1
Дар × 1198-2	40,0	48,0	12,0	680–1500	9
Зарево × 733-65	9,2	75,8	15,0	523–782	2
Зарево × Выток	21,7	43,3	35,0	609–748	1
Зарево × Кардинал	22,5	52,5	25,0	288–718	1
Лина × Аусония	58,0	10,5	31,5	208–260	1
Мавка × Arnika	12,8	57,4	29,8	399–920	2
Накра × Рая	25,9	40,7	33,4	273–845	3
Свитанок киевский × Saturna	26,8	56,1	17,1	290–538	1
Свитанок киевский × Романо	12,7	76,4	10,9	225–317	1
Симбирянин × 128-б	62,1	15,5	22,4	349–540	1
Ласунок × Симбирянин	23,6	55,5	20,9	225–807	1
Удача × Амадеус	18,4	40,5	41,1	520–750	2
Удача × Аусония	12,2	30,9	56,9	260–1330	10
Удача × Гранола	23,7	49,4	26,9	600–1350	1
Удача × Пост-86	25,6	39,5	34,9	350–1000	3

к существенному снижению доли высокоустойчивых образцов, именно здесь изучено в конкурсном испытании наибольшее количество гибридов (см. табл. 4).

Гибриды, представленные сортом Удача, выделяются высокой продуктивностью, отдельные образцы имели массу клубней с одного растения превышающую 1000 г, именно такие гибриды были изучены в конкурсном испытании. А наибольшее количество перспективных гибридов было выделено в популяции Удача × Аусония. В конкурсном испытании здесь изучено 10 гибридов, у большинства из которых масса клубней одного растения достигала 1330 г (см. табл. 4).

В конкурсном испытании было изучено пять гибридных комбинаций с сортом Аусония, всего 19 гибридов. Во всех гибридных комбинациях сорт Аусония представлен в виде отцовской формы. Это такие комбинации, как 81.14/61 × Аусония, Адретта × Аусония, Барака × Аусония, Лина × Аусония и Удача × Аусония. В случаях же, когда сорт Аусония был взят качестве материнской формы (Аусония × Жуковский ранний, Аусония × Верба), не было выделено ни одного высокоустойчивого образца. Все исследования в данных комбинациях заканчивались на предварительном испытании. Основная причина отбраковки – сильная восприимчивость к фитофторозу.

Потомство гибридных комбинаций с ранним сортом Аусония, хотя и характеризуется высокой восприимчивостью к фитофторозу, но существует вероятность, что отдельные гибриды смогут сформировать высокий урожай в ранние сроки, в связи с чем возможно получить высокий товарный урожай до массового развития фитофтороза.

Из общего количества фитофтороустойчивых, высокоурожайных, образцов, дошедших до сортового испытания, большинство выделено в комбинациях Барака × Аусония, Удача × Аусония, Дар × 1198-2. Лучшие гибриды данных комбинаций характеризуются высокой устойчивостью к фитофторозу. Продуктивность одного растения здесь превышает 1000 г с куста.

Самыми неудачными для ведения селекционных исследований на устойчивость к фитофторозу в условиях Севера Дальнего Востока оказались гибридные комбинации, имеющие в своем происхождении сорта Адора, Волжанин, Жуковский ранний, Черниговский, Лира, Лина. К таким гибридным комбинациям относятся: Адора × Жуковский ранний, Аусония × Жуковский ранний, Жуковский ранний × 276-662, Жуковский ранний × Arnika, Жуковский ранний × Черниговский, 733-65 × Черниговский, Волжанин × Черниговский, Волжанин × Fiana, Волжанин × Лыковский, Тимо × Аусония, Лина × Аусония, Лира × Аусония, Симбирянин × 1286, Адора × Розана, Фонтане × Кондор, Лазурит × Кондор. Исследования по гибридам большинства представленных выше комбинаций закончились на ранних этапах исследований. Для гибридов, имеющих в своем происхождении сорт Жуковский ранний, характерна не только сильная восприимчивость к фитофторозу, но и низкая лежкость, связанная с загниванием клубней в период хранения.

Выводы

При селекции картофеля на фитофтороустойчивость в условиях Севера Дальнего Востока наиболее перспективными являются гибридные комбинации, представленные среднеспелыми и ранними сортами с высокой полевой устойчивостью к фитофторозу, такие как Барака × Аусония, Удача × Аусония, Дар × 1198-2.

Гибридные комбинации, представленные высокоустойчивыми к фитофторозу среднепоздними или позднеспелыми сортами, такими как Зарево, Кардинал, Гранола, Пикассо, могут стать основой для нового сорта, способного сформировать достаточно высокий урожай в годы эпифитотий.

Гибридные комбинации, представленные ранними устойчивыми, среднеустойчивыми и слабоустойчивыми сортами Удача, Адретта, Аусония, Мавка перспективны для получения раннеспелых сортов картофеля, способных сформировать достаточно высокий урожай клубней до массового развития фитофтороза.

Создание фитофтороустойчивых сортов картофеля позволит существенно снизить негативное влияние фунгицидов на природную среду, повысить лежкость клубней в период длительного хранения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лихненко С.В., Гагиев Б.В. Поиск доноров устойчивости к патогенам и вредителям картофеля // Вестник Владикавказского научного центра. 2020. Т. 20. № 1. С. 76–79.
2. Хавкин Э.Е., Rogozina E.B., Кузнецова М.А. Создание уникальных селекционных доноров на основе межвидовых гибридов картофеля путем пирамидирования генов устойчивости к фитофторозу под контролем ДНК маркеров // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 7. С. 21–25.
3. Мацишина Н.В., Дидора А.С., Собко О.А., Ким И.В., Волков Д.И. Оценка устойчивости сортов и гибридов картофеля к *Phytophthora infestans* Mont. de Bary в Приморском крае // Овощи России. 2020. № 3. С. 77–80.
4. Зотеева Н.М. Устойчивость диких видов картофеля к фитофторозу в полевых условиях Северо-Запада РФ // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2019. Т. 180. № 4. С. 159–169.
5. Костина Л.И., Косарева О.С. Целевая субколлекция селекционных сортов картофеля по устойчивости к фитофторозу // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2019. Т. 180. № 3. С. 36–40.
6. Болезни, вредители, сорняки картофеля и мероприятия по борьбе с ними / В.Н. Зейрук, С.В. Жевора, С.В. Васильева, Г.А. Белов, В.И. Долженко, М.А. Кузнецова, Б.В. Анисимов, С.Н. Еланский. М.: Наука, 2020. 332 с.
7. Защита картофеля от болезней, вредителей и сорняков / Б.В. Анисимов, Г.В. Белов, Ю.А. Варец и др. М.: Картофелевод, 2009. 272 с.
8. Гаджиев Н.М., Лебедева В.А., Иванов А.В., Соколов И.А., Комаров А.А. Создание сортов картофеля, устойчивых к вредителям, патогенам и неблагоприятным условиям среды // Научные труды по агрономии. 2019. № 1 (1). С. 5–8.
9. Зотеева Н.М., Косарева О.С., Евдокимова З.З. Поиск устойчивого к фитофторозу исходного материала для селекции среди сортов и клонов картофеля // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2017. Т. 178. № 4. С. 119–126.
10. Татарченков М.И. Картофель на Колыме. Магадан, 1964. 64 с.
11. Система земледелия Магаданской области / А.С. Акишин, И.К. Антипов, Б.В. Гарбарец и др. Магадан: Кн. изд-во, 1983. 174 с.
12. Выращивание картофеля в хозяйствах Магаданской области: метод. рекомендации. Новосибирск, 1992. 52 с.
13. Возделывание картофеля в условиях Магаданской области: метод. рекомендации. Новосибирск, 1982. 50 с.
14. Методические указания по технологии селекционного процесса картофеля / Российская академия сельскохозяйственных наук, ВНИИКС им А.Г. Лорха. М., 2006. 70 с.
15. Методика проведения полевых обследований и послуборочного контроля качества семенного картофеля. М.: ИКАР, 2005. 112 с.

REFERENCES

1. Lihnenko S.V., Gagiev B.V. Poisk donorov ustojchivosti k patogenam i vreditelyam kartofel-ya = [Search for donors of resistance to potato pathogens and pests]. *Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Centra*. 2020;20(1):76–79. (In Russ.).

2. Havkin E.E., Rogozina E.V., Kuznecova M.A. Sozdanie unikal'nyh selekcionnyh donorov na osnove mezhvidovyh gibridov kartofelya putem piramidirovaniya genov ustojchivosti k fitoftorozu pod kontrolom DNK markerov = [Creation of unique breeding donors based on interspecific potato hybrids by pyramiding late blight resistance genes under the control of DNA markers]. *Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK*. 2018;32(7):21–25. (In Russ.).
3. Macishina N.V., Didora A.S., Sobko O.A., Kim I.V., Volkov D.I. Ocenka ustojchivosti sortov i gibridov kartofelya k *Phytophthora infestans* Mont. de Bary v Primorskom krae = [Assessment of resistance of potato varieties and hybrids to *Phytophthora infestans* Mont. de Bary in Primorsky Krai]. *Ovoshchi Rossii*. 2020;(3):77–80. (In Russ.).
4. Zoteeva N.M. Ustojchivost' dikih vidov kartofelya k fitoftorozu v polevyh usloviyah Severo-Zapada RF = [Resistance of wild potato species to late blight under field conditions in the North-West of the Russian Federation]. *Trudy po Prikladnoj Botanike, Genetike i Selekcii*. 2019;180(4):159–169. (In Russ.).
5. Kostina L.I., Kosareva O.S. Celevaya subkollekcija selekcionnyh sortov kartofelya po ustojchivosti k fitoftorozu = [Target subcollection of breeding potato varieties for resistance to late blight]. *Trudy po Prikladnoj Botanike, Genetike i Selekcii*. 2019;180(3):36–40. (In Russ.).
6. Zejruk V.N., Zhevora S.V., Vasil'eva S.V. et al. Bolezni, vrediteli, sornyaki kartofelya i meropriyatiya po bor'be s nimi. Moscow: Nauka; 2020. 332 s. (In Russ.).
7. Anisimov B.V., Belov G.V., Varicev Yu.A. et al. Zashchita kartofelya ot boleznej, vreditelej i sornyakov. Moscow: Kartofelevod; 2009. 272 s. (In Russ.).
8. Gadzhiev N.M., Lebedeva V.A., Ivanov A.V., Sokolov I.A., Komarov A.A. Sozdanie sortov kartofelya, ustojchivyh k vredityam, patogenam i neblagopriyatnym usloviyam sredy = [Creation of potato varieties resistant to pests, pathogens and adverse environmental conditions]. *Nauchnye Trudy po Agronomii*. 2019;1(1):5–8. (In Russ.).
9. Zoteeva N.M., Kosareva O.S., Evdokimova Z.Z. Poisku stojchivogo k fitoftorozu iskhodnogo materiala dlya selekcii sredi sortov i klonov kartofelya = [Search for late blight-resistant source material for selection among potato varieties and clones]. *Trudy po Prikladnoj Botanike, Genetike i Selekcii*. 2017;178(4):119–126. (In Russ.).
10. Tatarchenkov M.I. Kartofel' na Kolyme. Magadan; 1964. 64 s. (In Russ.).
11. Akishin A.S., Antipov I.K., Garbarec B.V. et al. Sistema zemledeliya Magadanskoj oblasti. Magadan: Kn. izd-vo; 1983. 174 s. (In Russ.).
12. Vyrashchivanie kartofelya v hozyajstvakh Magadanskoj oblasti: Metod. rekomendacii. Novosibirsk; 1992. 52 s. (In Russ.).
13. Vozdelyvanie kartofelya v usloviyah Magadanskoj oblasti: Metodicheskie rekomendacii. Novosibirsk; 1982. 50 s. (In Russ.).
14. Metodicheskie ukazaniya po tekhnologii i selekcionnogo processa kartofelya. Moscow; 2006. 70 s. (In Russ.).
15. Metodika provedeniya polevyh obsledovanij i posleuborochnogo kontrolya kachestva semennogo kartofelya. Moscow: IKAR; 2005. 112 s. (In Russ.).

Обзорная статья

УДК 544.351.3

DOI: 10.31857/S0869769825030146

EDN: POCZYA

Прогнозирование солеотложения в нефтяном промысле. Современное состояние, проблемы, задачи

И.С. Трухин[✉], Н.В. Полякова, П.А. Задорожный, С.В. Суховерхов

Иван Сергеевич Трухин

кандидат химических наук, научный сотрудник
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия
trukhin@ich.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2747-3265>

Наталья Владимировна Полякова

кандидат химических наук, старший научный сотрудник
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия
polyakova@ich.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6596-9205>

Павел Анатольевич Задорожный

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия
zadorozhny@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1073-4548>

Святослав Валерьевич Суховерхов

кандидат химических наук, заведующий лабораторией
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия
svs28@ich.dvo.ru
<https://orcid.org/0009-0003-1485-1682>

Аннотация. В статье обобщены текущие представления о проблеме солеотложения в нефтепромысловом оборудовании и методических подходах к ее предупреждению. На основе многолетних исследований проблемы солеотложения на различных месторождениях систематизирована информация о составе попутно добываемой и закачиваемой воды и ее роли в процессе солеобразования, а также информация о составе неорганических отложений и механизме их образования. Рассмотрены существующие методы математического моделирования процессов солеотложения в нефтепромысловых системах, оценена их эффективность. Показано, что качественный химический состав как водных растворов, так и отложений из технологических узлов нефтедобывающих предприятий схож вне зависимости от месторождения, тем не менее количественно соотношение компонентов способно отличаться на порядки, причем даже в условиях одного месторождения. Хотя проблема солеотложения к настоящему моменту хорошо изучена, по-прежнему не существует единого универсального методического подхода к предупреждению отложений солей на нефтяном промысле,

который эффективно показывал бы себя в различных условиях. Несмотря на многообразие и широкие возможности современных программных комплексов, результаты математического моделирования не всегда хорошо коррелируют с составом реальных отложений из нефтепромысловых систем. Таким образом, решение проблемы прогнозирования нефтепромысловых солеотложений требует комплексного подхода, включающего экспериментальное моделирование и корректировку используемого метода расчета на основе опыта добычи. Такую задачу способны решить методы искусственного интеллекта, следовательно, развитие методологии прогнозирования солеотложений в нефтепромысловых системах в ближайшем будущем будет развиваться именно в этом направлении.

Ключевые слова: воды нефтяных месторождений, солеотложение, нефтепромысловое оборудование, математическое моделирование химических равновесий, применение искусственного интеллекта в нефтяной промышленности

Для цитирования: Трухин И.С., Полякова Н.В., Задорожный П.А., Суховерхов С.В. Прогнозирование солеотложения в нефтяном промысле. Современное состояние, проблемы, задачи // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 3. С. 146–169. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030146>

Благодарности. Авторы благодарят доцента филиала Тюменского индустриального университета в г. Нижневартовске, к.т.н. Андрея Николаевича Маркина за помощь в сборе данных и анализе результатов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии ДВО РАН, тема № FWFN-2025-0002. В работе использовали оборудование ЦКП «Дальневосточный центр структурных исследований» ИХ ДВО РАН.

Review article

Prediction of scale deposits in the oilfield. Current status, problems, challenges

I.S. Trukhin, N.V. Polyakova, P.A. Zadorozhny, S.V. Sukhoverkhov

Ivan S. Trukhin

Candidate of Science in Chemistry, Researcher
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
trukhin@ich.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2747-3265>

Natalia V. Polyakova

Candidate of Science in Chemistry, Senior Researcher
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
polyakova@ich.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6596-9205>

Pavel A. Zadorozhny

Candidate of Science in Biology, Senior Researcher
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
zadorozhny@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1073-4548>

Svyatoslav V. Sukhoverkhov

Candidate of Science in Chemistry, Head of Laboratory
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
svs28@ich.dvo.ru
<https://orcid.org/0009-0003-1485-1682>

Abstract. The article summarizes current understanding of the problem of scaling in oilfield equipment and methodological approaches to its prevention. Based on years of research into scaling issues across various oilfields, we systematize information regarding the composition of produced and injected water and its role in the scaling process, as well as details about the composition of inorganic deposits and the mechanisms of their formation. We examine existing methods of mathematical modeling for scaling processes in oilfield systems and assess their effectiveness. It is demonstrated that the qualitative chemical composition of both aqueous solutions and deposits from production units in oil enterprises is similar, regardless of the field; however, the quantitative ratios of components can differ by orders of magnitude, even within a single field. Although the problem of scaling has been extensively studied, there is still no universal methodological approach to effectively prevent salt deposits in oilfields under varying conditions. Despite the diversity and capabilities of modern software packages, the results of mathematical modeling do not always correlate well with the actual composition of deposits in oilfield systems. Therefore, addressing the issue of forecasting salt deposits in oilfields requires a comprehensive approach, including experimental modeling and adjustments to the calculation methods based on production experience. Such a problem can be solved by artificial intelligence methods, therefore, the development of the methodology for forecasting salt deposits in oilfield systems in the near future will develop in this direction.

Keywords: oilfield waters, salt deposition, oilfield equipment, mathematical modeling of chemical equilibria, application of artificial intelligence in the oil industry

For citation: Trukhin I.S., Polyakova N.V., Zadorozhny P.A., Sukhoverkhov S.V. Prediction of scale deposits in the oilfield. Current status, problems, challenges. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(3):146–169. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030146>

Acknowledgments. The authors express our gratitude to associate professor of the Tyumen Industrial University branch in Nizhnevartovsk, Candidate of Science in Technique A.N. Markin for assistance in collecting data and analyzing the results.

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignments of the Institute of Chemistry, FEB RAS, topic No. FWFN-2025-0002. The work used the equipment of the Far Eastern Center for Structural Research of the Institute of Chemistry, FEB RAS.

Введение

Отложение солей в нефтепромысловом оборудовании является одной из наиболее распространенных и существенных проблем при эксплуатации нефтяных месторождений. Образование минеральных отложений в процессе добычи нефти способно приводить к падению дебита добычи в результате снижения проницаемости призабойной зоны пласта и уменьшения внутреннего диаметра трубопроводов; возникновению точек коррозии в местах отложения солей, приводящих к разрушению металлических деталей оборудования; нарушению корректной работы контрольно-измерительного оборудования, затрудняя принятие корректных управленческих решений [1].

Проблема солеотложения в нефтепромысловом оборудовании является одной из самых финансово затратных в процессе эксплуатации месторождения. Ежегодно нефтедобывающие компании несут огромные убытки в виде потерянной продукции в результате процессов солеотложения и закупоривания технологических узлов оборудования. Известен случай, когда дебит добычи одной из скважин месторождения Миллера упал с 30 тыс. баррелей в день до нуля за сутки [2]! Кроме того, существенных затрат требует регулярное предупреждение образования солей, а также борьба с последствиями солеотложений, среди которых: затраты на производство и покупку ингибиторов, предотвращающих выпадение солей; техническое обслуживание и очистка оборудования, в том числе периодическая замена узлов, необратимо пострадавших от солеотложения; покупка и установка оборудования для контроля и мониторинга уровня отложений и состояния оборудования, а также

эксплуатационные расходы, включающие дополнительные энергозатраты и затраты на обучение и работу персонала.

Источником компонентов неорганической части нефтепромысловых отложений являются попутно добываемые и закачиваемые воды, которые циркулируют в оборудовании данного месторождения. Пластовые воды каждого месторождения имеют уникальный химический состав, который, кроме того, способен изменяться в ходе разработки месторождения [3]. Существуют два ключевых фактора, способствующих процессу отложения солей в нефтепромысловых системах – изменение физико-химических параметров системы и смешивание вод [4–6]. Изменение физико-химических параметров системы происходит на всех этапах добычи, подготовки и транспортировки нефти. Продукция нефтяных скважин проходит многоступенчатый процесс извлечения и очистки, в ходе которого происходит выделение газов, испарение и конденсация воды, изменение термобарических условий, что способствует образованию малорастворимых неорганических солей в трубопроводах и другом нефтепромысловом оборудовании [5]. В настоящее время многие нефтяные месторождения переходят на поздние стадии добычи, и для извлечения нефти, как правило, применяется метод заводнения пласта. Сущность метода заключается в поддержании пластового давления (ППД) путем закачивания в пласт воды. Закачиваемая вода представляет собой смесь отделенной от нефти попутно добываемой воды и воды, находящейся в ближайшей доступности от месторождения. На морских нефтедобывающих платформах наиболее целесообразным является использование морской воды. Смешиваемые воды могут быть химически несовместимы из-за содержащихся в их составе солеобразующих ионов, таких как Ca^{2+} , Ba^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- [6]. Стоит отметить, что с каждым годом проблема солеотложения в нефтепромысловом оборудовании становится все более острой, так как обводненность скважинной продукции на разрабатываемых месторождениях постоянно возрастает. С 1990 по 2015 г. мировой объем добычи попутно добываемой воды увеличился с 30 млн до почти 100 млн баррелей в день [7].

В настоящее время на нефтедобывающих предприятиях для прогноза осадкообразования используют программные комплексы. Однако несмотря на их широкие возможности, не всегда удается получить хорошую сходимость расчетных и экспериментальных данных, так как пластовые и закачиваемые воды участвуют в сложных и слабо прогнозируемых гидрохимических процессах [8]. Для получения полноценной информации о текущем состоянии оборудования и оценки эффективности прогнозирования становится необходимым исследование состава осадков из ключевых узлов нефтепромысловых систем.

Целью данной работы является обобщение и систематизация существующих представлений о проблеме солеотложения в нефтепромысловом оборудовании; оценка эффективности существующих подходов к прогнозированию солеотложения, а также определение вероятного направления развития методов прогнозирования, в том числе на основе методов искусственного интеллекта.

1. Воды нефтяных месторождений

В настоящее время процесс добычи нефти сопряжен с постоянной циркуляцией больших объемов водных растворов в нефтепромысловом оборудовании, которые в основном представлены попутно добываемой и закачиваемой водой. Нефть может залегать с водой в одном пласте, а иногда вода составляет и самостоятельные пропластки или даже отдельные пласты [9]. Объем добычи вод на различных месторождениях может варьироваться в широких пределах, но в среднем составляет около 3–5 м³ на 1 т добытой нефти [2]. Компоненты, входящие в состав вод, создают крайне

агрессивную среду для нефтепромыслового оборудования и наряду с растворенными газами – кислородом, сероводородом и углекислым газом являются основной причиной солеотложения и коррозии [1]. Химический состав попутно добываемых вод служит важным индикатором физико-химических процессов, происходящих в пласте и нефтепромысловом оборудовании, особенно тех, которые недоступны для прямого измерения. При прохождении через нефтедобывающую систему пластовая вода участвует в процессах сорбции/десорбции, диффузии, ионного обмена, растворения, выщелачивания и др., что в последующем определяет ее состав. В первую очередь состав зависит от пород, в которых находится вода. Так, вода, находящаяся в породах из известковистого песчаника или карбоната, обычно содержит избыток Ca^{2+} и Mg^{2+} . Воды, находящиеся в песчанике, обычно содержат Ba^{2+} и Sr^{2+} . Данные о химическом составе подземных вод нефтяных и газовых месторождений необходимы при разработке месторождений не только для прогнозирования процессов отложения солей, но также для получения информации о нефтегазоносности недр, определения режимов разработки залежей, оценки скорости продвижения водонефтяного и водогазового контактов, определения оптимальных темпов отбора нефти и газа и являются одним из необходимых параметров, несущих информацию о рентабельности месторождения. Кроме того, информация о составе попутно добываемой воды является первым шагом к коррозионному мониторингу.

Качественный макрокомпонентный состав попутно добываемых вод нефтегазовых месторождений, как правило, схож и представлен хлоридами, сульфатами

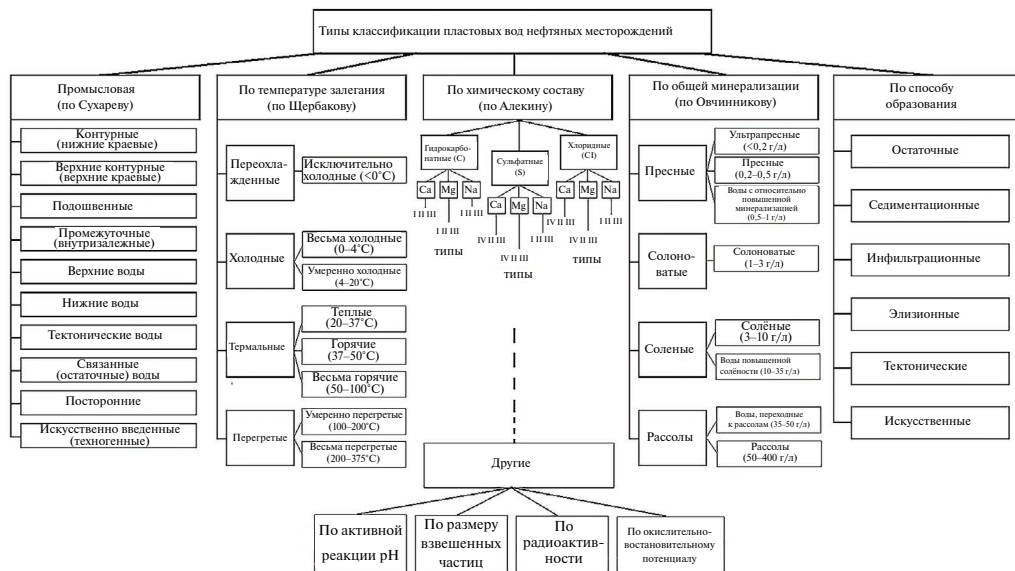


Рис. 1. Типы классификации пластовых вод нефтяных месторождений [10]

и карбонатами щелочных и щелочноземельных металлов. Тем не менее, диапазоны концентраций могут отличаться на порядки [12]. В табл. 1 представлен химический состав попутно добываемых вод нескольких крупных месторождений. Видно, что общая минерализация пластовых вод может отличаться на порядки – от 16 г/дм³ на Кальчинском месторождении [13] до сотен граммов на литр (427 г/дм³) на Верхне-чонском месторождении [14]. Образование растворов с такими высокими значениями

Таблица 1

Физико-химические параметры попутно добываемых
и закачиваемых вод нефтяных месторождений

Месторождение	Тип воды	TDS, г/дм ³	Содержание компонентов, мг/дм ³					
			Na ⁺ + K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Месторождения на территории России								
Кальчинское (Тюменская обл.) [13]	Пласт.	16	5382	40	49	5680	–	4880
	Закач.	1	142,6	18	17	36	–	458
Верхнечонское (Иркутская обл.) [14]	Пласт.	427	40 530	98 193	12 000	273 001	0	598
	Закач.	33	7772	3247	960	20 099	433	293
Иреляхское (Республика Саха) [18]	Пласт.	395	24 820	100 160	22 660	244 910	1560	450
	Закач.	285	114 300	2000	120	164 540	3870	83
Ярино-Каменноложское (Пермский край) [17]	Пласт.	196	56 660	13 250	3250	12 060	1130	180
	Закач.	2	20	516	33	23	1184	247
Пильтун-Астохское (Сахалинская обл.) [11]	Пласт.	19–36	6480– 11 050	110– 570	60– 420	9500– 21 200	4–1910	410– 1100
	Закач.	33–35	10 080– 10 900	360– 430	1220– 1310	18 000– 18 900	2350– 2720	136– 186
Месторождения за пределами России								
Жетыбай (Казахстан) [21]	Пласт.	184	53 000	11 500	4500	115 400	5	20
	Закач.	14	3600	350	750	6000	3100	220
Гюнешли (Азербайджан) [22]	Пласт.	36	12 229	48	101	13 913	494	5258
	Закач.	13	3288	364	658	5169	3045	210
Месторождение Северного моря [19]	Пласт.	72	26 998	307	82	41 767	4	2050
	Закач.	36	11 350	428	1368	19 800	2960	124
Сири (Персидский залив) [23]	Пласт.	129– 141	35 391– 44 201	3032– 7920	552– 2010	70 740– 86 900	142– 635	244– 579
	Закач.	40	11 750	267	2996	23 000	3350	166
Нафт-Шахр (Иран) [24]	Пласт.	56	35 674	1505	1216	52 112	8492	1267
	Закач.	31	15 372	372	–	22 167	5450	67
Месторождение Западной Сибири [25]	Пласт.	49	16 311	2128	327	27 277	0	3802
	Закач.	0,1– 16	22–5780	8–360	5–73	6–9571	0–29	73– 1964

общей минерализации связывают с явлением «подземного испарения», предложенным М.Е. Альтовским [15]. Содержание различных компонентов также варьирует в широком диапазоне.

Не менее важной задачей при разработке месторождения является исследование состава закачиваемых вод [16]. На нефтегазовых месторождениях для заводнения пласта используются воды с различным составом (см. табл. 1). В соответствии с классификацией вод по уровню общей минерализации, предложенной Овчинниковым [11], видно, что в мировой нефтедобывающей практике в пласты закачиваются воды начиная от солоноватых растворов (2 г/дм^3 , Ярино-Каменноложское месторождение [17]) до рассолов (285 г/дм^3 , Иреляхское месторождение [18]). При этом важно то, что на континентальных месторождениях за счет растворения подземных пород для заводнения иногда используется вода с минерализацией много большей, чем у морской воды. В таких случаях возникает проблема кристаллизации хлорида натрия (галитизация промыслового коллектора) [18]. В настоящее время наблюдается тенденция перемещения нефте- и газодобычи с континента на шельф, следовательно, для заводнения все чаще используется морская вода. На примере месторождений Верхнечонского [14], Пильгун-Астохского [11] и Северного моря [19] видно, что даже в случае использования морской воды для заводнения ее компонентный состав способен значительно отличаться. Связано это, вероятно, как с отличиями в составе морской воды, так и с процессами водоподготовки.

Важно то, что заводнение и вытеснение нефти закачиваемой водой является не механическим, а сложным физико-химическим процессом, при котором решающую роль играют явления ионообмена между пластовыми и закачиваемыми флюидами с породой. Ионный состав закачиваемых вод не только влияет на процессы солеотложения и коррозии нефтепромыслового оборудования, но также оказывает ключевое воздействие на процесс извлечения нефти. Регулирование минерализации закачиваемой воды может служить инструментом повышения эффективности промысла [20]. Не менее важным является то, что помимо ионного состава пластовые воды всегда загрязнены взвешенными частицами, способными царапать стенки оборудования и создавать центры кристаллизации для отложения солей.

Таким образом, состав пластовой воды несет в себе целый комплекс различной информации, на основе которой становится возможным получить представление о строении литосферных пластов и стадии разработки месторождения, процессов, протекающих во время добычи. Моделирование солеотложения в участках нефтепромысловой системы осуществляется в первую очередь на основе химического состава вод, циркулирующих в системах, и трудности прогнозирования отчасти обусловлены неоднородностью их состава. Кроме того, при моделировании необходимо учитывать смешивание вод между собой.

2. Химический состав неорганической части нефтепромысловых отложений

Наиболее часто в составе неорганической части нефтепромысловых отложений встречаются карбонаты кальция и железа, сульфаты кальция, бария и стронция, а также песок и глина, выносимые из породы, и соединения железа и других металлов, являющихся продуктами механического истирания и коррозии оборудования [1, 2]. Такие микрочастицы являются центрами кристаллизации, при отсутствии которых даже в пересыщенных растворах при изменении различных физико-химических параметров осадок может не выпасть. Образование кристаллов также возможно на границе раздела твердой и жидкой фаз. Оптимальными местами гетерогенной

нуклеации являются дефекты поверхностей оборудования, неровности, сварочные швы и т.д., причем ускорить процесс может высокая турбулентность потока. В условиях значительного уровня минерализации попутно добываемых вод возможны отложения хлоридов [2].

Все отложения в нефтепромысловой инженерии принято разделять на кислоторастворимые (CaCO_3 , FeCO_3 , FeS , ZnS , PbS) и кислотонерастворимые (BaSO_4 , SrSO_4 , CaSO_4) [26]. Растворимость в кислоте является ключевым свойством отложений при выборе метода их удаления. При этом компоненты органической части отложений (АСПО – смесь конденсированных парафино-нафтяных углеводородов, смолисто-асфальтеновых веществ и связанной нефти) естественным образом защищают неорганические соли от кислотного воздействия очищающих реагентов нефтепромысловой химии [2]. Наибольшую проблему для нефтепромысла представляют АСПО, сульфатные и карбонатные отложения [1, 2].

Из сульфатов в солевых отложениях на нефтепромыслах чаще всего образуются сульфаты бария и стронция. Сульфат кальция может существовать в шести модификациях (три ангидрита и три структуры, включающие воду), из них, как правило, в составе отложений преобладает гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), который при высоких температурах переходит в бассанит ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) и ангидрит (CaSO_4). Установлено, что до 80°C преимущественно выпадает гипс, а выше 120°C сульфатно-кальциевый осадок практически полностью состоит из ангидрита. Диапазон температур от 80 до 120°C является переходным, где наряду с гипсом и ангидритом формируется бассанит, особенно в нетурбулентных системах [27]. Образование сульфата кальция сильно зависит от концентрации магния, связано это с образованием MgSO_4 . Содержание барита (BaSO_4) и целестита (SrSO_4) в осадках ниже по сравнению с другими компонентами, однако они вызывают наибольшие трудности при очистке оборудования [2]. Основной причиной отложения сульфата бария на нефтяном промысле является смешивание вод. Наиболее эффективно он способен образовываться при низкой скорости потока в широких частях трубопроводов, так как диффузия частиц там происходит свободнее. Однако в процессе образования осадка и закупоривания трубопровода диаметр потока жидкости уменьшается, а его скорость увеличивается, что уменьшает область диффузии, и осаждение перемещается к концу потока, где скорость все еще ниже [28]. Сульфатные осадки отличаются высокой устойчивостью как к химическому, так и механическому воздействию, кроме того, обладают низкой пористостью, что осложняет возможность химической обработки.

Более половины мировой добычи нефти ведется из карбонатных коллекторов. Карбонаты являются самыми многочисленными осадками в нефтяном промысле [29]. Известно более 40 форм карбонатов, способных кристаллизоваться из водных растворов с участием газовой фазы. Наиболее распространенным компонентом нефтепромысловых осадков среди карбонатов является карбонат кальция, реже встречается карбонат магния, кроме того, возможно осаждение смешанных карбонатов кальция и магния. Могут осаждаться нескольких форм карбоната кальция, наиболее часто встречаются кальцит, арагонит и ватерит, которые различаются строением кристаллической решетки.

На образование определенной формы карбоната кальция влияют температура, давление, общая минерализация и pH раствора, содержание углекислого газа [30]. Осаждение в форме кальцита происходит при незначительном содержании CO_2 в растворе и нагревании до 100°C или в интервале температур $25\text{--}80^\circ\text{C}$ и $\text{pH} = 8\text{--}9$. Образование арагонита происходит при низких давлениях только при слабощелочном pH. Увеличение температуры от 40 до 90°C при сохранении прочих условий не приводит к изменению фазового состава карбоната кальция, но в целом снижает скорость образования осадка, предположительно, из-за снижения растворимости

CO₂ в растворе [31]. Увеличение доли арагонита в осадках наблюдается при добавлении в раствор сульфата и хлорида магния. Вероятно, для его кристаллизации в системе необходимо присутствие примесей со сходной ромбической сингонией в качестве затравок. В целом осаждение карбонатов усиливается с ростом температуры и снижением давления.

Особенностью осаждения карбонатов является повышенная чувствительность к изменению давления. Кроме того, осаждение карбонатов зависит от скорости и формы потока раствора. В гидродинамике принято выделять две формы потока жидкостей, которые определяются числом Рейнольдса (Re), – ламинарный и турбулентный. В ламинарном потоке (Re < 2000) слои жидкости движутся параллельно друг другу, и движения жидкости относительно друг друга минимальны, а перемещение вещества происходит в основном за счет диффузии. Турбулентный поток (Re > 4000) – это хаотичный и вихревой поток, где слои жидкости смешиваются и взаимодействуют друг с другом, следовательно, обмен веществом происходит в нем интенсивнее. В диапазоне значений Re от 2000 до 4000 наблюдаются как ламинарные, так и турбулентные характеристики, и поток может переходить из одного состояния в другое в зависимости от условий [32]. Согласно результатам исследования кинетики процесса образования отложений карбоната кальция, в нефтяном промысле [32] индукционный период карбоната кальция с увеличением турбулентности потока до значения числа Рейнольдса равного 6487 сокращается, однако дальнейшее увеличение числа Рейнольдса результатов не приносит.

Изменение скорости потока в состоянии оказывать различное влияние на процесс осаждения солей. Увеличение скорости потока способствует, с одной стороны, более равномерному распределению реагентов и уменьшению времени контакта между ними (что может привести к меньшему образованию кристаллов), но с другой – более эффективному перемешиванию, увеличению интенсивности взаимодействия и вероятности нуклеации частиц. Было установлено [30], что для карбоната кальция солеобразующим частицам проще сформировать осадок в условиях ламинарного потока с высокой скоростью. Таким образом, для карбоната кальция увеличение скорости потока сначала усиливает процесс образования отложений, но последующий рост скорости, приводящий поток в состояние турбулентного, влияния не оказывает.

Карбонатные осадки отличаются высокой пористостью, обеспечивающей высокую площадь реакционной поверхности при кислотной обработке. Они легко растворимы в соляной кислоте, тем не менее кислотная обработка карбонатных отложений имеет недостаток, заключающийся в том, что раствор кислоты после истощения способен вызвать повторное осаждение [1]. Кроме того, известны случаи, когда солянокислые обработки приводят к образованию так называемого шлама – продукта взаимодействия соляной кислоты и тяжелой нефти [33]. Интересной способностью обладают отложения карбоната железа, образующиеся на поверхности оборудования, так как они способны защищать металл от коррозии и воздействия сульфатредуцирующих бактерий [34].

Осаждение галита (NaCl) характерно для скважин, продукция которых практически не содержит воды. Чаще это высокодебитные скважины, оборудованные погружными центробежными насосами. Основной причиной отложения галита является минерализация пластовой воды более 300 г/дм³. Сильное влияние на отложение галита оказывают резкое снижение температуры и давления, а также дегазация воды, так как пузырьки газа способны забирать влагу из рассолов, увеличивая их концентрацию. Благоприятными местами для зарождения кристаллов галита являются границы раздела фаз (водонефтяные эмульсии), которые в свою очередь зависят от формы,

скорости потока и обводненности продукции. Формирование кристаллов галита усиливается при совместном движении воды с нефтью в ламинарном потоке без перемешивания и образования эмульсии [35]. Если в потоке образуется водонефтяная эмульсия, то возникновение кристаллов галита происходит в отдельных каплях воды, которые будут выносить галит из скважины, не давая ему сформироваться в крупные агрегаты [36]. Осаждение галита в нефтепромысловом оборудовании также может быть связано с введением метанола в пластовую воду [26]. Негативное действие галита заключается в активации процессов коррозии металла в подсолевом слое. Несмотря на высокую растворимость галита, известны случаи, когда он являлся основным компонентом отложений. Галит может удаляться простым промыванием пресной водой, однако на поверхности его кристаллов способен формироваться барит (BaSO_4), который затрудняет растворение.

Силикаты и алюмосиликаты – самый широко распространенный в природе класс минералов. Они составляют около 75% массы земной коры и треть всего количества известных минералов. В литературе содержится немного информации о присутствии алюмосиликатов в составе нефтепромысловых отложений. Вероятно, это связано с тем, что появление алюмосиликатов обусловлено прежде всего их вымыванием из пород коллектора, и принято считать, что они не высаждаются из раствора [1].

Растворимость каждой соли имеет индивидуальную зависимость от температуры, давления и других физико-химических параметров системы. Например, с увеличением температуры растворимость карбоната кальция уменьшается, но растворимость сульфата бария увеличивается. Таким образом, изменение условий добычи может приводить к уменьшению осаждения одних солей и в то же время к увеличению осаждения других, следовательно, к изменению соотношений компонентов осадка.

На рис. 2 представлены результаты определения химического состава неорганической части отложений из узлов оборудования для подготовки нефти морской нефтедобывающей платформы Пилтун-Астохского месторождения (о-в Сахалин) [5]. Основными компонентами отложений являются песок, глина, труднорастворимые сульфаты и карбонаты щелочноземельных металлов, продукты коррозии труб и оборудования (как соединения железа, так и обнаруживаемые в небольших

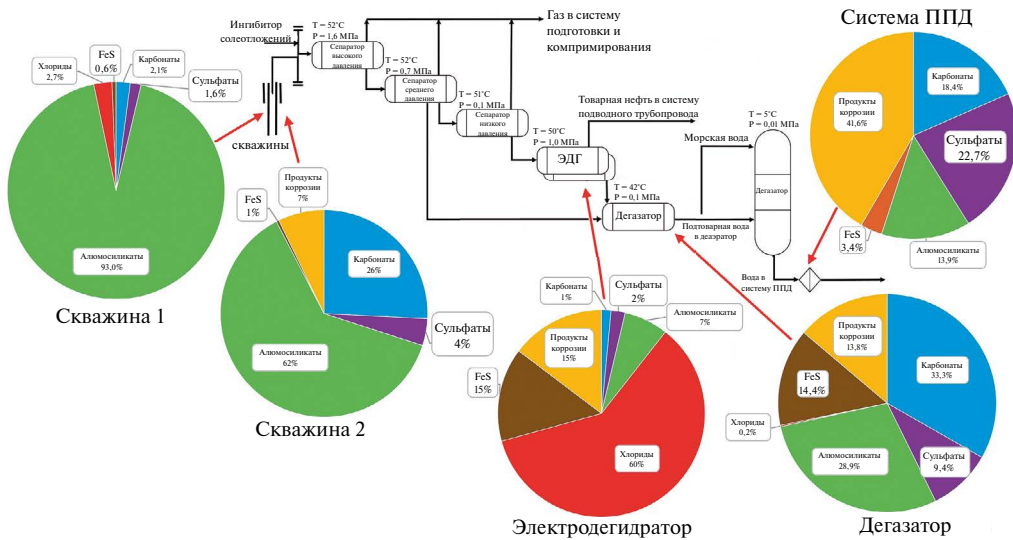


Рис. 2. Состав отложений из узлов подготовки нефти морской нефтедобывающей платформы о-ва Сахалин

количествах соли переходных металлов Cr, Mo, Zr и др.). Видно, что компонентный состав осадков в узлах оборудования схож, однако их соотношение варьирует в широких пределах, поскольку происходит изменение физико-химических параметров систем. В процессе подготовки нефть проходит несколько технологических стадий, в частности в электродегидраторе (ЭДГ) происходят значительные изменения физико-химических параметров за счет удаления основного количества воды, что приводит к общему понижению растворимости солей. В осадок могут перейти даже растворимые в обычных условиях соли, например, хлориды натрия и калия. В дегазаторе осаждается наибольшее количество карбонатов вследствие изменения парциального давления углекислого газа. Высокое содержание сульфатов, обнаруженное в системе ППД, обусловлено смешиванием в данном участке пластовой воды с морской. Наибольшее количество алюмосиликатов было обнаружено в устьях скважин, что, вероятно, является результатом выноса песка и глины из породы пласта. Особенность осадков из дегазатора и ЭДГ – присутствие значительных количеств сульфида железа, связанное с биогенными процессами сульфатредукции. Таким образом, состав осадков может отличаться не только на разных месторождениях, но даже на одном месторождении в различных участках добычи, а также в узлах технологического оборудования. Знание химического состава отложений играет важную роль в понимании механизма их образования и необходимо для выбора методов ингибирования и очистки оборудования от солей, образовавшихся в результате эксплуатации. Для решения такого рода задач необходимо использование методов математического и экспериментального моделирования процесса с учетом не только химического состава вод, но и физико-химических параметров систем добычи, подготовки и транспортировки нефти.

3. Методы прогнозирования образования солей. Возможности и недостатки

Прогнозирование образования малорастворимых солей в нефтепромысловом оборудовании основано на расчете химических равновесий для каждой реакции, которая может произойти в системе, что позволяет сделать вывод, какие компоненты в данных условиях останутся в растворенном состоянии, а какие образуют малорастворимую соль. Ключевую роль при моделировании осадкообразования в нефтепромысловых системах играют физико-химические параметры процесса добычи, такие как температура, давление и др. Критерием образования малорастворимой соли служит величина пересыщения раствора [37]. Величина пересыщения раствора (Π) малорастворимой солью $Kt_m An_n$, диссоциирующей в растворе, по реакции



равна

$$\Pi = \frac{[a_{Kt}]^m \cdot [a_{An}]^n}{K_{sp}(Kt_m An_n)}, \quad (2)$$

где a_{Kt} – активность катиона, a_{An} – активность аниона, K_{sp} – произведение растворимости соли.

Если $\Pi < 1$, то раствор не насыщен рассматриваемой солью, при $\Pi = 1$ имеем насыщенный, а при $\Pi > 1$ – пересыщенный раствор соли. В последнем случае возможно выделение осадка малорастворимой соли. На практике чаще используют

не величину пересыщения раствора Π , а ее десятичный логарифм – индекс насыщения раствора SI (Saturation Index):

$$SI = \lg \frac{[a_{Kl}]^n \cdot [a_{An}]^n}{K^{sp}_{(Kl_m An_n)}}. \quad (3)$$

При $SI \leq 0$ раствор не выделяет осадок малорастворимой соли, при $SI > 0$ осадкообразование возможно.

Особенное внимание при прогнозировании солеотложений в нефтяном промысле уделяется сульфатным и карбонатным осадкам, как наиболее распространенным.

В литературе известно большое количество методов расчета выпадения сульфатов. Основные – это графоаналитические методы Э.Е. Лондона; А.Дж. Остроффа; А.И. Чистовского; Ю.П. Гаттенберга и В.П. Дьяконова; Х.А. Стиффа и Л.Е. Дэвиса; В.П. Зверева (при $t \leq 40$ °С и μ (ионной силе раствора) $\leq 5,5$); Х.Л. Скиллмена, Дж.П. Мак-Дональда и Х.А. Стиффа (при $t \leq 90$ °С и $\mu \leq 3,6$). Графоаналитические методы прогнозирования солеотложений являются более сложными в реализации и имеют меньшую достоверность [36].

Для программирования и автоматизации технологических процессов предупреждения солеобразования при добыче нефти наиболее удобны расчетно-аналитические методы. Среди них можно выделить методы В.А. Панова, А.А. Емкова, Г.Н. Позднышева (при $t < 30$ °С) и Р.Б. Узбекова, Р.Я. Кучумова, Р.Ф. Хайруллина [38]. Эти методы основаны на использовании единичных экспериментальных значений констант произведения растворимости солевых комплексов при равновесном состоянии или же графических зависимостей в ограниченном диапазоне изменения температуры, давления и компонентного состава растворов, определяющих процесс солеобразования. Экспериментальные значения констант, находящиеся в различных химических справочниках, не всегда достаточны для практических расчетов, так как отражают лишь частные случаи. Необходимы численные модели на основе эмпирических зависимостей. Это методы Ю.В. Антипина и М.Д. Валеева [39]; Южно-Уральского отделения ВНИГНИ [38]; Дж.Е. Оддо и М.Б. Томсона [36]; В.Е. Кашавцева [36]. Последний метод позволяет прогнозировать осадкообразование комплекса солей. Авторы [38] считают методы А.Ю. Намиота и Дж.Е. Оддо и М.Б. Томсона наиболее достоверными в силу учета комплексного влияния температуры, давления и химических свойств пластовой жидкости. Удобным является метод прогнозирования высаждения сульфата бария в нефтепромысловых системах с высоким содержанием хлоридов в воде, предложенный в [40]. Метод основан на корреляции значения растворимости сульфата бария в зависимости от температуры и концентрации хлоридов в попутно добываемой воде. Реализация данного метода была выполнена авторами на программном комплексе Matlab. Авторы считают, что использование только двух параметров упрощает расчеты, при этом метод показывает приемлемую достоверность для использования в нефтяной промышленности

Осадки карбонатного типа в нефтепромысловых системах в основном представлены разными формами карбоната кальция. Несмотря на то что существует несколько его форм (кальцит, арагонит и ватерит), на нефтедобывающих предприятиях принято считать, что из них осаждается только кальцит, и расчеты производятся в первую очередь для кальцита [1]. Прогнозирование осаждения карбонатов считается наиболее сложным, так как зависит от распределения CO_2 в трех фазах (вода, нефть и газ) при заданных термобарических параметрах [1, 2, 41]. В свою очередь, содержание CO_2 тесно коррелирует с pH. Чем меньше в воде растворенного CO_2 , тем выше pH раствора, и при $\text{pH} > 8,5$ содержанием CO_2 можно пренебречь. Важно отметить, что для достоверного определения pH необходимо четко соблюдать

условия отбора и транспортировки проб. Автором [42] было продемонстрировано, как изменение значения pH всего на 8% привело к искажению прогнозов вплоть до противоположных.

Одним из первых методов оценки насыщения воды карбонатом кальция предложил в 1936 г. У. Ланжелле. В дальнейшем были предложены другие методы для различных систем: индекс Ризнера для пресной воды, индекс Стиффа–Дэвиса, расширяющий индекс Ланжелле на нефтепромысловые системы; индекс Оддо–Томсона для воды под давлением газовой фазы. Тем не менее индекс Ланжелле широко применяют и в настоящее время [36]. Существует множество методов прогнозирования образования карбонатных солей: Д.М. Бриль и Р.А. Рашитовой (при $t < 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\mu \leq 5,5$ и $p(\text{CO}_2) < 0,2\text{ МПа}$), Х.Ф. Стиффа и Л.Е. Дэвиса (при $t \leq 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\mu \leq 3,6$). Методы на основе теории ионного строения Дебая и Гюккеля: С.С. Заводнова; Ф.Н. Маричева, В.К. Кима и А.А. Глазкова; Дж.Е. Оддо и У. Райса (при $t < 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $p(\text{CO}_2) \leq 6,2\text{ МПа}$); А.Ю. Намиота; Н.С. Маринина; Г.П. Волобуева и Л.Е. Сокиро [1, 2, 36, 38]. Каждый метод имеет свои преимущества и был испытан в условиях промысла. Например, метод Стиффа–Дэвиса основан на сравнении фактического pH с расчетным значением pHs при насыщении данной воды карбонатом кальция. Известно, что для Самотлорского месторождения использование метода Стиффа–Дэвиса в 40% случаев дало результаты, не соответствующие промысловой обстановке [36]. Связано это, вероятно, с необходимостью измерения pH непосредственно в условиях промысла. На основе алгоритмов Намиота, Дебая и Гюккеля, Оддо и Томсона был создан программный комплекс «Автотехнолог-salt» [38].

Несмотря на то что условия выпадения отдельных типов осадков к настоящему времени достаточно хорошо изучены и существует множество методов для расчета процессов солеотложения в различных ситуациях, на практике расчетные методы демонстрируют неоднозначные, а иногда и противоречивые результаты. Работы, посвященные сравнению результатов математического моделирования солеобразования с составом реальных осадков из узлов нефтепромысловых систем либо модельных экспериментов, демонстрируют, что наилучшие результаты показывают методы расчета, основанные на теории растворимости солей Дебая–Гюккеля [36]. Авторами [17] была предложена технология автоматизированного выбора метода расчета солеобразования, которая позволила сравнить результаты расчетов, полученные различными методами с составом реальных отложений. Для этого проведено сравнение методов Бриль–Рашитовой; Стиффа–Дэвиса; Райса–Оддо (в модификации Г.Ю. Исаевой); В.Е. Кащавцева; В.А. Панова для оценки образования карбоната кальция на Ярино–Каменноложском месторождении. Было показано, что использование метода В.А. Панова в данных условиях дает наиболее точные результаты. Таким образом, одна и та же методика может быть как эффективна для месторождения, так и, наоборот, давать противоположные результаты, следовательно, ключевой задачей является правильный выбор метода расчета, который можно осуществить за счет параллельного использования ряда методов с известной параметрической областью, а также сравнением с составом реальных отложений.

Отдельное направление занимает прогнозирование солеобразования в процессе смешивания вод для системы поддержания пластового давления. На морских нефтедобывающих платформах для закачивания в пласт используется морская вода в смеси с попутно добываемыми водами, прошедшими отделение от нефти. Такой механизм является самым простым способом утилизации больших объемов попутно добываемых вод. Пластовые и закачиваемые воды месторождения могут значительно отличаться по составу и быть химически несовместимы. Существует ряд аттестованных методов оценки применимости вод для заводнения, а также их совместимости с пластовыми

водами¹, в их основе лежит информация об ионном составе смешиваемых вод. Кроме того, некоторые методы позволяют оценить применимость закачиваемой воды в зависимости от размеров частиц механических примесей, коэффициента проницаемости данной воды в породах продуктивного пласта и др. Ряд методов, включающих химические расчеты, легли в основу компьютерных программ, например на основе ОСТ 39-229-89² создан программный комплекс «РОСА». Существуют и другие методики, специализирующиеся на смешивании вод, их особенностью является то, что каждый метод работает в определенном интервале условий (общая минерализация растворов, термобарические параметры смешивания и др.) и нацелен на избирательный прогноз выпадения конкретной соли [43]. В свою очередь, непростой задачей является установление последовательности выпадения солей. Как правило, алгоритм расчета подразумевает поочередный расчет выпадения солей начиная от менее растворимой соли, но сравнение произведений растворимости солей не всегда отражает реальную картину на практике, так как они характеризуют растворимость солей в дистиллированной воде. В гидрохимических и термобарических условиях реального промысла последовательность выпадения солей будет изменяться. Исследования на различных месторождениях показывали индивидуальную очередность выпадения солей (табл. 2).

В связи с невозможностью полноценного математического моделирования в последнее время увеличивается количество работ, посвященных экспериментальному моделированию процессов солеотложения в результате смешивания пластовых и закачиваемых вод месторождения [6, 18, 44]. Работы демонстрируют общую сходимость расчетных и экспериментальных данных, тем не менее подчеркивают, что в лабораторном эксперименте невозможно смоделировать локальные изменения условий, а также влияние многих существенных факторов, которые присутствуют в обстановке реального нефтяного промысла.

Таким образом, ни один метод не является универсальным. К основным недостаткам таких методов можно отнести их способность работать только в определенном интервале параметров, неспособность прогнозирования смешанного осаждения. Эти проблемы в некоторой степени способны решать современные программные комплексы, которые могут учитывать специфику образования осадков в сложных

Таблица 2

Последовательности выпадения солей при различных условиях

Соль	Литературный источник				
	[2]	[42]	[17]		
			25°C	100°C	200°C
BaSO ₄	1	1	1	1	2
SrSO ₄	2	4	3	4	4
CaCO ₃	3	2	2	2	1
MgCO ₃	4	3	4	3	3
CaSO ₄	5	5	5	5	5

¹ ОСТ 39-228-89. Вода для заводнения нефтяных пластов. Оценка совместимости закачиваемой воды с пластовой водой и породой продуктивного пласта. М., Введ. 01.07.1990. 13 с.
² ОСТ 39-229-89. Вода для заводнения нефтяных пластов. Определение совместимости закачиваемых и пластовых вод по кальциту и гипсу расчетным методом. М., Введ. 01.07.1990. 14 с.

многокомпонентных смесях. Важным преимуществом таких программ является возможность расчета различных кристаллических структур осадков одного химического состава. Существует большое количество коммерческих программ для прогнозирования солеотложения в нефтепромысловых системах. На их основе могут создаваться модульные системы различной конфигурации и направленности решаемых задач [17, 41]. Например, широко известные программные комплексы ScaleChem (OLI) и Multi-Scale (Expro) способны проводить расчеты с учетом большого количества параметров, включая даже сложный анализ распределения газов (CO_2 и H_2S) между тремя фазами скважинной продукции (нефть, вода и газ) с учетом термобарических условий, что имеет большое значение при прогнозировании осаждения карбонатов и сульфидов. Но несмотря на широкие возможности, данные программы в большей степени ориентированы на расчет солеотложения в водных системах, в то время как, например, программные комплексы Winprop (CMG) и PVTsim (Calsep) сосредоточены на расчетах в углеводородной фазе, но имеют ряд ограничений в водной среде [41]. Во многих расчетных методах не учитывается изменение термобарических условий и химического состава растворов в процессе солеобразования, не оценивается смешиваемость вод с учетом их совместимости и процесса высаливания. Немаловажно, что большинство программных комплексов являются платными, и не каждый рядовой исследователь способен сравнить и оценить их эффективность. Среди широкодоступных бесплатных программных комплексов для расчетов процессов, протекающих в растворах, можно выделить Phreeqc Interactive. Его особенностью является ориентированность на геохимические расчеты кинетики реакций и химического равновесия водных систем, в том числе в процессах транспортировки жидкости [45].

Всестороннее исследование возможностей современных методов прогнозирования солеотложения на примере Пильтун-Астохского нефтегазового месторождения [5, 6, 8] показало, что применение программных комплексов позволяет прогнозировать образование карбонатов щелочноземельных металлов, алюмосиликатов натрия и калия, а также сульфата бария (рис. 3). Тем не менее в нефтепромысловых системах обнаруживаются неорганические отложения, которые противоречат

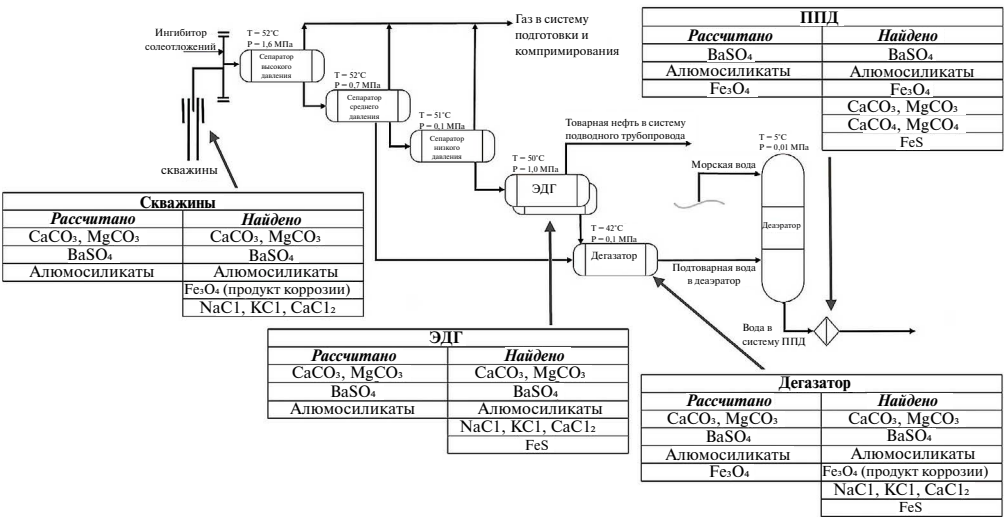


Рис. 3. Сравнение результатов расчета качественного состава неорганической части отложений с составом реального осадка из узлов морской нефтегазовой платформы о-ва Сахалин [5]

расчетам, включая образование сульфатов кальция и магния, а также хлоридов натрия, калия и кальция, сульфидов, полисульфидов, в том числе пирофорных соединений серы, обладающих тенденцией к самовоспламенению.

Появление сульфидов связано с биогенными процессами сульфатредукции, питательной средой для которых являются некоторые органические соединения, окисляемые до уксусной кислоты и углекислого газа. Данные участки нефтепромысловой системы обладают благоприятными термобарическими условиями для развития сульфатредуцирующих бактерий. Этот процесс трудно моделировать, в том числе и в связи с особенностями пробоотбора: сульфид-ион в попутно добываемой воде необходимо определять непосредственно после отбора пробы. Осаждение хлорида натрия (галита) характерно прежде всего для месторождений, состав пластовых вод которых по уровню минерализации приближается к рассолам (>300 г/дм³) [35]. В данном случае выпадение галита связано, вероятно, с тем, что в процессе подготовки нефти на всех этапах происходит удаление воды и выделение растворенного газа, что приводит к общему увеличению концентрации солей. К тому же, пузырьки газа в основном образуются на стенках оборудования, следствием этого является образование многочисленных границ раздела фаз, которые являются благоприятным условием для зарождения и роста кристаллов солей, и в осадок выпадает в том числе галит. Важно отметить, что состав отложений даже в пределах одного месторождения может отличаться в зависимости от технологического участка, связано это также в первую очередь с уникальными физико-химическими условиями в оборудовании добычи и очистки скважиной продукции.

Таким образом, используемые в настоящее время методы прогнозирования солеобразования при добыче и транспортировке нефти позволяют оценивать химический состав и количество выпадающих солей, а также выявлять тенденцию к солеотложению при обводнении скважин и при смешивании закачиваемых в пласт вод. Однако в ряде случаев наблюдается расхождение расчетных и экспериментальных данных. Это связано с тем, что большинство существующих расчетных методов способны учитывать только химические (концентрация ионов, ионная сила раствора) и термодинамические параметры (температура, давление), но не учитывают целый ряд важных факторов – скорость и форма потока пластовых флюидов, способные изменять структуру осадка; коллоидные свойства компонентов системы (размер и заряд частиц), микробиологическая деятельность (сульфатредуцирующие бактерии), наличие центров кристаллизации других минералов и др.

4. Современные тенденции развития отрасли прогнозирования солеотложения. Роль искусственного интеллекта

В настоящее время во всем мире наблюдается тенденция внедрения методов анализа, основанных на алгоритмах искусственного интеллекта (ИИ) для решения многих технологических задач, в том числе в химии. Недавние работы, посвященные применению ИИ в задачах нефтедобывающей отрасли, демонстрируют, что он уже находит успешное применение на различных этапах добычи, начиная с геологоразведочных работ, эффективного бурения скважин, включая задачи повышения нефтеотдачи пластов, прогнозирования свойств нефти, оценки вероятности осложнений и аварий, оптимизации вопросов транспортировки продукции, и заканчивая смягчением воздействия на окружающую среду [46–48]. Такие крупные нефтегазовые компании, как BP, Shell, Saudi Aramco, Baker Hughes, уже приступили к использованию методов ИИ на практике.

В России, согласно докладу исследователей НИУ ВШЭ, инструменты ИИ применяются в промышленности для обработки данных, оптимизации производственных

процессов и определения необходимости ремонта оборудования. Однако только 3,6% промышленных компаний в России используют ИИ в своей деятельности. В этом списке лидером является «Роснефть», у которой имеется 23 наукоемких продукта, в том числе 10 доступных для заказчиков извне [49]. «Газпром нефть» уже применяет нейронные сети для разведочного бурения. Исходя из совокупного опыта компании совместно с МФТИ специалисты «Газпром нефти» создали единую самообучающуюся базу данных кернов, на основании которой теперь можно прогнозировать свойства пород на новых месторождениях без отбора новых образцов кернов. Разработка найдет применение в информационной системе «Газпром нефти» «ЭРА». Специалистами ООО «РН-БашНИПИнефть» была оценена возможность применения методов ИИ диагностики неисправностей и проверки вероятности отказов оборудования. При этом ИИ показал свою высокую эффективность, продемонстрировав 88% точности анализа на тестовой выборке при диагностике неисправностей штанговой насосной установки и 94% точности при прогнозе исправного функционирования установки электроцентробежного насоса в скважине в течение ближайшего месяца [50].

В настоящее время основным технологическим трендом в области анализа данных в нефтяной промышленности являются цифровые двойники месторождений. Цифровой двойник – это цифровая симуляция реального объекта, существующего и изменяющегося в реальном времени. Задача цифрового двойника – предсказать, как изменится процесс добычи и подготовки нефти в случае изменения различных параметров (температура, давление, скорость потока, химический состав флюидов и др.), следовательно, подобрать наиболее эффективные и безопасные условия.

В целом задачи нефтяной промышленности, для которых возможно применение ИИ, можно обобщить в 5 наиболее крупных групп [49]: оптимизация добычи, предсказание аварий, управление ресурсами, анализ данных, управление производством.

Главным преимуществом методов искусственного интеллекта является их способность обрабатывать большие объемы данных, что позволяет выявить закономерности и тенденции, которые могут быть неочевидны для простых одноцелевых компьютерных программ и тем более для человека. Кроме того, важно, что ИИ способен постоянно обучаться и подстраиваться под изменяющиеся условия технологического процесса, что может быть особенно ценно на объектах нефтедобычи. При наличии достаточного объема данных для обучения результаты прогнозирования процессов солеотложения, вероятно, будут значительно точнее, чем у программных комплексов, применяемых в настоящее время. Важным преимуществом ИИ может стать его возможность интеграции с другими программами моделирования процессов добычи нефти, что позволит ему использовать данные из различных источников. Кроме того, ИИ способен осуществлять мониторинг процесса добычи в реальном времени, благодаря чему ИИ сможет быстро идентифицировать проблемный участок в случае выхода из строя системы.

Одним из инструментов ИИ для прогнозирования физико-химических процессов являются искусственные нейронные сети. Математическая модель нейронных сетей известна достаточно давно, впервые математическая модель искусственного нейрона была предложена в 1943 г. У.С. Мак-Каллоком и В. Питтсом. Для химических расчетов их начали применять еще в 1970-е годы, однако в силу ограниченной вычислительной мощности до недавнего времени они были не актуальны. Благодаря своим широким возможностям в самостоятельном обучении и способности обрабатывать большие объемы данных нейронные сети успешно применяются в химии, например, в случаях, когда необходимо предсказать свойства соединения по его структуре. Задачи, связанные с прогнозированием процесса солеотложения в нефтепромысловых системах, схожи с теми, для решения

которых уже используются данные методы. Вне зависимости от решаемых задач метод нейронных сетей имеет общую методологию работы. Для прогнозирования процессов солеотложения в нефтепромысловых системах создается модель на основе массива данных для обучения нейросети, которые разбиваются на две части – обучающую и контрольную выборку, за счет чего происходит обучение и контроль эффективности данной модели ИИ. Особенностью использования нейросетевой модели является то, что можно не ограничиваться в количестве используемых параметров, на которых строится модель, чем больше их будет, тем выше вероятность, что нейросети удастся обнаружить неизвестные ранее закономерности. Это повысит точность будущих прогнозов. Искусственные нейронные сети уже находят применение для прогнозирования солеотложения в нефтепромысловых системах. В работе [51] было показано, что использование нейросетей позволяет учитывать не только термодинамические параметры образования отложений, но также и влияние кинетических и транспортных факторов. Результаты прогнозирования образования сульфата бария и кальция, полученные при помощи нейронной сети, оказались более точными по сравнению с другими методами.

Очевидно, что применение методов ИИ будет иметь также ряд ограничений и недостатков. Существенным минусом ИИ является потребность в большом количестве данных для обучения. Одной из основных проблем при разработке и внедрении систем ИИ в нефтегазовой отрасли является проблема сбора и организации данных. Первые проекты совместного использования данных только начинают появляться. Примером может служить проект межотраслевого сотрудничества OSDU (Open Subsurface Data Universe), разрабатываемый компанией Equinor [52], направленный на объединение данных по разведке и разработке месторождений. К настоящему моменту в нем участвуют уже 206 компаний, в том числе такие крупные, как Shell, BP, Total Energies, Chevron, ConocoPhillips, ExxonMobil, Repsol S.A., Woodside Energy, Saudi Aramco. Еще одно ограничение алгоритмов работы ИИ заключается в том, что они основаны на выявлении закономерностей в уже известных наборах данных и могут не учитывать физические законы и принципы, которые управляют процессами отложения солей, а также взаимодействия факторов. Кроме того, ИИ может неправильно интерпретировать данные, если они неполны или неточны, что приводит к неверным прогнозам. Главный минус использования ИИ заключается в отсутствии прозрачности вычислений, которое может затруднить интерпретацию полученных результатов и сделает некоторые решения, принятые программой, необъяснимыми для оператора. Кроме того, следует учесть, что для нефтедобывающих компаний важным является вопрос конфиденциальности данных, следовательно, использование ИИ должно обеспечивать должную защиту от утечки данных, кибератак и других угроз безопасности. Таким образом, несмотря на широкие возможности и перспективы использования методов ИИ для прогнозирования процессов отложения солей в нефтепромысловых системах, на данном этапе необходимо использовать комбинацию ИИ и традиционных методов прогнозирования.

Заключение

Методы прогнозирования солеотложений в нефтепромысловых системах разрабатываются уже более 80 лет. Трудности в прогнозировании процессов солеотложения обусловлены неоднородностью состава попутно добываемых и закачиваемых вод, на основе которого проводятся расчеты, и изменением физико-химических параметров нефтепромысловых систем в процессе добычи и подготовки скважинной продукции.

В настоящее время для прогнозирования процессов солеотложения существует большое количество различных программных комплексов, в основе которых лежит термодинамический расчет химических равновесий. В целом используемые программные комплексы обладают достаточно широкими возможностями и способны с хорошей степенью достоверности предсказывать образование малорастворимых карбонатов и сульфатов, являющихся одними из основных компонентов неорганической части нефтепромысловых отложений. Тем не менее работы, посвященные оценке эффективности прогнозирования, демонстрируют, что в нефтепромысловых осадках часто встречаются компоненты, противоречащие расчетам, такие как сульфиды и хлориды, появление которых связано с более сложными процессами, протекающими в оборудовании, такими как выделение пузырьков газа, изменение скорости и формы потока жидкости, микробиологическая деятельность. Методология прогнозирования солеотложения в нефтепромысловых системах продолжает развиваться в следующих направлениях: выпадение органических солей и металлоорганических соединений; исследование условий и механизмов образования многокомпонентных отложений; совершенствование алгоритмов математического расчета отложений с учетом всех физико-химических параметров добычи, подготовки и транспортировки нефти с упором на кинетику процесса. В решении такого рода задач важную роль будет играть искусственный интеллект, несмотря на недостатки, связанные с потребностью в большом количестве данных для анализа, а также неочевидным путем принятия решения. Применение искусственного интеллекта станет эффективным инструментом, позволяющим расширить возможности моделирования за счет способности обрабатывать большие объемы информации. Искусственный интеллект способен построить новые эффективные модели с учетом многолетнего опыта добычи, обнаружить закономерности и особенности каждого месторождения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бриков А.В., Маркин А.Н. Нефтепромысловая химия: практическое руководство по борьбе с образованием солей. М.: Де'Либри, 2018. 355 с.
2. Crabtree M., Eslinger D., Fletcher P. et al. Fighting Scale – Removal and Prevention // *Oilfield Rev.* 1999. Vol. 11. No. 3. P. 30–45.
3. Liu Y., Lu H., Li Y. et al. A review of treatment technologies for produced water in offshore oil and gas fields // *Science of the Total Environment.* 2021. Vol. 775. P. 1–14.
4. Mady M.F., Kelland M.A. Review of Nanotechnology Impacts on Oilfield Scale Management // *ACS Applied Nano Materials.* 2020. Vol. 3. Iss. 8. P. 7343–7364.
5. Полякова Н.В., Задорожный П.А., Трухин И.С., Маркин А.Н., Суховерхов С.В., Авраменко В.А. Моделирование солеосаждения в нефтепромысловом оборудовании платформы ПА-А // *Вестник ДВО РАН.* 2017. № 5. С. 98–105.
6. Трухин И.С., Полякова Н.В., Задорожный П.А., Суховерхов С.В., Маркин А.Н., Авраменко В.А. Моделирование процессов солеотложения в системе поддержания пластового давления платформы Пильтун-Астохская-А (проект «Сахалин-2») // *Вестник ДВО РАН.* 2017. № 5. С. 106–112.
7. Rajbongshi A., Gogoi S.B. A review on oilfield produced water and its treatment technologies // *Petroleum Research.* 2024. Vol. 298. P. 1–17.
8. Полякова Н.В., Трухин И.С., Задорожный П.А., Суховерхов С.В., Маркин А.Н., Авраменко В.А. Сравнение данных физико-химического моделирования и реального состава солеотложений в узлах нефтепромыслового оборудования платформы Пильтун-Астохская-Б (проект «Сахалин-2») // *Технологии нефти и газа.* 2017. № 3 (110). С. 26–33.
9. Xu Z.X., Li S.Y., Li B.F. et al. A review of development methods and EOR technologies for carbonate reservoirs // *Pet. Sci.* 2020. Vol. 17. P. 990–1013.

10. Трухин И.С. Прогнозирование осадкообразования в узлах нефтепромыслового оборудования морских нефтедобывающих платформ (на примере проекта «Сахалин-2») / дис. ... канд. хим. наук: 02.00.04. Владивосток, 2020. 176 с.
11. Трухин И.С., Прокуда Н.А., Азарова Ю.А., Задорожный П.А., Суховерхов С.В. Изучение химического состава попутно добываемых пластовых и окружающих морских вод на нефтегазодобывающих платформах проекта «Сахалин-2» // ГИАБ. 2015. № 36. С. 225–234.
12. Samuel O., Othman M.H.D., Kamaludin R. et al. Oilfield-produced water treatment using conventional and membrane-based technologies for beneficial reuse: A critical review // *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 308. 114556.
13. Семенова Т.В. Изменение ионно-солевого состава пластовых вод на стадии разработки месторождений южных нефтегазоносных районов Тюменской области // *Изв. вузов. Нефть и газ*. 2002. № 5. С. 65–70.
14. Чертовских Е.О., Кунаев Р.У., Качин В.А., Карпиков А.В. Отложения гипса при добыче нефти и газа на Верхнечонском нефтегазоконденсатном месторождении // *Вестник ИргТУ*. 2013. № 12 (83). С. 143–148.
15. Всеволожский В.А., Киреева Т.А. Влияние глубинных газопаровых флюидов на формирование состава пластовых вод нефтегазовых месторождений // *Вестн. Моск. ун-та. Серия 4: Геология*. 2010. № 3. С. 57–62.
16. Bailey B., Crabtree M., Tyrie J. et al. Water control oilfield review // *Oilfield Review*. 2000. Vol. 12. Iss. 1. P. 30–51.
17. Абукова Л.А. Технология автоматизированного выбора метода изучения минерального солеотложения в пластовых и скважинных условиях // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2002. № 5. С. 90–94.
18. Федорова А.Ф., Шиц Е.Ю. Методический комплекс по изучению химической совместимости пластовых флюидов с системами ППД // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2011. Т. 54. № 3. С. 88–91.
19. Hu Y.-S., Min C. Identification and modeling of geochemical reactions occurring within the sandstone reservoir flooded by seawater // *Pet. Sci. Technol*. 2016. Vol. 34. No. 17/18. P. 1595–1601.
20. Liu F., Wang M. Review of low salinity waterflooding mechanisms: Wettability alteration and its impact on oil recovery // *Fuel*. 2020. Vol. 267. P. 1–17.
21. Попов С.Н. Численное моделирование техногенного солеотложения при закачке морской воды в продуктивный пласт на примере месторождения Жетыбай (Казахстан) // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2012. № 2. С. 48–53.
22. Гаджиев Ф.М., Атакишева Н.А. Исследование химического состава смеси пластовой воды свиты «Перерыва» месторождения «Гюнешли» с водой Каспийского моря // *SOCAR Proceedings*. 2012. № 1. С. 30–40.
23. Moghadasi J., Muller-Steinhagen H., Jamaialahmadi M., Sharif A. Prediction of scale formation problem in oil reservoirs and production equipment due to injection of incompatible waters // *Asia-Pacific J. Chem. Eng.* 2006. Vol. 14. No. 3/4. P. 545–566.
24. Azizi J., Shadizadeh S.R., Manshad A.K., Jadidi N. Effects of pH and temperature on oilfield scale formation // *IJOGST*. 2018. Vol. 7. No. 3. P. 18–31.
25. Сафиуллин И.Р., Гараева Н.В., Цыбин С.С. и др. Минерализация пластовых вод неокомского водоносного комплекса месторождения Западной Сибири // *Экспозиция Нефть Газ*. 2023. № 2. С. 24–29.
26. Garba M.D., Sulaiman M.S. Oilfield Scales Treatment and Managerial Measures in the Fight for Sustainable Production // *PTDJ*. 2014. Vol. 2. P. 19–37.
27. Kamal M.S., Hussein I., Mahmoud M. et al. Oilfield scale formation and chemical removal: A review // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018. Vol. 171. P. 127–139.
28. Rafiee H., Sorbie K., Mackay E. The Deposition Kinetics of Barium Sulphate Scale: Model Development // *Frontiers in Materials*. 2023. Vol. 10. P. 1–23.
29. Xu Z.X., Li S.Y., Li B.F. et al. A review of development methods and EOR technologies for carbonate reservoirs // *Petroleum Science*. 2020. Vol. 17. Iss. 4. P. 990–1013.
30. Muryanto S., Bayuseno A., Ma H., Usamah M. Calcium carbonate scale formation in pipes: effect of flow rates, temperature and malic acid as additives on the mass and morphology of the scale // *Procedia Chem*. 2014. Vol. 9. P. 69–76.

31. Сыдыков Ж.Д., Самбаева Д.А., Толоконникова Л.И., Маймеков З.К. Образование арагонита и кальцита в системе $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{--H}_2\text{O--CO}_2$ – воздух при различной минерализации раствора // Наука, новые технологии и инновации. 2008. № 3/4. С. 220–224.
32. Khormali A., Petrakov D.G., Javad M., Moein A. Experimental analysis of calcium carbonate scale formation and inhibition in waterflooding of carbonate reservoirs // J. Pet. Sci. Eng. 2016. Vol. 147. P. 843–850.
33. Ольховская В.А., Песков А.В., Ермошкин А.А., Гритчина В.В. Диагностирование состава солевых отложений методами рентгендифрактометрического и энергодисперсионного микроанализа // Нефтепромысловое дело. 2010. № 5. С. 44–52.
34. Fan M.M., Liu H.F., Dong Z.H. Microbiologically influenced corrosion of X60 carbon steel in CO_2 -saturated oilfield flooding water // Materials and Corrosion. 2013. Vol. 64. No. 3. P. 242–246.
35. Гусаков В.Н., Абдрашитова Р.Н., Колотыгина В.Н. Анализ условий формирования отложений галита и поиск реагентов для ингибирования // Вода: химия и экология. 2024. № 1. С. 29–41.
36. Кашацев В.Е., Мищенко И.Т. Солеобразование при добыче нефти. М.: Орбита-М, 2004. 433 с.
37. Awadh S.M., Al-Mimar H.S., Yaseen Z.M. Effect of Water Flooding on Oil Reservoir Permeability: Saturation Index Prediction Model for Giant Oil Reservoirs, Southern Iraq // Natural Resources Research. 2021. Vol. 30. P. 4403–4415.
38. Ивановский В.Н. Анализ существующих методик прогнозирования солеотложения на рабочих органах УЭЦН // Инженерная практика. 2009. Пилотный выпуск. С. 8–11.
39. Маркин А.Н., Низамов Р.Э., Суховерхов С.В. Нефтепромысловая химия: практическое руководство. Владивосток: Дальнаука, 2011. 294 с.
40. Bahadori A., Zahedi G., Zendheboudi S. Estimation of potential barium sulfate (barite) precipitation in oilfield brines using a simple predictive tool // Environ. Prog. Sustain. 2013. Vol. 32. No. 3. P. 860–865.
41. Verri G., Sorbie K.S., Silva D. A rigorous general work flow for accurate prediction of carbonate and sulphide scaling profiles in oil and gas wells // J. Pet. Sci. Eng. 2017. Vol. 156. P. 673–681.
42. Исаева Г.Ю. Основные проблемы оценки солеотложения при разработке гидротермальных ресурсов // Труды Института геологии ДНЦ РАН. 2009. № 55. С. 156–158.
43. Ситников А.В., Сенникова О.В., Жирнов М.В. и др. Прогнозирование солеотложения при смешивании различных типов вод в системе поддержания пластового давления // Нефтяное хозяйство. 2007. № 9. С. 64–65.
44. Сальникова Ю.И. Результаты исследований совместимости пластовых и закачиваемых вод на месторождении углеводородов в Западной Сибири // Успехи современного естествознания. 2024. № 2. С. 44–53.
45. Peretomode E., Eboibi B., Hart A., Ajie M. Modeling the impact of pH and reservoir temperature on the dissolution of quartz mineral due to oilfield chemical treatment // Petroleum Science and Technology. October, 2020. P. 1–15.
46. Sircar A., Yadav K., Rayavarapu K. et al. Application of machine learning and artificial intelligence in oil and gas industry // Petroleum Research. 2021. Vol. 6. Iss. 4. P. 379–391.
47. Хасанов И.И., Хасанова З.Р., Шакиров Р.А., Недельченко О.И. Обзор применения нейросетей в области добычи и транспорта нефти и газа // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2022. № 3/4. С. 11–15.
48. Choubey S., Karmakar G.P. Artificial intelligence techniques and their application in oil and gas industry // Artificial Intelligence Review. 2021. Vol. 54 (5). P. 3665–3683.
49. Половова Т.А., Сульдина Г.А., Владимирова С.А., Телков О.А. Перспективы использования технологий искусственного интеллекта в нефтегазовой отрасли // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2023. Т. 13. № 3-1. С. 119–125.
50. Топольников А.С. Машинное обучение для механизированной добычи нефти // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2021. № 5. С. 14–19.
51. Falode O., Udomboso C., Ebere F. Prediction of Oilfield Scale Formation Using Artificial Neural Network (ANN) // Advances in Research. 2016. Vol. 7 (6). P. 1–13.

52. Черников А.Д., Еремин Н.А., Столяров В.Е. и др. Применение методов искусственного интеллекта для выявления и прогнозирования осложнений при строительстве нефтяных и газовых скважин: проблемы и основные направления решения // Георесурсы. 2020. Т. 22. № 3. С. 87–96.

REFERENCES

1. Brikov A.V., Markin A.N. *Neftepromyslovaya khimiya: Prakticheskoe rukovodstvo po bor'be s obrazovaniem solei* = [Oilfield Chemistry: A Practical Guide to Combating Salt Formation]. Moscow: De'Libri; 2018. 355 p. (In Russ.).
2. Crabtree M., Eslinger D., Fletcher P. et al. Fighting Scale – Removal and Prevention. *Oilfield Rev.* 1999;11(3):30–45.
3. Liu Y., Lu H., Li Y. et al. A review of treatment technologies for produced water in offshore oil and gas fields. *Science of the Total Environment.* 2021;775:1–14.
4. Mady M.F., Kelland M.A. Review of Nanotechnology Impacts on Oilfield Scale Management. *ACS Applied Nano Materials.* 2020;3(8):7343–7364.
5. Polyakova N.V., Zadorozhnyi P.A., Trukhin I.S., Markin A.N., Sukhoverkhov S.V., Avramenko V.A. Modeling of scaling in oilfield equipment of the Piltun-Astokhskaia-A platform. *Vestnik of the FEB RAS.* 2017;(5):98–105. (In Russ.).
6. Trukhin I.S., Polyakova N.V., Zadorozhnyi P.A., Sukhoverkhov S.V., Markin A.N., Avramenko V.A. Modeling of scaling in the system of maintaining reservoir pressure on the Piltun-Astokhskaia-A platform ('Sakhalin-2' project). *Vestnik of the FEB RAS.* 2017;(5):106–112. (In Russ.).
7. Rajbongshi A., Gogoi S.B. A review on oilfield produced water and its treatment technologies. *Petroleum Research.* 2024;298:1–17.
8. Polyakova N.V., Trukhin I.S., Zadorozhnyi P.A., Sukhoverkhov S.V., Markin A.N., Avramenko V.A. Comparison of physicochemical model and real composition of scales in oilfield equipment units of the platform "PA-B". *Oil and Gas Technologies.* 2017;3(110):26–33. (In Russ.).
9. Xu Z.X., Li S.Y., Li B.F. et al. A review of development methods and EOR technologies for carbonate reservoirs. *Pet. Sci.* 2020;17:990–1013.
10. Trukhin I.S. Prognostirovanie osadkoobrazovaniya v uzlakh neftepromyslovogo oborudovaniya morskikh nefte dobyvayushchikh platform (na primere proekta "Sakhalin-2") = [Prediction of scaling in oilfield production equipment units of offshore oil platforms (case study of the 'Sakhalin-2' project)]: Dissertation of Cand. Sci. (Chemistry). Vladivostok; 2020. 176 p. (In Russ.).
11. Trukhin I.S., Prokuda N.A., Azarova Yu.A., Zadorozhnyi P.A., Sukhoverkhov S.V. The produced and ambient sea water chemical composition research on the oil-and-gas platform of the project 'Sakhalin-2'. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2015;36:225–234. (In Russ.).
12. Samuel O., Othman M.H.D., Kamaludin R. et al. Oilfield-produced water treatment using conventional and membrane-based technologies for beneficial reuse: A critical review. *Journal of Environmental Management.* 2022;308:114556.
13. Semenova T.V. *Izmenenie ionno-solevogo sostava plastovykh vod na stadii razrabotki mestorozhdenii yuzhnykh neftegazonosnykh raionov Tyumenskoi oblasti* = [Changes in the ion-salt composition of formation waters at the stage of development of deposits in the southern oil and gas regions of the Tyumen region]. *Higher Educational Institutions News. Neft' i Gaz.* 2002;(5):65–70. (In Russ.).
14. Chertovskikh E.O., Kunaev R.U., Kachin V.A., Karpikov A.V. Gypsum deposits under oil and gas production at Verkhnechonskoe oil/gas condensate field. *Polytech Journal.* 2013;12(83):143–148. (In Russ.).
15. Vsevolozhsky V.A., Kireeva T.A. Influence of deep gas-steam fluids on the composition of reservoir waters of oil and gas fields. *Moscow University Geology Bulletin.* 2010;65(3):209–215.
16. Bailey B., Crabtree M., Tyrie J. et al. Water control oilfield review. *Oilfield Review.* 2000;12(1):30–51.
17. Abukova L.A. *Tekhnologiya avtomatizirovannogo vybora metoda izucheniya mineral'nogo soleotlozheniya v plastovykh i skvazhinnykh usloviyakh* = [Technology of automated selection of the method for studying mineral salt deposition in reservoir and well conditions]. *Geology, Geophysics and Development of oil and Gas Fields.* 2002;(5):90–94. (In Russ.).

18. Fedorova A.F., Shits E.Yu. Metodicheskii kompleks po izucheniyu khimicheskoi sovmestimosti plastovykh flyuidov s sistemami PPD = [Methodological complex for studying chemical compatibility of formation fluids with reservoir pressure maintenance systems]. *Chem. & Chem. Tech.* 2011;54(3):88–91. (In Russ.).
19. Hu Y.-S., Min C. Identification and modeling of geochemical reactions occurring within the sandstone reservoir flooded by seawater. *Pet. Sci. Technol.* 2016;34(17/18):1595–1601.
20. Liu F., Wang M. Review of low salinity waterflooding mechanisms: Wettability alteration and its impact on oil recovery. *Fuel.* 2020;267:1–17.
21. Popov S.N. Numerical simulation of technogenic scaling during sea water injection into a productive formation with Zhetybai field (Kazakhstan) taken as an example. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields.* 2012;(2):48–53. (In Russ.).
22. Gadzhiev F.M., Atakisheva N.A. Study of formation water mixture chemical composition of “Guneshli” field “Interruption” suite with Caspian Sea water. *SOCAR Proceedings.* 2012;(1):30–40. (In Russ.).
23. Moghadasi J., Muller-Steinhagen H., Jamaialahmadi M., Sharif A. Prediction of scale formation problem in oil reservoirs and production equipment due to injection of incompatible waters. *Asia-Pacific J. Chem. Eng.* 2006;14(3/4):545–566.
24. Azizi J., Shadizadeh S.R., Manshad A.K., Jadidi N. Effects of pH and temperature on oilfield scale formation. *IJOGST.* 2018;7(3):18–31.
25. Safiullin I.R., Garaeva N.V., Tsybin S.S. et al. Mineralization of stratal waters of the neocomian aquifer complex of the Western Siberia field. *Exposition Oil Gas.* 2023;2:24–29. (In Russ.).
26. Garba M.D., Sulaiman M.S. Oilfield Scales Treatment and Managerial Measures in the Fight for Sustainable Production. *PTDJ.* 2014;2:19–37.
27. Kamal M.S., Hussein I., Mahmoud M. et al. Oilfield scale formation and chemical removal: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering.* 2018;171:127–139.
28. Rafiee H., Sorbie K., Mackay E. The Deposition Kinetics of Barium Sulphate Scale: Model Development. *Frontiers in Materials.* 2023;10:1–23.
29. Xu Z.X., Li S.Y., Li B.F. et al. A review of development methods and EOR technologies for carbonate reservoirs. *Petroleum Science.* 2020;17(4):990–1013.
30. Muryanto S., Bayuseno A., Ma H., Usamah M. Calcium carbonate scale formation in pipes: effect of flow rates, temperature and malic acid as additives on the mass and morphology of the scale. *Procedia Chem.* 2014;9:69–76.
31. Sydykov Zh.D., Sambaeva D.A., Tolokonnikova L.I., Maimekov Z.K. Obrazovanie aragonita i kal'tsita v sisteme $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{--H}_2\text{O--CO}_2$ – vozdukh pri razlichnoi mineralizatsii rastvora = [Formation of aragonite and calcite in the system $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{--H}_2\text{O--CO}_2$ – air at different mineralization of the solution]. *SNTIK.* 2008;(3/4):220–224. (In Russ.).
32. Khormali A., Petrakov D.G., Javad M., Moein A. Experimental analysis of calcium carbonate scale formation and inhibition in waterflooding of carbonate reservoirs. *J. Pet. Sci. Eng.* 2016;147:843–850.
33. Olkhovskaya V.A., Peskov A.V., Ermoshkin A.A., Gritchina V.V. Diagnostirovanie sostava solevykh otlozhenij metodami rentgendifraktoметрического i ehnergodispersionnogo mikroanaliza = [Diagnosing of salt sediments composition by methods of x-ray-diffractometric and power-disperse micro-analysis]. *Oilfield Engineering.* 2010;(5):44–52. (In Russ.).
34. Fan M.M., Liu H.F., Dong Z.H. Microbiologically influenced corrosion of X60 carbon steel in CO_2 -saturated oilfield flooding water. *Materials and Corrosion.* 2013;64(3):242–246.
35. Gusakov V.N., Abdrashitova R.N., Kolotygina V.N. Analysis of the formation conditions of halite deposits and the search of reagents for inhibition. *Water: Chemistry and Ecology.* 2024;(1):29–41. (In Russ.).
36. Kashchavtsev V.E., Mishchenko I.T. Salt-formation during oil production. Moscow: Orbita-M; 2004. 433 p. (In Russ.).
37. Awadh S.M., Al-Mimar H.S., Yaseen Z.M. Effect of Water Flooding on Oil Reservoir Permeability: Saturation Index Prediction Model for Giant Oil Reservoirs, Southern Iraq. *Natural Resources Research.* 2021;30:4403–4415.
38. Ivanovskii V.N. Analiz sushchestvuyushchikh metodik prognozirovaniya soleotlozheniya na rabochikh organakh UEHTSN = [Analysis of existing methods for predicting salt deposition on the working

organs of submersible electric centrifugal pumps (UECN)]. *Engineering Practice*. 2009;(Pilot episode):8–11. (In Russ.).

39. Markin A.N., Nizamov R.E., Sukhoverkhov S.V. Production chemistry: guidance manual. Vladivostok: Dal'nauka; 2011. 294 p. (In Russ.).

40. Bahadori A., Zahedi G., Zendejboudi S. Estimation of potential barium sulfate (barite) precipitation in oilfield brines using a simple predictive tool. *Environ. Prog. Sustain*. 2013;32(3):860–865.

41. Verri G., Sorbie K.S., Silva D. A rigorous general work flow for accurate prediction of carbonate and sulphide scaling profiles in oil and gas wells. *J. Pet. Sci. Eng*. 2017;156:673–681.

42. Isaeva G.Yu. Osnovnye problemy otsenki soleotlozheniya pri razrabotke gidrotermal'nykh resursov = [The main problems of salt deposition assessment in the development of hydrothermal resources]. *Proceedings of the Institute of Geology, Dagestan Scientific Center, RAS*. 2009;(55):156–158. (In Russ.).

43. Sitnikov A. V., Sennikova O.V., Zhirnov M.V. et al. Forecasting of scale at mixing of various types of waters in the reservoir pressure maintenance system. *Oil Industry*. 2007;(9):64–65.

44. Salnikova Yu.I. Results of studies on the compatibility of formation and injected water in hydrocarbon fields in Western Siberia. *Advances in Current Natural Sciences*. 2024;(2):44–53. (In Russ.).

45. Peretomode E., Eboibi B., Hart A., Ajie M. Modeling the impact of pH and reservoir temperature on the dissolution of quartz mineral due to oilfield chemical treatment. *Petroleum Science and Technology*. 2024;(October):1–15.

46. Sircar A., Yadav K., Rayavarapu K. et al. Application of machine learning and artificial intelligence in oil and gas industry. *Petroleum Research*. 2021;6(4):379–391.

47. Khasanov I.I., Khasanova Z.R., Shakirov R.A., Nedel'chenko O.I. Overview of the use of neural networks in the field of oil and gas production and transportation. *Transport and Storage of oil Products and Hydrocarbons*. 2022;(3/4):11–15. (In Russ.).

48. Choubey S., Karmakar G.P. Artificial intelligence techniques and their application in oil and gas industry. *Artificial Intelligence Review*. 2021;54(5):3665–3683.

49. Polovova T.A., Sul'dina G.A., Vladimirova S.A., Telkov O.A. Prospects for the use of artificial intelligence technologies in the oil and gas industry. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2023;13(3-1):119–125. (In Russ.).

50. Topol'nikov A.S. Mashinnoe obucheniye dlya mekhanizirovannoi dobychi nefi = [Machine Learning for Artificial Oil Recovery]. *Business Magazine Neftegaz.RU*. 2021;(5):14–19. (In Russ.).

51. Falode O., Udomboso C., Ebere F. Prediction of Oilfield Scale Formation Using Artificial Neural Network (ANN). *Advances in Research*. 2016;7(6):1–13.

52. Chernikov A.D., Eremin N.A., Stolyarov V.E. et al. Application of artificial intelligence methods for identifying and predicting complications in the construction of oil and gas wells: problems and solutions. *Georesources*. 2020;22(3):87–96. (In Russ.).

Обзорная статья

УДК 548.735:541.49:546.791.6-381'131

DOI: 10.31857/S0869769825030158

EDN: POENGQ

Структурная химия комплексных соединений UO_2Cl_2 с нейтральными донорными лигандами (обзор)¹

Р.Л. Давидович

Рувен Лейзерович Давидович

доктор химических наук, главный научный сотрудник, профессор

Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия

davidovich@ich.dvo.ru, ruven.davidovich@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0002-8473-3580>

Аннотация. Систематизированы и обсуждены кристаллические структуры комплексных соединений UO_2Cl_2 с нейтральными лигандами, содержащими донорные атомы O, N, S и C, изученных монокристалльным методом рентгеноструктурного анализа. Определены кристаллохимические особенности строения разнолигандных комплексных соединений $\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_n$ в зависимости от отношения числа атомов Cl к числу донорных атомов O, N, S и C координированных лигандов в соединении. В разнолигандных комплексных соединениях $\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_n$ при отношении $2\text{Cl} : \text{O}$, $2\text{Cl} : 3\text{O}(\text{N})$ и $\text{Cl} : 4\text{O}$ координационный полиэдр шестивалентного атома урана в структуре имеет пентагонально-бипирамидальное строение. Атомы кислорода уранильной группы сосредоточены на вертикальной оси пентагональной бипирамиды, перпендикулярно экваториальной плоскости полиэдра, в которой расположены пять атомов координированных лигандов. При отношении $2\text{Cl} : 2\text{O}$ (N, S, C) в разнолигандных комплексных соединениях $\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_n$ атомы урана образуют тетрагонально-бипирамидальные полиэдры (искаженные октаэдры) с уранильными группами в аксиальных вершинах, атомами хлора и донорными атомами лигандов в экваториальной плоскости. В небольшой группе разнолигандных соединений $\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_n$ с отношением $2\text{Cl} : 4\text{N}$ реализуются гексагонально-бипирамидальные полиэдры атомов U с атомами Cl и N в экваториальной плоскости и нелинейной группой UO_2^{2+} ($\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(2) 161.81(11)–168.3(3)^\circ$).

Ключевые слова: уранил, хлор, кислород, азот, донорный атом, структура, пентагональная бипирамида, тетрагональная бипирамида

Для цитирования: Давидович Р.Л. Структурная химия комплексных соединений UO_2Cl_2 с нейтральными донорными лигандами (обзор) // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 3. С. 170–193.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030158>

¹ В авторской редакции.

© Давидович Р.Л., 2025

Structural chemistry of UO_2Cl_2 complexes with neutral donor ligands (review)

R.L. Davidovich

Ruven L. Davidovich

Doctor of Sciences in Chemistry, Chief Researcher, Professor

Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia

davidovich@ich.dvo.ru, ruven.davidovich@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0002-8473-3580>

Abstract. The crystal structures of UO_2Cl_2 complexes with neutral ligands, containing O, N, S and C donor atoms, studied by single-crystal X-ray diffraction analysis have been systematized and discussed. The crystal chemical features of the structure of mixed-ligand complexes $\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_n$ were determined depending on the ratio of the number of Cl atoms to the number of donor atoms O, N, S and C of coordinated ligands in the compound. In the mixed-ligand complexes $\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_n$ at the ratios $2\text{Cl} : \text{O}$, $2\text{Cl} : 3\text{O}(\text{N})$ and $\text{Cl} : 4\text{O}$, the coordination polyhedron of the hexavalent uranium atom in the structure has a pentagonal-bipyramidal structure. The oxygen atoms of the uranyl group are located on the vertical axis of the pentagonal bipyramid, perpendicular to the equatorial plane of the polyhedron, in which five atoms of coordinated ligands are located. At the ratio $2\text{Cl} : 2\text{O}$ (N, S, C) in mixed-ligand complexes $\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_n$ uranium atoms form tetragonal bipyramidal polyhedra (distorted octahedra) with uranyl groups in the axial vertices, chlorine atoms and donor ligand atoms in the equatorial plane. In a small group of mixed-ligand compounds $\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_n$ with a $2\text{Cl} : 4\text{N}$ ratio, hexagonal-bipyramidal polyhedra of U atoms with Cl and N atoms in the equatorial plane and a nonlinear group UO_2^{2+} ($\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(2) 161.81(11)–168.3(3)^\circ$) was established.

Keywords: uranyl, chlorine, oxygen, nitrogen, donor atom, structure, pentagonal bipyramid, tetragonal bipyramid

For citation: Davidovich R.L. Structural chemistry of UO_2Cl_2 complexes with neutral donor ligands (review). *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(3):170–193. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030158>

Введение

Группа UO_2^{2+} образует с ионом Cl^- два типа комплексных соединений: хлоридные комплексные соединения $\text{M}_2[\text{UO}_2\text{Cl}_4]$, содержащие тетрагонально-бипирамидальные (искаженные октаэдрические) изолированные комплексные анионы $[\text{UO}_2\text{Cl}_4]^{2-}$, и разнолигандные комплексные соединения, в состав которых помимо хлориолигандов входят как нейтральные, так и ацидолиганды, содержащие донорные атомы O, N, S и C.

Среди структурно исследованных разнолигандных хлоридных комплексных соединений уранила наиболее полно представлены кристаллические структуры комплексных соединений, образованных UO_2Cl_2 с нейтральными донорными лигандами, которые рассмотрены и проанализированы в настоящей обзорной статье.

Сначала рассмотрены кристаллические структуры UO_2Cl_2 и его кристаллогидраты. Кристаллические структуры разнолигандных комплексных соединений UO_2Cl_2 с нейтральными лигандами рассмотрены по мере увеличения отношения числа атомов Cl к числу донорных атомов координированных лигандов в соединении.

1. Соединение UO_2Cl_2 и его кристаллогидраты

Хлоридное безводное соединение уранила UO_2Cl_2 с молекулами H_2O образует два типа кристаллогидратов: моногидрат $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ и тригидрат $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.

1.1. $\text{UO}_2\text{Cl}_2, \text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}, \text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

Кристаллическая структура безводного UO_2Cl_2 порошковым дифракционным методом исследована в ряде ранних работ (см. ссылки в [1]). Полученные порошкограммы UO_2Cl_2 и их интерпретация в этих работах значительно отличались. Достоверные данные были получены в [2], в которой порошковым дифракционным методом исследованы кристаллические структуры UO_2Cl_2 , $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ и $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.

Полученные дифракционным методом с использованием $\text{Cu K}\alpha$ -излучения порошкограммы исследованных соединений были индцированы, что позволило определить их симметрию и пространственную группу (далее пр. гр.).

Соединение UO_2Cl_2 кристаллизуется в ромбической системе, пр. гр. $Pnma$ с параметрами: $a = 5,725(1)$, $b = 8,409(2)$, $c = 8,720(2)$ Å, $Z = 4$. Структура $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ моноклинная, пр. гр. $P2_1/m$: $a = 5,836(3)$, $b = 8,563(3)$, $c = 5,566(2)$ Å, $\beta = 97,70(3)^\circ$, $Z = 2$. Кристаллы $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ромбические, пр. гр. $Pnma$: $a = 12,738(5)$, $b = 10,495(5)$, $c = 5,547(2)$ Å, $Z = 4$.

Положение атомов U и Cl в исследованных структурах было определено из порошковых данных трехмерным синтезом Паттерсона, а локализация атомов O определена из геометрических соображений. Установлены мотивы строения исследованных соединений, имеющих пентагонально-бипирамидальное строение с группами UO_2^{2+} , практически перпендикулярными экваториальным плоскостям, в которых расположены 6 донорных атомов лигандов: 4 атома хлора в структурах UO_2Cl_2 и $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ и 2 атома хлора в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Оценены длины связей U–Cl в исследованных соединениях, равные 2,64 Å. В структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ расстояния U–O приняты равными 2,4–2,6 Å. Найденная в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ длина связи U–O 1,95(1) Å является меньше нормального расстояния для такой связи в ~2,5 Å. Исходя из найденного значения для молекулы H_2O в $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, автор [2] заключил, что это соединение не является настоящим гидратом.

1.2. UO_2Cl_2 (нейтронографическое исследование)

В [1] кристаллическая структура UO_2Cl_2 исследована нейтронографическим дифракционным порошковым методом с целью уточнения структуры и позиции атомов, образующих структуру. Найденные из нейтронографической дифракционной порошкограммы параметры элементарной ячейки и пр. гр. UO_2Cl_2 находятся в согласии с данными, полученными в [2] рентгеновским дифракционным методом. Положение атомов U в структуре UO_2Cl_2 , исследованной нейтронографическим методом, соответствует данным рентгеновского метода, а позиции атомов кислорода и хлора по сравнению с соответствующими данными рентгеновского метода отличаются на 0,56 и 0,16 Å соответственно.

По данным нейтронографического исследования координационный полиэдр атома U(VI) в структуре UO_2Cl_2 является пентагональной бипирамидой с уранильными атомами кислорода O(1) и O(2) в апикальных позициях. Экваториальную плоскость бипирамиды образуют четыре атома Cl и атом кислорода. Пентагональные плоскости, деля общее ребро Cl–Cl, образуют цепи, параллельные оси b . Связи в структуре

в направлениях осей a и c достигаются посредством обобществления атома O(1) между соседними полиэдрами. Атом O(1) выполняет двойную роль, являясь апикальным атомом кислорода в одной пентагональной бипирамиде и экваториальным атомом кислорода в соседней бипирамиде.

В незначительно отличающейся от 180° группе UO_2^{2+} ($\angle \text{O}(1)=\text{U}(1)=\text{O}(2)$ $178,8(8)^\circ$) длины связей $\text{U}=\text{O}$ равны $1,78(2)$ и $1,73(1)$ Å. Более длинное расстояние атома U с атомом O(1) обусловлено двойной ролью атома O(1). В экваториальной плоскости координационного полиэдра структуры UO_2Cl_2 расстояния $\text{U}-\text{Cl}$ составляют $2,73(1)\times 2$, $2,75(2)\times 2$ Å, а длина связи $\text{U}-\text{O}(1)$ равна $2,52(2)$ Å. Углы в экваториальной плоскости полиэдра ($71,9(2)-72,4(2)^\circ$) близки к 72° – идеальному углу пятиугольника, а углы $\text{O}-\text{U}-\text{Cl}$ близки к 90° . Кристаллическая структура UO_2Cl_2 существенно отличается от структуры UO_2F_2 [3], что обусловлено различием в размере атомов Cl и F.

1.3. $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (нейтронографическое исследование)

В разделе 1.1. настоящего сообщения отмечалось, что в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, исследованной рентгеновским дифракционным порошковым методом, длина связи $\text{U}-\text{O}(\text{H}_2\text{O})$ равна $1,95(1)$ Å, что меньше нормального расстояния для такой связи в $\sim 2,5$ Å.

С целью устранения указанной неопределенности и уточнения кристаллическая структура $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ была повторно исследована нейтронографическим дифракционным порошковым методом [4]. Все линии на полученной нейтронодифракционной порошковой диаграмме $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ могут быть объяснены на основе элементарной ячейки соединения, полученной рентгеновским дифракционным порошковым методом [2], и пространственных групп $P2_1/m$ или $P2_1$.

При уточнении методом наименьших квадратов позиции 15 линий на нейтронной порошковой диаграмме $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ были получены следующие параметры элементарной ячейки соединения: $a = 5,828(2)$, $b = 8,534(2)$, $c = 5,557(2)$ Å, $\beta = 97,75^\circ$, $Z = 2$.

Координационным полиэдром атома U в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ является пентагональная бипирамида. Координированный двумя атомами кислорода в аксиальных позициях пентагональной бипирамиды атом U образует группу UO_2^{2+} , практически перпендикулярную экваториальной плоскости полиэдра, в которой расположены четыре атома Cl и атом кислорода O(3) координированной молекулы H_2O . Соединяясь ребрами $\text{Cl}-\text{Cl}$ экваториальных плоскостей, полиэдры атомов U образуют бесконечные цепи, сходные с бесконечными бипирамидальными цепями в структуре UO_2Cl_2 , исследованной нейтронографически [1].

В координационном полиэдре атома U группа UO_2^{2+} практически линейна ($\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(2)$ $179(2)^\circ$). Длины связей $\text{U}=\text{O}(1)$ и $\text{U}=\text{O}(2)$ равны $1,70(3)$, $1,74(3)$ Å, в отличие от соответствующих длин связей $\text{U}=\text{O}$ ($1,78(2)$, $1,73(1)$ Å) в структуре UO_2Cl_2 , в которой атом O(1) является одновременно атомом кислорода уранильной группы и атомом кислорода экваториальной плоскости соседнего полиэдра. Длины мостиковых связей $\text{U}-\text{Cl}$ ($2,75(2)\times 2$, $2,80(2)\times 2$ Å) практически такие же, как соответствующие длины мостиковых связей $\text{U}-\text{Cl}$ ($2,73(1)\times 2$, $2,75(2)\times 2$ Å) в структуре UO_2Cl_2 . Атом кислорода O(3) координированной молекулы H_2O отстоит от атома U на расстояние $2,46(3)$ Å, что находится в согласии с предположенными длинами связей $\text{U}-\text{H}_2\text{O}$ в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ($2,4-2,6$ Å) [2].

В структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ координированная молекула H_2O разупорядоченна поровну между двумя положениями разупорядоченности. Одна в зеркальной плоскости, с половинными атомами водорода H(1) и H(2), образующими слабые водородные связи с атомами кислорода O(1) и O(2) уранильной группы ($\text{O}(3)\cdots\text{O}(1)$

3,00(6) Å, $\angle$ O(3)–H(1)···O(1) 171(6)° и O(3)···O(2) 2,87(5) Å, $\angle$ O(3)–H(2)···O(2) 174(8)°, и вторая в плоскости, нормальной к зеркальной плоскости с половинными атомами водорода H(3) и H(3)', образующими слабые водородные связи с атомами хлора O(3)···Cl 3,32(3) Å, $\angle$ O(3)–H(3)···Cl 161(6)°.

2. Соединения с отношением 2Cl : 3O

Исследованы кристаллические структуры ряда комплексных соединений UO_2Cl_2 с O-донорными лигандами, в которых отношение числа атомов Cl к числу атомов O равно 2Cl : 3O.

2.1. $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3]$

Соединение $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3$ было получено по реакции между избытком ClSiMe_3 и $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot x(\text{H}_2\text{O})$ в тетрагидрофуране (THF). Кристаллическая структура $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3$ принадлежит к моноклинной сингонии, пр. гр. $P2_1/c$ с параметрами элементарной ячейки: $a = 6,8225(4)$, $b = 16,791(1)$, $c = 15,6088(9)$ Å, $\beta = 92,893(1)^\circ$, $Z = 4$ [5]. Структура $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3$ образована мономерными комплексами (рис. 1). Атом урана в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3$ координирован в пентагонально-бипирамидальной конфигурации с двумя аксиальными атомами кислорода, тремя лигандами THF и двумя несмежными атомами Cl ($\angle$ Cl(2)–U(1)–Cl(1) 143,06(8)°), образующими экваториальную плоскость полиэдра (см. рис. 1).

В структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3$ уранильная группа несколько отличается от линейной, угол O(1)=U=O(2) равен 176,2(3)°. Расстояния U=O(1) и U=O(2) одинаковые и равны 1,766(6), 1,765(6) Å соответственно. Близкие значения имеют длины связей U–Cl (2,687(2), 2,698(2) Å) и U–O_{THF} (2,443(6), 2,464(5), 2,467(6) Å) в экваториальной плоскости координационного полиэдра. Расстояния U–Cl в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3$ несколько меньше соответствующих расстояний U–Cl в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, что обусловлено участием атомов Cl в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ в мостиковых связях, а длины связей U–O_{THF} практически такие же, как длина связи U–O с атомом O координированной молекулы H_2O [4].

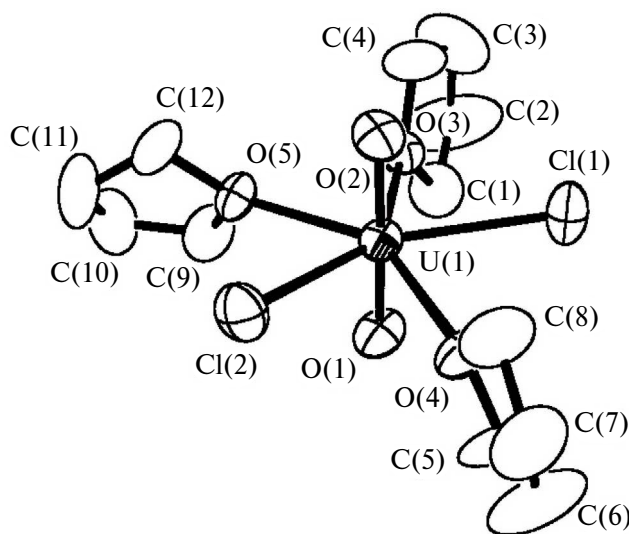


Рис. 1. Строение молекулярного комплекса $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3]$ в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3$ [5]

Одна из молекул тетрагидрофурана, координированная атомом U в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3$, лабильна. Элементный анализ кристаллов $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3$, высушенных либо в инертной атмосфере в боксе, либо в вакууме, указывает на присутствие в соединении только двух молекул THF, приходящихся на хлорид уранила.

2.2. $[\text{UO}_2(\text{Hgly})_2\text{Cl}_2]$

Исследование взаимодействия иона уранила с биологическими лигандами имеет значение для понимания роли миграции радионуклидов в биосфере и разработки новых, эффективных фармацевтических препаратов для удаления радиотоксичных элементов из организма человека. Синтез и кристаллическая структура комплексного соединения хлорида уранила с биологически активным лигандом – глицином состава $[\text{UO}_2(\text{Hgly})_2\text{Cl}_2]$ описаны в работе [6].

Соединение $[\text{UO}_2(\text{Hgly})_2\text{Cl}_2]$ синтезировано взаимодействием в растворе метанола дигидрата ацетата уранила, глицина, гидроксилamina и NaOH с последующим упариванием раствора. Кристаллическая структура $[\text{UO}_2(\text{Hgly})_2\text{Cl}_2]$ моноклинная, пр. гр. $P2_1/c$: $a = 6,231(3)$, $b = 15,584(7)$, $c = 11,605(5)$ Å, $\beta = 103,25(1)^\circ$, $Z = 4$. В структуре $[\text{UO}_2(\text{Hgly})_2\text{Cl}_2]$ атом U имеет искаженную пентагонально-бипирамидальную координацию (рис. 2). Расположенные в аксиальных вершинах бипирамиды атомы кислорода вместе с атомом урана образуют группу UO_2^{2+} , которая перпендикулярна экваториальной плоскости полиэдра. Три координированных атома O от бидентатной и монодентатной карбоксилатных групп двух лигандов глицина и два атома Cl формируют экваториальную плоскость. Молекулы глицина находятся в цвиттер-ионной форме, что обеспечивает нейтральность исследованного комплекса.

В полиэдре атома U группа UO_2^{2+} незначительно отличается от линейности ($\angle \text{O}(5)=\text{U}=\text{O}(6)$ $176.8(2)^\circ$), длины связей $\text{U}=\text{O}$ одинаковые и равны $1,771(5)$ и $1,777(5)$ Å. Два атома Cl в экваториальной плоскости полиэдра расположены в диспозиции по отношению друг к другу с углом связи $\text{Cl}(2)-\text{U}-\text{Cl}(1)$ $82,56(6)^\circ$ и длинами связей $\text{U}-\text{Cl}$ $2,6866(18)$, $2,6942(19)$ Å, которые по величине такие же, как соответствующие длины связей $\text{U}-\text{Cl}$ в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3$ [5]. Расстояния от атома U до координированных атомов O молекул глицина в экваториальной плоскости полиэдра составляют $2,337(5)$, $2,487(5)$ и $2,516(5)$ Å.

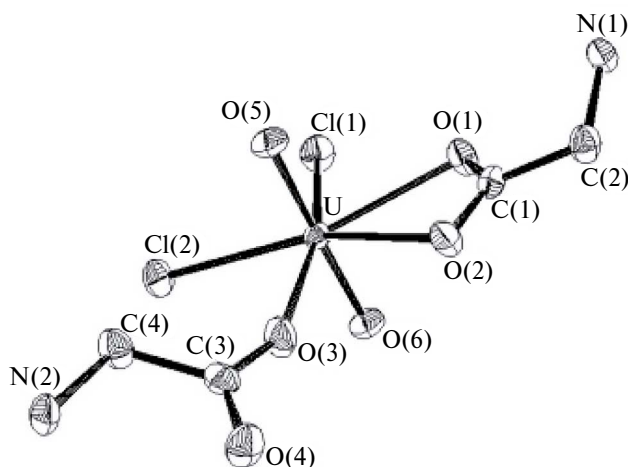


Рис. 2. Строение молекулярного комплекса $[\text{UO}_2(\text{Hgly})_2\text{Cl}_2]$ в структуре $\text{UO}_2(\text{Hgly})_2\text{Cl}_2$ [6]

Наименьшее расстояние U—O в экваториальной плоскости полиэдра (2,337(5) Å) соответствует длине связи атома U с карбоксилатным атомом O(3) монодентатно координированной карбоксилатной группы лиганда.

Длины связей C(1)—O(1) и C(1)—O(2) в карбоксилатной группе лиганда глицина C(1)O(1)O(2), координированной бидентатно к атому U, равны 1,258(8) и 1,247(9) Å, а длины связей C(3)—O(3) и C(3)—O(4) в карбоксилатной группе лиганда C(3)O(3)O(4), координированной монодентатно к атому U, составляют 1,274(8) и 1,228(8) Å. В работе [6] исследованы также ИК и ЯМР спектры синтезированного соединения $[\text{UO}_2(\text{Hgly})_2\text{Cl}_2]$.

2.3. $[\text{UO}_2\text{Cl}_2\{(\text{CH}_3)_3\text{CNHCHO}\}_3]$

Соединение $[\text{UO}_2\text{Cl}_2\{(\text{CH}_3)_3\text{CNHCHO}\}_3]$ получено упариванием раствора UCl_4 -*N*-tert-бутилформамида в течение нескольких дней. Структура $[\text{UO}_2\text{Cl}_2\{(\text{CH}_3)_3\text{CNHCHO}\}_3]$ молекулярного типа. Соединение $[\text{UO}_2\text{Cl}_2\{(\text{CH}_3)_3\text{CNHCHO}\}_3]$ кристаллизуется в ромбической сингонии, пр. гр. *Pbca* с параметрами: $a = 12,793(3)$, $b = 18,306(6)$, $c = 21,275(5)$ Å, $Z = 8$ [7]. Атом U имеет пентагонально-бипирамидальную геометрию с почти линейной ($\angle \text{O}(1-1)=\text{U}=\text{O}(1-2)$ 176,9(6)°) уранильной группой, в которой длины связей U=O одинаковые, составляющие 1,77(1), 1,77(2) Å. Экваториальная плоскость полиэдра не совсем планарная. Она образована двумя атомами Cl с длинами связи 2,719(6) и 2,779(5) Å и углом связи Cl(1)—U—Cl(2) 147,4(2)° и тремя атомами O трех координированных лигандов *N*-tert-бутилформамида с длинами связей U—O 2,44(1), 2,39(1) и 2,38(1) Å. В координированных лигандах *N*-tert-бутилформамида длины связей C(10)—O(1) составляют 1,28(3), 1,23(3), 1,27(3) Å.

2.4. $\text{UO}_2(\text{Cl})_2(\text{H}_2\text{O})(\mu_2-(\text{CH}_3)_3\text{NCH}_2\text{COO})$

В работе [8] синтезированы и структурно исследованы шесть координационных соединений уранила с бетаином. В четырех из них содержатся атомы Cl в различном отношении к группе UO_2^{2+} , и лишь одно из них является комплексным соединением UO_2Cl_2 .

Соединение $\text{UO}_2(\text{Cl})_2(\text{H}_2\text{O})(\mu_2-(\text{CH}_3)_3\text{NCH}_2\text{COO})$ было получено добавлением $\text{UO}_2(\text{CF}_3\text{SO}_3)_2$ в пробирку, содержащую H_2SO_4 , гидрохлорид бетаина и LiCl, растворенные в H_2O . Кристаллы $\text{UO}_2(\text{Cl})_2(\text{H}_2\text{O})(\mu_2-(\text{CH}_3)_3\text{NCH}_2\text{COO})$ моноклинные, пр. гр. $P2_1/c$: $a = 9,5606(10)$, $b = 10,8792(12)$, $c = 11,6750(12)$ Å, $\beta = 113,3720(10)^\circ$, $Z = 4$.

Кристаллическая структура $\text{UO}_2(\text{Cl})_2(\text{H}_2\text{O})(\mu_2-(\text{CH}_3)_3\text{NCH}_2\text{COO})$ образована пентагональными бипирамидами уранила, связанными мостиково посредством карбоксильных групп μ_2 -[Bet] цвиттер-ионов с образованием одномерных бесконечных цепей.

Расстояния U=O в уранильной группе соединения, несколько отличающейся от линейной ($\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(3)$ 177,81(8)°), составляют 1,7661(16), 1,7710(14) Å. Длины мостиковых связей U—O в экваториальной плоскости бипирамид с атомами кислорода карбоксильных групп μ_2 -[Bet] равны 2,3723(16), 2,4360(16) Å. Атом кислорода координированной атомом U молекулы H_2O удален от атома U на расстояние 2,4861(17) Å. Длины связей U—Cl в структуре $\text{UO}_2(\text{Cl})_2(\text{H}_2\text{O})(\mu_2-(\text{CH}_3)_3\text{NCH}_2\text{COO})$ (2,7294(7), 2,7477(6) Å) имеют примерно такие же значения, как соответствующие длины связей в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2\{(\text{CH}_3)_3\text{CNHCHO}\}_3]$ [7], рассмотренной в разделе 2.3.

В мостиковых карбоксилатных группах C(1)O(4)O(5) длины связей C(1)—O(4) и C(1)—O(5) равны соответственно 1,255(2) и 1,249(2) Å. Расстояние между атомами U—U в бесконечной цепи составляет 5,482 Å.

3. Соединения с отношением $2\text{Cl}:2\text{A}(\text{A} = \text{O}, \text{N}, \text{C}, \text{S})$

В ряду структурно исследованных комплексных соединений UO_2Cl_2 с нейтральными донорными лигандами наиболее полно исследованы кристаллические структуры соединений с отношением $2\text{Cl}:2\text{A}$. В этой группе комплексных соединений реализуется тетрагональная бипирамидальная (искаженная октаэдрическая) координация атома $\text{U}(\text{VI})$ с транс- или цис-положением координированных лигандов, содержащих донорные атомы O , N , C , S в экваториальной плоскости полиэдра.

3.1. Соединения с отношением $2\text{Cl}:2\text{O}$

3.1.1. β -*trans*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{PPh}_3\text{O})_2]$

Структура β -*trans*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{PPh}_3\text{O})_2]$ молекулярного типа, образованная дискретными молекулами β -*trans*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{PPh}_3\text{O})_2]$. Соединение β -*trans*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{PPh}_3\text{O})_2]$ кристаллизуется в триклинной сингонии, пр. гр. $P-1$ с параметрами $a = 10,0101(6)$, $b = 10,2589(9)$, $c = 9,2347(8)$ Å, $\alpha = 110,093(6)^\circ$, $\beta = 92,129(6)^\circ$, $\gamma = 78,384(6)^\circ$, $Z = 1$ [9].

Координационный полиэдр атома U в структуре β -*trans*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{PPh}_3\text{O})_2]$ имеет квадратно-бипирамидальное (искаженное октаэдрическое) строение с аксиальной линейной уранильной группой UO_2^{2+} , перпендикулярной экваториальной плоскости. Атом U , лежащий в кристаллографическом центре инверсии, шестикординирован лигандами в транспозициях. Длины связей $\text{U}=\text{O}$ в линейной уранильной группе ($\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(1') 180,0(0)^\circ$), равны $1,764(9) \times 2$ Å. Расстояния $\text{U}-\text{Cl}$ с трансрасположенными Cl -лигандами составляют $2,645(5) \times 2$ Å. Длины связей атома U с трансатомами O значительно меньше длин связей $\text{U}-\text{Cl}$ и составляют $2,300(8) \times 2$ Å. В трифенилфосфиноксидных лигандах длины связей $\text{P}-\text{O}(2)$ равны $1,518(8) \times 2$ Å, а расстояния $\text{P}-\text{C}$ составляют $(1,78-1,79) \times 2$ Å. В соединении β -*trans*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{PPh}_3\text{O})_2]$ содержатся короткие межмолекулярные фенил-фенил расстояния ($\text{C}\cdots\text{C}$ 3,50 Å) между соседними комплексами, стабилизирующие структуру.

3.1.2. α -*cis*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{tppo})_2$, β -*trans*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{tppo})_2$

Кристаллическая структура β -*trans*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{PPh}_3\text{O})_2]$, исследованная в [9] в триклинной пространственной группе, обозначена в [10] как α -*trans*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{tppo})_2]$. Авторами [9] не установлено существования *cis*-модификации $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{PPh}_3\text{O})_2]$. В работе [10] приведены результаты структурного исследования *cis*-формы $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{tppo})_2$ и новой *trans*-формы, обозначенной β -*trans*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{tppo})_2$, в которой молекулярные комплексы иначе упакованы в структуре, чем молекулы в структуре β -*trans*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{PPh}_3\text{O})_2]$.

Кристаллы *cis*- и *trans*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{tppo})_2$ получены отдельно в качестве промежуточных продуктов из реакции Me_3SiCl с продуктом взаимодействия UF_5 с tppo в ацетонитриле.

Кристаллическая структура *cis*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{tppo})_2$ моноклинная, пр. гр. $C2/c$: $a = 17,233(3)$, $b = 12,112(2)$, $c = 17,085(4)$ Å, $\beta = 105,90(2)^\circ$, $Z = 4$. Соединение *trans*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{tppo})_2$ также кристаллизуется в моноклинной сингонии, но в пр. гр. $B2_1$ с параметрами: $a = 10,158(11)$, $b = 18,849(17)$, $c = 19,139(14)$ Å, $\beta = 90,4(1)^\circ$, $Z = 4$. В обеих структурах атомы U , имеющие слегка искаженное октаэдрическое строение, окружены двумя уранильными атомами O , двумя атомами Cl и двумя атомами O группы tppo соответственно в молекулах *cis*- и *trans*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{tppo})_2$.

В почти линейных уранильных группах $\angle O(1)=U=O(1B)$ ($178,4(2)^\circ$) и $\angle O(1)=U=O(2)$ ($178,6(6)^\circ$) в *cis*- и *trans*- $UO_2Cl_2(tppo)_2$ длины связей $U=O$ равны $1,771(4)\times 2$ и $1,753(12)$, $1,767(12)$ Å соответственно. В экваториальной плоскости полиэдров расстояния $U-Cl$ равны $2,641(2)\times 2$ и $2,673(4)$, $2,657(4)$ Å для *cis*- и *trans*-форм, а координированные атомы O лигандов *tppo* отстоят от атомов U на расстояние $2,340(4)\times 2$ и $2,306(12)$, $2,339(12)$ Å.

Искажения экваториальных плоскостей полиэдров от октаэдрической больше в *cis*-форме благодаря отталкиванию атомов Cl друг от друга, образуя углы $Cl-U-Cl$ $95,1(1)^\circ$ и $(P)O-U-O(P)$ $84,7(1)^\circ$. В *trans*-форме максимальному отклонению экваториальной плоскости от октаэдрической соответствует угол $O(3)-U-Cl(1)$ в $93,9^\circ$.

Кристаллическая структура β -*trans*- $UO_2Cl_2(tppo)_2$ является менее упакованной структурой, чем β -*trans*- $[UO_2Cl_2(PPh_3O)_2]$. Упаковка молекул в структуре β -*trans*- $UO_2Cl_2(tppo)_2$ такова, что атомы P расположены в той же плоскости, что атомы Cl и O группы *tppo*, в то время как в структуре β -*trans*- $[UO_2Cl_2(PPh_3O)_2]$ атомы P расположены в противоположной плоскости. Угол у мостикового атома O ($\angle U-O-P$) трифенилфосфиноксидного лиганда наименьший ($144,5(2)^\circ$) в *cis*-форме, вероятно, из-за стерических препятствий между соседними объемистыми лигандами. Найденные соответствующие значения углов $U-O-P$ в *trans*-форме $UO_2Cl_2(tppo)_2$ ($151,7(8)$, $166,2(8)^\circ$) предположительно являются различными из-за ограничений по упаковке.

3.1.3. $[UO_2Cl_2L_2](L=i-PrC(O)N(i-Pr)_2)$

В работе [11] синтезирована группа комплексных соединений UO_2Cl_2 с алифатическими *N,N*-диалкиламидными нейтральными донорными лигандами ($R'C(O)NR_2$), где $R' = i-Pr$ и $R_2 = i-Pr$, *i*-Bu, *s*-Bu. Кристаллическая структура определена лишь для $[UO_2Cl_2L_2]$ ($L = i-PrC(O)N(i-Pr)_2$) [11].

Соединение $[UO_2Cl_2L_2]$ было получено взаимодействием $UO_2Cl_2 \cdot nH_2O$ с *N,N*-диизопропилизобутирамидом в растворе метанола. Кристаллическая структура $[UO_2Cl_2L_2]$ моноклинная, пр. гр. $P2_1/c$: $a = 8,5267(4)$, $b = 11,3761(5)$, $c = 13,8153(6)$ Å, $\beta = 96,7450(10)^\circ$, $Z = 2$. Координационным полиэдром атома U в структуре $[UO_2Cl_2L_2]$ является слегка искаженный октаэдр. Расположенный в центре инверсии структуры атом U определяет угол в 180° для всех транслигандов, содержащих трансатомы O, трансдонорные атомы Cl, и карбонильных атомов O, принадлежащих трансамидным лигандам.

В линейной уранильной группе ($\angle O(2)=U=O(2)$ $180,00(12)^\circ$) длины связей $U=O(2)$ равны $1,770(2)\times 2$ Å. Расстояния от атома U до трансатомов Cl в экваториальной плоскости полиэдра, равные $2,6468(8)\times 2$ Å, сравнимы с длинами связей $U-Cl$ в структурах β -*trans*- $[UO_2Cl_2(PPh_3O)_2]$ ($2,645(5)\times 2$ Å) и α -*cis*- $UO_2Cl_2(tppo)_2$ ($2,645(5)\times 2$ Å) (см. разделы 3.1.1, 3.1.2). Трансрасположенные в экваториальной плоскости структуры атомы O *N,N*-диалкиламидных лигандов удалены от атома U на расстояния $2,3151(18)\times 2$ Å. Эти расстояния близки по величине ($2,300(8)\times 2$ Å) к длинам $U-O$ связей в структуре β -*trans*- $[UO_2Cl_2(PPh_3O)_2]$ (см. раздел 3.1.1), в которой лиганд сильно координирован атомом U. В структуре $[UO_2Cl_2L_2]$ длины амидных связей $C(1)-O(1)$ и углов связей $U-O(1)-C(1)$ равны соответственно $1,270(3)\times 2$ Å и $160,83(18)^\circ$.

3.1.4. $[UO_2Cl_2(L_3)_2](L_3=(CH_2)_5NCON(i-Pr)_2)$

Лиганды на основе пиперидина состава $(CH_2)_5NCONR_2$ ($R = CH_3(L_1)$, $C_2H_5(L_2)$, *i*- $C_3H_7(L_3)$) были получены и охарактеризованы в работе [12]. С полученными лигандами были синтезированы 11 комплексных соединений с UO_2Cl_2 ,

UO_2Br_2 , $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и $\text{UO}_2(\text{TТА})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, которые исследованы методами ИК и ЯМР спектроскопии. Кристаллические структуры определены для четырех соединений, в том числе и для $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{L3})_2]$ ($\text{L3} = (\text{CH}_2)_5\text{NCON}(i\text{-Pr})_2$). Соединение $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{L3})_2]$ синтезировано взаимодействием $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ с лигандом L3 в растворе метанола.

Структура $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{L3})_2]$ ромбическая, пр. гр. $Pbca$: $a = 15,2149(6)$, $b = 12,2538(6)$, $c = 16,9457(8)$ Å, $Z = 4$ (рис. 3) [12]. Атом U(VI) , расположенный в центре симметрии структуры, окружен четырьмя атомами O и двумя атомами Cl в слегка искаженной октаэдрической геометрии. Строение координационного полиэдра в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{L3})_2]$ сходно с октаэдрической геометрией координационных полиэдров в структурах $[\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_2]$ ($\text{L} = i\text{-PrC}(\text{O})\text{N}(i\text{-Pr})_2$) [11] и $\beta\text{-trans-}[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{PPh}_3\text{O})_2]$ [9].

Атомы O , занимающие транспозиции в полиэдре, вместе с атомом U образуют линейную группу UO_2^{2+} ($\angle \text{O}(2)=\text{U}=\text{O}(2)$ 180.0°) с длинами связей $\text{U}=\text{O}(2)$, равными $1,739(8) \times 2$ Å. Два атома O двух пиперидин карбоксамидных лигандов вместе с двумя атомами Cl образуют квадратную экваториальную плоскость полиэдра.

Расстояния $\text{U}-\text{O}_{(\text{ам})}$ ($2,322(10) \times 2$ Å) в экваториальной плоскости полиэдра структуры практически сравнимы с соответствующими длинами связей $\text{U}-\text{O}$ ($2,3151(18) \times 2$ Å) в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_2]$ [11], а длины связей $\text{U}-\text{Cl}$ ($2,683(5) \times 2$ Å) в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{L3})_2]$ несколько больше соответствующих длин связей в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_2]$. Длины связей $\text{C}(1)-\text{O}(2)$ в структурах $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{L3})_2]$ и $[\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_2]$ [12] практически, равны $1,262(16) \times 2$ и $1,270(3) \times 2$ Å. Близкие значения в сравниваемых структурах имеют и углы связей $\text{U}-\text{O}(2)-\text{C}(1)$ и $\text{U}-\text{O}(1)-\text{C}(1) - 154,9(11) \times 2$ и $160,83(18) \times 2^\circ$.

3.1.5. $\text{UO}_2\text{Cl}_2(2\text{L}_1)(\text{L}_1 = \text{Et}_2\text{-}i\text{-Bu}_2\text{N}_2\text{CO})$

Работа [13] посвящена синтезу экстрагента тетраалкилмочевины, проявляющего высокую селективность по урану в присутствии мешающих ионов тория и других лантаноидов из азотнокислой среды, и применению соединения в качестве

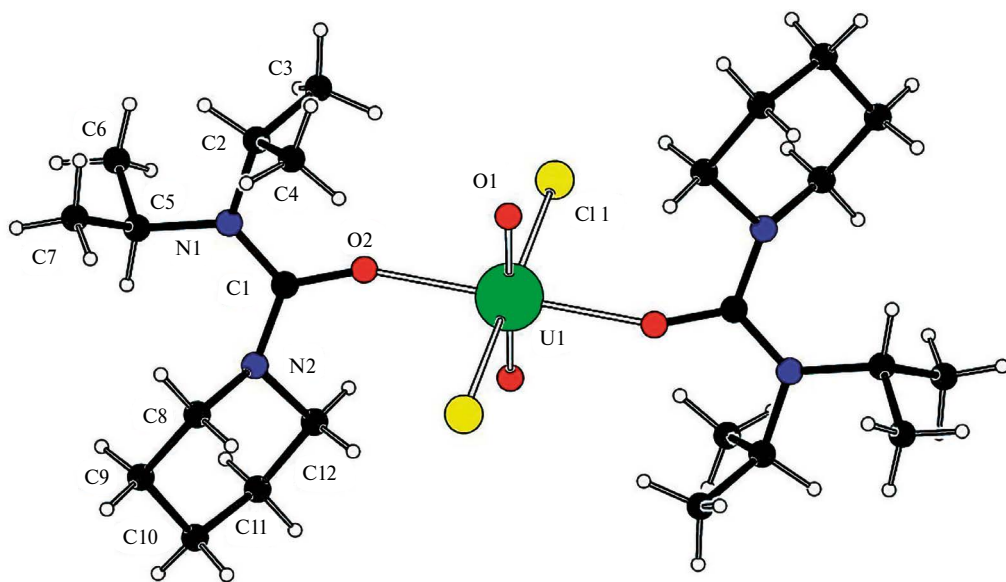


Рис. 3. Строение молекулярного комплекса $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{L3})_2]$ ($\text{L3} = (\text{CH}_2)_5\text{NCON}(i\text{-Pr})_2$) в структуре $\{\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{N}_2\text{O}_2)_2\}$ [10]

лиганда для получения комплексных соединений с хлоридом, бромидом и нитратом уранила, исследованию их кристаллической структуры и свойств.

Синтез лиганда *N,N*-диэтил-*N',N'*-диизобутилмочевины, обозначенного L1, проводили путем добавления к диизобутиламину и триэтиламину в растворе бензола эквимольного количества растворенного в бензоле *N,N*-диэтилкарбамоил хлорида с последующим испарением полученного раствора.

Комплексное соединение $\text{UO}_2\text{Cl}_2(2\text{L}_1)$ получено добавлением двух эквивалентов лиганда *N,N*-диэтил-*N',N'*-диизобутилмочевины (L1) к $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ в растворе метанола. Аналогичным образом получены комплексные соединения с бромидом и нитратом уранила.

Кристаллическая структура $\text{UO}_2\text{Cl}_2(2\text{L}_1)$ моноклинная, пр. гр. $P2_1/n$: $a = 9,1746(2)$, $b = 14,7815(3)$, $c = 13,3902(3)$ Å, $\beta = 98,738(2)^\circ$, $Z = 2$. Расположенный в центре инверсии структуры атом U искаженно октаэдрически окружен четырьмя атомами O и двумя Cl-лигандами. Два атома O, расположенные в апикальных вершинах полиэдра, принадлежат линейной группе UO_2^{2+} ($\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(1)$ $180,0(2)^\circ$) с длинами связей $\text{U}=\text{O}(1)$ $1,762(6) \times 2$ Å. Амидные атомы кислорода ($\text{O}_{(\text{ам})}$) двух лигандов L1 и два атома Cl образуют квадратную экваториальную плоскость координационного полиэдра. В исследованной структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2(2\text{L}_1)$ расстояния U–Cl в экваториальной плоскости полиэдра ($2,663(3) \times 2$ Å) несколько больше, а длины связей U–O ($2,264(6) \times 2$ Å) существенно меньше соответствующих длин связей U–Cl ($2,6468(8) \times 2$ Å) и U–O ($2,3151(18) \times 2$ Å) в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_2]$, указывая, что группа UO_2^{2+} в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2(2\text{L}_1)$ образует с лигандами *N,N*-диэтил-*N',N'*-диизобутилмочевины (L1) более сильные связи по сравнению с донорными лигандами (*i*-PrC(O)N(*i*-Pr)₂) в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_2]$, имеющей сходный структурный мотив [11] (см. раздел 3.1.3).

Длины амидных связей C(1)–O(2) $1,285(9) \times 2$ Å и углов связей U–O(2)–C(1) $167,7(6)^\circ$ в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2(2\text{L}_1)$ имеют характерные значения для кристаллических структур, содержащих амидные лиганды.

3.1.6. $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HMPA})_2]$

Исследование кристаллической структуры $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HMPA})_2]$ (HMPA = $(\text{CH}_3)_6\text{N}_3\text{PO}$, гексаметилфосфорамид) было предпринято в работе [14]. Соединение $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HMPA})_2]$ получено по реакции $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и UMPA в растворе ацетона с последующей перекристаллизацией осадка из смеси дихлорметана и эфира.

Кристаллическая структура $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HMPA})_2]$ тетрагональная, пр. гр. $P4_12_12$: $a = 10,430(5)$, $b = 10,430(5)$, $c = 23,82(1)$ Å, $Z = 4$. Шестикоординированный атом U(VI) образует слегка искаженный октаэдрический координационный полиэдр с трансрасположенными HMPA лигандами. Группа UO_2^{2+} практически линейна ($\angle \text{O}(1a)=\text{U}=\text{O}(1)$ $179,13(1)^\circ$) с длинами связей $\text{U}=\text{O}(1)$ $1,753(8) \times 2$ Å и расположена перпендикулярно экваториальной плоскости, образованной трансрасположенными двумя атомами Cl и двумя атомами O.

Расстояния U–Cl ($2,653(5)$, $2,663(5)$ Å) и U–O $2,272(9) \times 2$ Å в экваториальной плоскости структуры $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HMPA})_2]$ сравнимы с соответствующими длинами связей U–Cl $2,615(6) \times 4$ Å и U–O $2,31(1) \times 2$ Å в структуре $[\text{UCl}_4(\text{HMPA})_2]$ [11].

Одной из примечательных особенностей структуры $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HMPA})_2]$ является почти линейное расположение связей U–O–P ($178,43(1)^\circ$). В структуре $[\text{UCl}_4(\text{HMPA})_2]$ угол связи U–O–P равен $163,1(6)^\circ$ [15]. Хотя в структурах $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HMPA})_2]$ и $[\text{UCl}_4(\text{HMPA})_2]$ углы связей U–O–P различные, длина P–O связи одинаковая и составляет $1,50(1)$ Å. В структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HMPA})_2]$ отсутствуют межмолекулярные контакты менее $3,5$ Å.

3.1.7. $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \left\{ \text{OP} \left[\text{N}(\text{CH}_3)_2 \right]_3 \right\}_2 \left(\left[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HMPA})_2 \right] \right)$

Кристаллическая структура соединения $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HMPA})_2]$, обозначенного в [16] $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \left\{ \text{OP} \left[\text{N}(\text{CH}_3)_2 \right]_3 \right\}_2$, исследована независимо и опубликована практически одновременно со структурой $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HMPA})_2]$ [14, 16]. Соединение $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \left\{ \text{OP} \left[\text{N}(\text{CH}_3)_2 \right]_3 \right\}_2$ получено взаимодействием НМРА и хлорида уранила в водном растворе. Кристаллографические характеристики $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \left\{ \text{OP} \left[\text{N}(\text{CH}_3)_2 \right]_3 \right\}_2$ – тетрагональная сингония, пр. гр. $P4_22$: $a = 10,402(5)$, $b = 10,402(5)$, $c = 23,73(1)$ Å, $Z = 4$ – почти такие же, как в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HMPA})_2]$ [14] (см. раздел 3.1.6). Практически одинаковые значения имеют длины связей $\text{U}=\text{O}$ $(1,76(1) \times 2$ и $1,753(8) \times 2$ Å) и углы связей $\angle \text{O}(1a)=\text{U}=\text{O}(1)$ $180(1)$ и $179,13(1)^\circ$ в структурах $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \left\{ \text{OP} \left[\text{N}(\text{CH}_3)_2 \right]_3 \right\}_2$ и $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HMPA})_2]$.

В экваториальных плоскостях координационных полиэдров кристаллических структур $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \left\{ \text{OP} \left[\text{N}(\text{CH}_3)_2 \right]_3 \right\}_2$ и $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HMPA})_2]$ длины связей $\text{U}-\text{Cl}$ одинаковые – $2,661(5)$, $2,672(5)$ Å и $2,653(5)$, $2,663(5)$ Å, а длины связей $\text{U}-\text{O}$ значительно различаются и составляют $2,30(1) \times 2$ и $2,272(9) \times 2$ Å. Близкие значения имеют длины связей $\text{P}-\text{O}(2)$ $1,4965(7) \times 2$, $1,5058(7) \times 2$ Å и углы связей $\text{U}-\text{O}(2)-\text{P}$ $177,65(1)$ и $178,43^\circ \times 2$ в сравниваемых структурах.

3.1.8. $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PO})_2 \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$

Соединение *trans*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PO})_2 \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$ получено и структурно исследовано в работе [17] наряду с *cis*- и *trans*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2 \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$ с целью выявления причин предпочтения связи $\text{U}-\text{HN}=\text{PR}_3$ в комплексных соединениях по сравнению со связью $\text{U}-\text{O}=\text{PR}_3$. Комплекс $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PO})_2 \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$ получен добавлением двух эквивалентов Cy_3PO к $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3$ в THF.

Кристаллическая структура $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PO})_2 \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$ моноклинная, пр. гр. $C2/c$: $a = 43,387(7)$, $b = 8,839(1)$, $c = 25,714(4)$ Å, $\beta = 104,301(3)^\circ$, $Z = 10$. Структура $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PO})_2 \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$ во многом аналогична структуре фенильного аналога β -*trans*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{PPh}_3\text{O})_2]$ [9] (см. раздел 3.1.1) с сопоставимыми $\text{U}-\text{OPR}_3$ связями ($\text{R} = \text{Ph}$, $2,300(8)$ Å; Cy , $2,278(5)$ Å). Как в структуре β -*trans*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{PPh}_3\text{O})_2]$, координационный полиэдр атома U в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PO})_2 \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$ является искаженным октаэдром.

Длины связей $\text{U}=\text{O}$ в практически линейной группе UO_2^{2+} ($\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(2)$ $179,6(3)^\circ$), равны $1,778(5) \times 2$ Å. Расстояния $\text{U}-\text{Cl}$ с трансрасположенными Cl-лигандами составляют $2,667(2) \times 2$ Å, что незначительно больше соответствующей длины связи $\text{U}-\text{Cl}$ $2,645(5) \times 2$ Å в структуре β -*trans*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{PPh}_3\text{O})_2]$. Напротив, длины связей $\text{U}-\text{O}$ в структуре *trans*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PO})_2 \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ($2,278(5) \times 2$ Å) существенно меньше длин связей $\text{U}-\text{O}$ ($2,300(8) \times 2$ Å) в структуре β -*trans*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{PPh}_3\text{O})_2]$. В структуре *trans*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PO})_2 \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$ длины связей $\text{P}=\text{O}$ $1,535(5) \times 2$ Å и углы связей $\text{P}=\text{O}-\text{U}$ $167,3(3)^\circ \times 2$ несколько больше соответствующих длин связей ($1,518(8) \times 2$ Å) и углов связей $\text{P}=\text{O}-\text{U}$ ($158,67(3)^\circ \times 2$) в структуре β -*trans*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{PPh}_3\text{O})_2]$.

3.1.9. *cis*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2 \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$, *trans*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2 \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$

Синтез и исследование кристаллической структуры изомерных комплексных соединений *cis*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2 \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$ и *trans*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2 \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$ обсуждаются также в работе [17] (в дальнейшем сольватные молекулы CH_2Cl_2 в соединении не приводятся).

Цис- и трансизомеры $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2$ были синтезированы одинаково – добавлением двух эквивалентов лиганда Cy_3PNH в THF -растворы $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3$ с выделением образовавшихся осадков. Рекристаллизацией полученных осадков из дихлорметана в зависимости от условий обработки были получены кристаллы с двумя разными морфологиями.

Соединение *cis*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2$ кристаллизуется в моноклинной сингонии, пр. гр. $C2/c$: $a = 27,453(3)$, $b = 8,8971(9)$, $c = 20,764(2)$ Å, $\beta = 113,6010(10)^\circ$, $Z = 4$ (рис. 4, а). Трансизомер $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2$ также кристаллизуется в моноклинной сингонии, но в пр. гр. $P2_1/c$ с параметрами $a = 11,575(2)$, $b = 12,113(2)$, $c = 16,600(3)$ Å, $\beta = 90,736(3)^\circ$, $Z = 2$ (рис. 4, б).

Комплексные соединения *cis*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2$ и *trans*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2$ имеют сходное строение с расположением атомов урана в центре искаженных октаэдров. Кристаллическая структура *trans*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2$ аналогична структуре *trans*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Ph}_3\text{PNH})_2]$ и существенно отличается от структуры *cis*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2$, в которой все длины связей U-лиганд короче соответствующих длин связей в структуре трансизомера.

В структуре *trans*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2$ группа UO_2^{2+} линейна ($\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(1)$ $180,00^\circ$) с длинами связей $\text{U}=\text{O}(1)$, равными $1,792(4) \times 2$ Å. В отличие от структуры трансизомера в структуре *cis*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2$ валентный угол $\text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(1)$

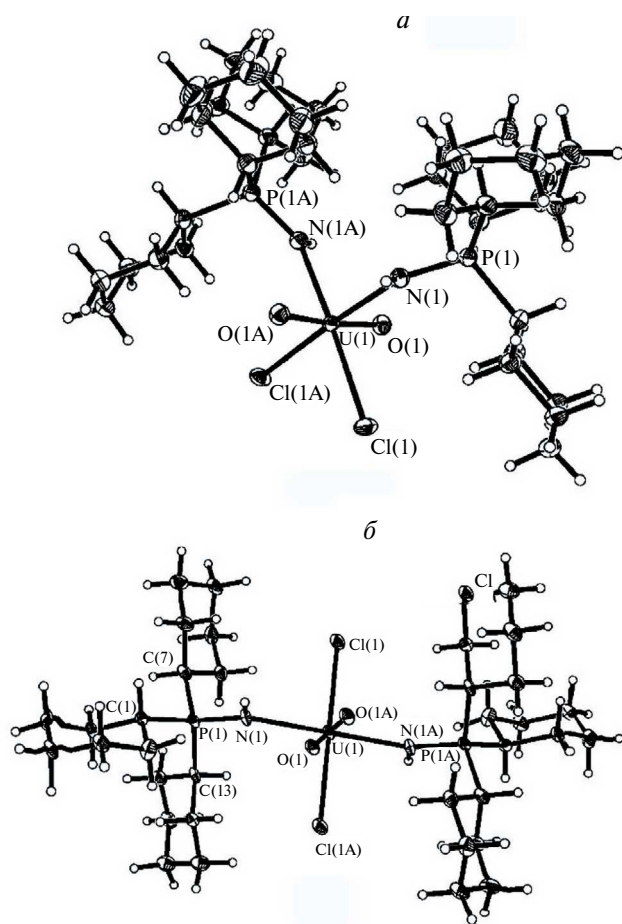


Рис. 4. Строение комплексов *цис*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2]$ (а) и *транс*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2]$ (б) в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2 \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$ [17]

значительно изогнут и составляет $174,24(13)^\circ$. Длины связей $U=O(1)$ в цисизомере также меньше ($1,781(2) \times 2 \text{ \AA}$) расстояний $U=O(1)$ в трансизомере.

В экваториальной плоскости координационных полиэдров структур $cis-UO_2Cl_2(Cy_3PNH)_2$ и $trans-UO_2Cl_2(Cy_3PNH)_2$ длины связей атома U с Cl- и (Cy_3PNH) -лигандами меньше в цисизомере ($U-Cl$ $2,6861(7) \times 2 \text{ \AA}$, $U-N$ $2,350(3) \times 2 \text{ \AA}$) по сравнению с соответствующими длинами связей ($U-Cl$ $2,7044(15) \times 2 \text{ \AA}$, $U-N$ $2,392(5) \times 2 \text{ \AA}$) в трансизомере. В то время как в структурах цис- и транс-изомеров длины связей атома U с Cl- и Cy_3PNH -лигандами различные, расстояния $P=N$ ($1,625(3)$ и $1,622(5) \text{ \AA}$) и углы связей $P=N-U$ ($140,93(15)$ и $139,8(3)^\circ$) в обеих структурах практически одинаковые.

На основании исследования различными физическими методами синтезированных авторами [21] комплексных соединений $cis-UO_2Cl_2(Cy_3PNH)_2$, $trans-UO_2Cl_2(Cy_3PNH)_2$ и $trans-UO_2Cl_2(Cy_3PO)_2$ было установлено, что связи $U-N$ в фосфиниминных системах являются значительно более сильными (около 20 кДж моль^{-1}), чем аналогичные связи $U-O$ в фосфиноксидных соединениях.

3.1.10. $[UO_2Cl_2(DMPU)_2]$

Соединение диметилпропиленмочевины (DMPU) используется в различных областях химии как неводный растворитель или как лиганд. Комплексные соединения с лигандом DMPU получены для большинства металлов основной группы, лантаноидов и ряда переходных металлов. В [18] сообщено о синтезе и исследовании двух новых комплексных соединений UO_2^{2+} с DMPU, одно из которых является соединением хлорида уранила $[UO_2Cl_2(DMPU)_2]$.

Соединение $[UO_2Cl_2(DMPU)_2]$ получено добавлением в безводный раствор метанола, содержащего $UO_2Cl_2 \cdot x(H_2O)$ (1 ммоль), лиганда DMPU (2 ммоль). Смесь упаривали досуха и затем она была растворена в хлориде метилена.

Кристаллическая структура $[UO_2Cl_2(DMPU)_2]$ триклинная, пр. гр. $P-1$: $a = 7,699(3)$, $b = 7,992(3)$, $c = 8,321(3) \text{ \AA}$, $\alpha = 107,900(6)$, $\beta = 98,294(6)$, $\gamma = 105,769(6)^\circ$, $Z = 1$. Координационным полиэдром атома U в структуре $[UO_2Cl_2(DMPU)_2]$ является тетрагональная бипирамида (искаженный октаэдр). В структуре $[UO_2Cl_2(DMPU)_2]$ атом U расположен в центре инверсии, следовательно, лиганды DMPU в транспозиции по отношению друг к другу, как и пары донорных атомов O–O и Cl–Cl-лиганды с фиксированными углами в 180° .

Группа UO_2^{2+} в полиэдре линейна ($\angle O(1)=U=O(1)$ $180,0(3)^\circ$) с длинами связей $U=O(1)$ $1,768(4) \times 2 \text{ \AA}$. Экваториальную плоскость координационного полиэдра образуют два карбонильных атома O лигандов DMPU и два атома Cl. Расстояния $U-Cl$ и $U-O$ равны соответственно $2,6672(16) \times 2$ и $2,288(4) \times 2 \text{ \AA}$. В лиганде DMPU длины карбонильных связей $C(1)-O(2)$ равны $1,275(6) \times 2 \text{ \AA}$, а расстояния $N-C$ изменяются от $1,340(7)$ до $1,463(7) \text{ \AA}$. Угол связи у атома урана $U-O(2)-C(1)$, равный $153,2(3)^\circ$, незначительно отличается от аналогичных связей $U-O-C$ ($160-168^\circ$) с амидными атомами кислорода. Соединение $[UO_2Cl_2(DMPU)_2]$ представляет интерес как исходный продукт для получения безводных комплексов уранила.

3.1.11. $[UO_2Cl_2(tmu)_2]$

Кристаллическая структура $[UO_2Cl_2(tmu)_2]$ ($tmu = N_1N_1N'N'$ -тетраметилмочевина), исследованная монокристалльным рентгеновским дифракционным методом [19], по мотиву строения и геометрическим характеристиками сходна со структурой $[UO_2Cl_2(DMPU)_2]$ (см. раздел 3.1.9). Соединение $[UO_2Cl_2(tmu)_2]$ получено реакцией между $UO_2Cl_2 \cdot 3H_2O$ (1 ммоль) и tmu (2 ммоль) в растворе ацетона.

Кристаллы $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{tmu})_2]$ моноклинные, пр. гр. $P2_1/n$: $a = 8,397(4)$, $b = 13,140(3)$, $c = 9,133(5)$ Å, $\beta = 111,87(5)^\circ$, $Z = 2$. В структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{tmu})_2]$ атом U, образующий координационный полиэдр искаженно октаэдрического строения, расположен в кристаллографическом центре симметрии, в связи с чем в независимой части элементарной ячейки содержатся половина атома U, атом O, атом Cl и одна tmu-группа.

В структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{tmu})_2]$, как в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{DMPU})_2]$ (см. раздел 3.1.9), атомы O, Cl-лиганды и обе группы tmu расположены в трансконфигурации. Длины связей U=O в линейной группе UO_2^{2+} ($\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(1a) 180^\circ$) равны $1,761(5) \times 2$ Å. Расстояния U–Cl ($2,652(3) \times 2$ Å) и U–O ($2,266(5) \times 2$ Å) в экваториальной плоскости координационного полиэдра в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{tmu})_2]$ сопоставимы с соответствующими длинами связей U–Cl ($2,6672(16) \times 2$ Å) и U–O ($2,288(4) \times 2$ Å) в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{DMPU})_2]$. Сопоставимы также в обоих структурах длины карбонильных связей C(1)–O(2) $1,287(10)$ Å соответственно $1,275(6) \times 2$ Å, а углы связей U–O(2)–C(1) в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{tmu})_2]$ $168,5(5)^\circ \times 2$ значительно больше соответствующего угла связи U–O(2)–C(1) $153,2(3)^\circ \times 2$ в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{DMPU})_2]$.

3.2. Соединения с отношением 2Cl:2N

3.2.1. *trans*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Ph}_3\text{PNH})_2] \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$

Соединение $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Ph}_3\text{PNH})_2] \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$ является первым синтезированным и структурно исследованным фосфиниминным комплексным соединением актинидов, демонстрирующим сильное взаимодействие связи U–N и удивительное предпочтение для лигандов $\text{R}_3\text{P}=\text{NH}$ над лигандами $\text{R}_3\text{P}=\text{O}$ в системе $[\text{AnO}_2\text{Cl}_2(\text{R}_3\text{PX})_2]$ (An = U(VI), Np(VI); R = Ph, Cy; X = O, NH) [20].

Соединение $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Ph}_3\text{PNH})_2]$ получено взаимодействием $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3$ (1 ммоль) и Ph_3PNH (2 ммоль) в растворе THF. Комплексное соединение $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Ph}_3\text{PNH})_2]$ кристаллизуется в моноклинной сингонии, пр. гр. $P2_1/n$: $a = 9,7149(6)$, $b = 11,3826(7)$, $c = 19,0621(11)$ Å, $\beta = 102,7250(10)^\circ$, $Z = 2$.

В структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Ph}_3\text{PNH})_2]$ атом U искаженно октаэдрически окружен двумя атомами O группы UO_2^{2+} , двумя лигандами Ph_3PNH и двумя хлоридными лигандами, координированными в трансгеометрии в экваториальной плоскости полиэдра. В линейной группе уранила ($\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(1) 180,00^\circ$) длины связей U=O(1) равны $1,778(1) \times 2$ Å. Расстояния U–Cl в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Ph}_3\text{PNH})_2]$, равные $2,6713(4) \times 2$ Å, несколько больше соответствующих длин связей U–Cl ($2,645(5) \times 2$ Å) в структуре $\beta\text{-trans-}[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{PPh}_3\text{O})_2]$ (см. раздел 3.1.1), а длины связей U–N составляют $2,370(1) \times 2$ Å. Значение длины связи U–N ($2,370(1)$ Å) трудно оценить, так как другие шестикоординированные комплексные соединения уранила, содержащие нейтральные N-донорные лиганды, отсутствуют. Следует, однако, отметить, что расстояние U–N ($2,370(1)$ Å) в $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Ph}_3\text{PNH})_2]$ несколько длиннее, чем связь U–O ($2,300(8) \times 2$ Å) в $\beta\text{-trans-}[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{PPh}_3\text{O})_2]$.

Связь P=N(1) в комплексном соединении длиннее ($1,6045(14)$ Å) связи P=N(1) ($1,582(2)$ Å) в свободном лиганде Ph_3PNH , а величина угла P=N–U в комплексе составляет $139,19(8)^\circ$. В структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PO})_2 \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$ длина связи P=O ($1,535(5) \times 2$ Å) меньше, а величины углов связей P=O–U ($167,3(3)^\circ \times 2$) существенно больше, чем в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Ph}_3\text{PNH})_2]$.

3.2.2. $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HTMG})_2]$

N-донорное соединение 1,1,3,3-тетраметилгуанидин (HTMG), иминное соединение мочевины, является одним из сильнейших нейтральных органических

оснований, образующих комплексные соединения со многими ионами металлов. В [21] описаны синтез и кристаллическая структура UO_2Cl_2 с нейтральным лигандом НТМГ состава $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HTMG})_2]$ – первого комплексного соединения уранила с тетраалкилгуанидином. Соединение $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HTMG})_2]$ получено добавлением двух эквивалентов лиганда НТМГ в раствор $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_2]_2$ в THF с последующей кристаллизацией и выделением образовавшегося осадка.

В октаэдрической структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HTMG})_2]$ атом U(VI) расположен в центре инверсии с двумя атомами O в аксиальных позициях полиэдра, образующими линейную группу UO_2^{2+} ($\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(1)$ $180,000(1)^\circ$) с длинами связей $\text{U}=\text{O}(1)$ $1,777(5) \times 2 \text{ \AA}$.

Экваториальная плоскость координационного полиэдра атома U в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{HTMG})_2]$ образована двумя транслигандами НТМГ и двумя транслигандами Cl. Длины связей $\text{U}-\text{Cl}$ $(2,6846(13) \times 2 \text{ \AA})$ и $\text{U}-\text{N}$ $(2,390(4) \times 2 \text{ \AA})$ в экваториальной плоскости полиэдра структуры сопоставимы с длинами связей $\text{U}-\text{Cl}$ $(2,7044(15) \times 2 \text{ \AA})$ и $\text{U}-\text{N}$ $(2,392(5) \times 2 \text{ \AA})$ в структуре *trans*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2 \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$ [21]. В лиганде НТМГ длина связи $\text{C}(1)=\text{N}(1)$ (иминный) равна $1,339(6) \text{ \AA}$, а валентный угол в полиэдре атома урана $\text{C}(1)=\text{N}(1)-\text{U}$ равен $128,1(3)^\circ$. В структуре *trans*- $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2 \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$ угол связи $\text{P}=\text{N}-\text{U}$ равен $139,8(3)^\circ$.

4. Соединения с отношением 2Cl:2C(S)

4.1. Соединения с отношением 2Cl : 2C



N-гетероциклические карбеновые соединения являются перспективными объектами для применения их в гомогенном катализе и в качестве материалов. В работе [22] сообщено о синтезе и исследовании кристаллической структуры двух новых мономерных N-гетероциклических карбеновых комплексных соединений UO_2Cl_2 с лигандами 1,3-димезитилимидазол-2-илиден (IMes) и 1,3-димезитил-4,5-дихлоримидазол-2-илиден (IMesCl₂), являющихся представителями первых актинильных N-гетероциклических карбеновых соединений со связью $\text{U}-\text{C}$.

Соединения $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{IMes})_2] \cdot 6\text{THF}$ $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{IMesCl}_2)]$ были получены добавлением раствора THF, содержащего два эквивалента лигандов IMes или IMesCl₂, в раствор $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3$ в THF, из которого выделены бледно-желтые порошки состава $\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_2$ (L = IMes (1,6THF), IMesCl₂ (2)).

Кристаллы $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{IMes})_2] \cdot 6\text{THF}$ тригональные, пр. гр. R-3: $a = 29,330(1)$, $b = 29,330(1)$, $c = 18,879(1) \text{ \AA}$, $\gamma = 120^\circ$, $Z = 9$. Соединение $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{IMesCl}_2)]$ кристаллизуется в моноклинной сингонии, пр. гр. $P2_1/n$: $a = 10,1563(5)$, $b = 17,3511(8)$, $c = 13,6466(6) \text{ \AA}$, $\beta = 95,162(1)^\circ$, $Z = 2$.

Атом U(VI) в кристаллических структурах **1** и **2** находится в центре почти идеального октаэдра. В линейных группах UO_2^{2+} ($\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(1)$ $180,0(3)^\circ \times 2$) структур длины связей $\text{U}=\text{O}(1)$ равны $1,761(4) \times 2$ и $1,739(3) \times 2 \text{ \AA}$ соответственно. Значительно более короткая длина связи $\text{U}=\text{O}(1)$ в **2** согласуется с тем, что IMesCl₂ является более слабым s-донорным лигандом по сравнению с IMes.

Экваториальные плоскости координационных полиэдров структур **1** и **2** образованы двумя транслигандами IMes соответственно IMesCl₂ и двумя трансрасположенными Cl-лигандами. Расстояния $\text{U}-\text{Cl}$ в экваториальных плоскостях полиэдров структур **1** и **2** практически одинаковые $(2,655(2) \times 2, 2,6488(14) \times 2 \text{ \AA})$ и сопоставимы с соответствующими длинами связей $\text{U}-\text{Cl}$ $(2,652(3) \times 2 \text{ \AA})$ в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{tmu})_2$ [19] (см. раздел 3.1.11).

Длины связей $\text{U}-\text{C}$ (карбен) значительно увеличены $(2,626(7) \times 2$ и $2,609(4) \times 2 \text{ \AA})$ для **1** и **2** соответственно по сравнению с длинами связей $\text{U}-\text{L}$ в комплексах $\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_2$

($L = \text{OPPh}_3$ [9], $\text{OP}(\text{NMe}_2)_3$ [16], $(\text{C}_6\text{H}_5)_3\text{PNH}$ [17], $\text{OC}(\text{NMe}_2)_2$ [19]), которые находятся в интервале между 2,27 и 2,30 Å.

Имидазол-2-илиденовые кольца лежат почти копланарно, скрученными вдоль оси $\text{C}(1)\text{--U}(1)\text{--C}(1\text{A})$ примерно на 6° (в **1**) и 8° (в **2**). Плоскость, определяемая группой атомов $\text{N}(1)\text{--C}(1)\text{--N}(2)$, минимизирует стерическое взаимодействие между мезитильными заместителями и хлоридными лигандами.

4.2. $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{C}_2\text{C}_2\text{ImT})_2]$

Соединение имидазол-2-тион широко применяется в фармакологии, а также как лиганд в координационной химии. В работе [23] описаны синтез и кристаллическая структура комплексного соединения UO_2Cl_2 с лигандом 1,3-диэтилимидазол-2-тиона ($\text{C}_2\text{C}_2\text{ImT}$) состава $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{C}_2\text{C}_2\text{ImT})_2]$. Соединение $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{C}_2\text{C}_2\text{ImT})_2]$ получено добавлением в водный или ацетонитрильный раствор $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (0,1 ммоль) ацетонитрильного раствора $\text{C}_2\text{C}_2\text{ImT}$ (0,2 ммоль), при этом моментально изменяется цвет раствора и начинается образование кристаллов.

Комплексное соединение $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{C}_2\text{C}_2\text{ImT})_2]$ кристаллизуется в триклинной сингонии, пр. гр. $P-1$: $a = 7,8597(4)$, $b = 9,0512(4)$, $c = 9,1650(4)$ Å, $\alpha = 69,153(2)$, $\beta = 85,435(2)$, $\gamma = 65,395(2)^\circ$, $Z = 1$ с атомом урана в кристаллографическом центре инверсии. Шестикоординационная геометрия полиэдра атома U(VI) близка к идеальному октаэдру.

В линейной группе UO_2^{2+} ($\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(1)$ $180,0^\circ$) структуры длины связей $\text{U}=\text{O}(1)$ равны $1,7769(15) \times 2$ Å. Расстояние связи U--S в экваториальной плоскости полиэдра атома U ($2,7655(6) \times 2$ Å) больше, чем длина связи U--Cl ($2,6505(5) \times 2$ Å), которая сравнима с длиной связи U--Cl ($2,6552(2) \times 2$ Å) в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{IMes})_2 \cdot 6\text{THF}$ (см. раздел 4.1).

В структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{C}_2\text{C}_2\text{ImT})_2]$ лиганды $\text{C}_2\text{C}_2\text{ImT}$ находятся в дисконформации. Обе этильные группы лиганда расположены на той же стороне, что и плоскость имидазольного кольца. Длина связи $\text{C}(2)\text{--S}(1)$ в лиганде равна $1,717(2)$ Å, а валентный угол $\text{C}(2)\text{--S}(1)\text{--U}$ из-за сильного внутримолекулярного взаимодействия сравнительно небольшой и составляет $102,12(7)^\circ$.

5. Соединения с отношением $2\text{Cl}:3\text{N}$

5.1. $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{terpy})]$

Синтез и кристаллическая структура комплексного соединения UO_2Cl_2 с нейтральным тридентатным гетероциклическим N -донорным лигандом 2,2':6',2''-терпиридином (обозначенным *terpy*) описаны в работе [24]. Синтез $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{terpy})]$ проводили гидротермальным методом с использованием автоклавов типа Парра с тефлоновым покрытием путем нагревания смеси (0,2 ммоль) UCl_4/HCl (0,12 М), (0,4 ммоль) лиганда 2,2':6',2''-терпиридина, (19 ммоль) ацетонитрила и (12 ммоль) пиридина статически при 120°C в течение 48 ч. В процессе нагревания смеси произошло превращение U(IV) в U(VI) . Образовавшийся осадок отфильтровывали, промывали водой и сушили при комнатной температуре.

Соединение $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{terpy})]$ кристаллизуется в моноклинной сингонии, пр. гр. $P2_1/m$: $a = 7,8907(4)$, $b = 13,5622(8)$, $c = 7,9111(4)$ Å, $\beta = 105,858(2)^\circ$, $Z = 2$. В кристаллической структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{terpy})]$ атом U искаженно пентагонально-бипирамидально окружен в апикальных позициях двумя атомами O , образующими с атомом U несколько отличающуюся от линейности группу UO_2^{2+} ($\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(2)$ $176,61(14)^\circ$) с длинами связей $\text{U}=\text{O}$ $1,773(4)$ и $1,790(4)$ Å, которая перпендикулярна

экваториальной плоскости пентагональной бипирамиды, составленной из двух цисрасположенных терминальных атомов Cl и трех атомов азота пиридиловых колец координированного изогнутого органического лиганда *terpy*, формирующих $\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{N}_3$ пентагональный мотив.

Длины связей U–Cl в экваториальной плоскости пентагональной бипирамиды $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{terpy})]$ равны $2,6736(10) \times 2 \text{ \AA}$, что сопоставимо с длинами связей U–Cl ($2,6713(4) \times 2 \text{ \AA}$) в структуре *trans*- $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Ph}_3\text{PNH})_2] \cdot 2\text{CH}_2\text{Cl}_2$ [20] (см. раздел 3.2.1). Расстояния U–N в экваториальной плоскости полиэдра несколько меньше длин связей U–Cl и составляют $2,596(3), 2,601(3) \times 2 \text{ \AA}$. Выход атомов N лиганда *terpy* и Cl-лигандов из пятиугольной плоскости бипирамиды невелик и варьирует между $+0,29$ и $-0,41 \text{ \AA}$.

5.2. $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{H}_2\text{BVP})] \cdot 2\text{py}$

Комплексное соединение UO_2Cl_2 с нейтральным тридентатным N-донорным лигандом 2,6-бис(2-бензимидазолил)пиридином (H_2BVP) $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{H}_2\text{BVP})] \cdot 2\text{py}$ [25] по мотиву строения и геометрическим параметрам структуры проявляет значительное сходство со структурой соединения $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{terpy})]$ [24] (см. раздел 5.1). Обработка соединения $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3$ (0,0628 ммоль) с тридентатным N-донорным лигандом H_2BVP (0,6980 ммоль) в пиридине (2 мл) в течение 1 ч привело к образованию прозрачного желтого раствора, из которого при добавлении по каплям гексана (10 мл) выпадало в осадок желтое вещество, структурно охарактеризованное как молекулярный комплекс состава $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{H}_2\text{BVP})] \cdot 2\text{py}$. Соединение $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{H}_2\text{BVP})] \cdot 2\text{py}$ образует моноклинные кристаллы, принадлежащие к пр. гр. $P2_1/n$: $a = 12,2371(9)$, $b = 18,0253(13)$, $c = 14,2323(10) \text{ \AA}$, $\beta = 115,091(2)^\circ$, $Z = 4$.

Как и в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{terpy})]$, в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{H}_2\text{BVP})] \cdot 2\text{py}$ содержится один урановый центр в типичной пентагональной бипирамидальной геометрии, окруженный в апикальных позициях бипирамиды двумя атомами O, образующими несколько отличающуюся от линейности группу UO_2^{2+} ($\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(2) 178,10(10)^\circ$) с длинами связей U=O $1,765(2)$ и $1,772(2) \text{ \AA}$, одним изогнутым органическим лигандом H_2BVP , координированным посредством двух имидазольных и одного пиридинового атомов N, и двумя цисрасположенными терминальными атомами Cl, образующими экваториальную плоскость пентагональной бипирамиды.

В экваториальной плоскости координационного полиэдра $\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{N}_3$ структуры $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{H}_2\text{BVP})] \cdot 2\text{py}$ расстояния U–Cl ($2,6606(8), 2,6914(8) \text{ \AA}$) и U–N ($2,555(2), 2,579(3), 2,607(3) \text{ \AA}$) практически такие же, U–Cl ($2,6736(10) \times 2 \text{ \AA}$) и U–N ($2,596(3), 2,601(3) \times 2 \text{ \AA}$) как в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{terpy})]$. Валентный угол между цисрасположенными Cl-лигандами $\angle \text{Cl}(1)-\text{U}(1)-\text{Cl}(2)$ равен $80,76(3)^\circ$, а в структуре $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{terpy})$ он несколько больше и составляет $84,19(6)^\circ$.

5.3. $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{py})_3]$

Синтез и кристаллическая структура большого числа комплексных соединений пятивалентного уранила, в том числе одного соединения U(VI) – UO_2Cl_2 с пиридином $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{py})_3]$ приведены в работе [26]. Синтез $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{py})_3]$ проводили реакцией $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_2]_2$ (0,02 ммоль) и $\text{Me}_3\text{SiC}_5\text{H}_5$ (0,020 ммоль) в ацетонитриле- d_3 (0,3 мл). Через 20 ч при 20°C раствор выпарили досуха и остаток растворяли в пиридине (0,4 мл) с получением зеленого раствора. Медленной диффузией Et_2O (2 мл) в этот раствор были получены желтые кристаллы $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{py})_3]$, состав которых установлен рентгеноструктурным анализом.

Соединение $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{py})_3]$ кристаллизуется в моноклинной сингонии, пр. гр. $P2_1/c$: $a = 11,1335(8)$, $b = 13,0944(9)$, $c = 13,2043(6)$ Å, $\beta = 112,600(4)^\circ$, $Z = 4$. Структура соединения UO_2Cl_2 с пиридином образована нейтральными комплексами $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{py})_3]$ пентагонально-бипирамидального строения. Два атома О, локализованные в апикальных позициях бипирамиды, вместе с атомом U образуют несколько отличающуюся от линейности группу UO_2^{2+} ($\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(2)$ $177,36(14)^\circ$) с одинаковыми длинами связей $\text{U}=\text{O}$ $1,764(3)$ и $1,767(3)$ Å, перпендикулярную экваториальной плоскости координационного полиэдра, образованной тремя атомами N трех нейтральных молекул Py и двумя трансрасположенными Cl-лигандами.

Длины связей $\text{U}-\text{Cl}$ в экваториальной плоскости координационного полиэдра структуры $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{py})_3]$ ($2,6926(12)$ и $2,7338(12)$ Å) практически такие же, как в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{H}_2\text{BBP})] \cdot 2\text{py}$ ($2,6606(8)$, $2,6914(8)$ Å). Существенно различаются углы связей $\angle \text{Cl}(2)-\text{U}-\text{Cl}(1)$ в обеих структурах: трансугол связи $146,80(4)^\circ$ в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{py})_3]$ по сравнению с цисуглом связи $\angle \text{Cl}(2)-\text{U}-\text{Cl}(1)$ $80,76(3)^\circ$ в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{H}_2\text{BBP})] \cdot 2\text{py}$.

Расстояния $\text{U}-\text{N}$ в экваториальной плоскости полиэдра структуры $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{py})_3]$ ($2,561(4)$, $2,563(4)$, $2,588(4)$ Å) сопоставимы с длинами связей $\text{U}-\text{N}$ ($2,555(2)$, $2,579(3)$, $2,607(3)$ Å) в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{H}_2\text{BBP})] \cdot 2\text{py}$, хотя в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{py})_3]$ атомы N связаны каждый с одним лигандом и значительно удалены друг от друга, а в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{H}_2\text{BBP})] \cdot 2\text{py}$ все три донорных атома N координированы одним изогнутым лигандом H_2BBP . Величины углов $\text{N}1-\text{U}-\text{N}3$ и $\text{N}1-\text{U}-\text{N}2$ у атома U в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{py})_3]$ равны соответственно $148,09(13)$ и $143,58(12)^\circ$.

6. Соединения с отношением 2Cl : 4N

6.1. $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{phen})_2]$

Простой метод синтеза и исследование кристаллической структуры нового комплексного соединения UO_2Cl_2 с 1,10-фенантролином (phen) $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{phen})_2]$ с уникальной додекагедраэдрической координационной геометрией вокруг уранового центра, со значительным изгибом от линейности уранильной группы и одновременно с этим искажением экваториальной координационной плоскости полиэдра описаны в работе [27]. При добавлении по каплям раствора 1,10-фенантролина в ацетоне в раствор $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ в ацетоне ($\text{U} : \text{phen} = 1:2$) сразу образуется желтый осадок, который затем растворяли в горячем ацетоне и медленно охлаждали до образования прозрачных желтых кристаллов $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{phen})_2]$.

Соединение $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{phen})_2]$ является нейтральным комплексом, кристаллизующимся в триклинной пр. гр. $P-1$ с параметрами элементарной ячейки: $a = 8,5282(5)$, $b = 9,4109(5)$, $c = 14,5792(9)$ Å, $\alpha = 79,982(2)$, $\beta = 89,776(2)$, $\gamma = 71,925(2)^\circ$, $Z = 2$. Восьмикоординированный атом U в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{phen})_2]$ окружен двумя «иловыми» атомами О, двумя трансрасположенными Cl-лигандами и четырьмя атомами N двух нейтральных бидентатно координированных центром U почти перпендикулярно друг другу phen-лигандов, определяя уникальную координационную додекагедраэдрическую геометрию вокруг центра U.

Длины связей $\text{U}=\text{O}$ в группе UO_2^{2+} комплексного соединения $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{phen})_2]$ $1,775(3)$ и $1,781(3)$ Å являются типичными для комплексов уранила(VI). Однако геометрия уранильного катиона значительно отклоняется от идеальной линейности, образуя валентный угол $\text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(2)$ в $161,8(1)^\circ$.

Расстояния $\text{U}-\text{Cl}$ в несколько искаженной экваториальной плоскости многогранника структуры $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{phen})_2]$ ($2,6655(9)$, $2,6825(9)$ Å) сопоставимы с соответствующими длинами связей $\text{U}-\text{Cl}$ ($2,6606(8)$, $2,6914(8)$ Å) в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{H}_2\text{BBP})] \cdot 2\text{py}$ [25],

а длины связей U–N, лежащие в интервале 2,644(3)–2,764(3) Å, больше длин связей U–N (2,555(2)–2,607(3) Å) в сравниваемой структуре.

Одной из уникальных особенностей координационной геометрии комплекса $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{phen})_2]$ является приближение уранильных атомов кислорода и атомов хлора к соседним атомам водорода молекул phen (O1–H13 2,308(3), O2–H24 2,332(3), Cl1–H12 2,483(3), Cl2–H1 2,470(3) Å), что приводит к образованию взаимодействия между этими атомами, стабилизирующего структуру.

6.2. $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{}^{\text{H}}\text{N}_4) \cdot 2\text{MeCN}(\mathbf{1})$, $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{}^{\text{Me}}\text{N}_4) \cdot 2\text{MeCN}(\mathbf{2a})$

Синтез и кристаллическая структура комплексных соединений UO_2Cl_2 с 12-членными макроциклическими тетрадентатными лигандами $\text{}^{\text{H}}\text{N}_4$ ($\text{}^{\text{H}}\text{N}_4 = 2,11$ -диаза[3,3](2,6) пиридинофан) $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{}^{\text{H}}\text{N}_4) \cdot 2\text{MeCN}(\mathbf{1})$ и $\text{}^{\text{Me}}\text{N}_4$ ($\text{}^{\text{Me}}\text{N}_4 = \text{N}, \text{N}'$ -диметил-2,11-диаза[3,3](2,6) пиридинофан) $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{}^{\text{Me}}\text{N}_4) \cdot 2\text{MeCN}(\mathbf{2a})$, в которых содержатся значительно отличающиеся от линейности группы UO_2^{2+} , обсуждаются в работе [28].

Соединение $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{}^{\text{H}}\text{N}_4) \cdot 2\text{MeCN}(\mathbf{1})$ получено при добавлении 2 экв. лиганда $\text{}^{\text{H}}\text{N}_4$ к раствору $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_2]_2$ в MeCN, из которого $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{}^{\text{H}}\text{N}_4)$ выделяют в виде желтого кристаллического вещества. Аналогичным образом добавление 2 экв. лиганда $\text{}^{\text{Me}}\text{N}_4$ к $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_2]_2$ в MeCN приводит к образованию оранжево-желтой суспензии, из которой выделяют соединение $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{}^{\text{Me}}\text{N}_4)$.

Комплекс **1** выделяется из раствора в виде сольвата $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{}^{\text{H}}\text{N}_4) \cdot 2\text{MeCN}$ и кристаллизуется в моноклинной пространственной группе $P2_1/m$: $a = 8,3513(5)$, $b = 15,0623(9)$, $c = 9,9039(6)$ Å, $\beta = 112,981(3)^\circ$, $Z = 2$, а комплекс **2a** также образует сольват, кристаллизующийся в ромбической системе, пр. гр. $Pbcn$: $a = 9,434(2)$, $b = 14,676(3)$, $c = 13,464(4)$ Å, $Z = 4$.

Атомы U в обеих структурах имеют восьмикоординационную геометрию и окружены каждый двумя уранильными атомами O, двумя цисрасположенными Cl-лигандами и четырьмя атомами азота макроциклических лигандов. В структурах **1** и **2a** группы UO_2^{2+} значительно отклоняются от линейности, валентные углы в них $\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(1)$ составляют $164,1(3)^\circ$ в (**1**) и $168,2(3)^\circ$ в (**2a**) соответственно. Они несколько больше валентного угла $\text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(2)$ ($161,8(1)^\circ$) в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{phen})_2]$, а длины связей U=O в группах UO_2^{2+} в структурах **1** (1,776(5), 1,785(5) Å) и **2a** (1,769(4) × 2 Å) такие же, как в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{phen})_2]$ (1,764(3) и 1,767(3) Å).

Экваториальные плоскости координационных полиэдров структуры **1** и **2a** образованы двумя цисрасположенными атомами Cl и четырьмя атомами азота макроциклических лигандов. Расстояния U–Cl в экваториальной плоскости координационных полиэдров структуры **1** (2,7352(14) × 2 Å) несколько больше, чем соответствующие длины связей U–Cl в структуре **2a** (2,677(2) × 2 Å) и практически сопоставимы с длинами связей U–Cl (2,6606(8), 2,6914(8) Å) в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{phen})_2]$. Цис-углы $\angle \text{Cl1}=\text{U}=\text{Cl1}$ в структурах **1** и **2a** равны соответственно $96,05(6)^\circ$ и $86,19(8)^\circ$.

Расстояния U–N в структуре **2a** (2,693(5) × 2, 2,728(5) × 2 Å) незначительно больше длин связей U–N в структуре **1** (2,601(5) × 2, 2,639(6), 2,674(7) Å), но они практически такие же, как в структуре $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{phen})_2]$.

По мнению авторов [28], значительное уменьшение от линейности валентного угла $\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(1)$ в структурах **1** и **2a** является результатом стерического отталкивания между оксо-лигандами уранильных фрагментов и остовым макроциклом, который является небольшим по размеру для связывания лиганда $\text{}^{\text{R}}\text{N}_4$.

Заключение

Систематизированы и обсуждены кристаллические структуры комплексных соединений UO_2Cl_2 с нейтральными лигандами, содержащими донорные атомы O, N, S и C, и установлены кристаллохимические особенности их строения в зависимости от отношения числа атомов Cl к числу донорных атомов O, N, S и C координированных лигандов в соединении. В разнолигандных комплексных соединениях $\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_n$ при отношении $2\text{Cl} : \text{O}$, $2\text{Cl} : 3\text{O}(\text{N})$ и $\text{Cl} : 4\text{O}$ координационный полиэдр шестивалентного атома урана в структуре имеет пентагонально-бипирамидальное строение. При отношении $2\text{Cl} : 2\text{O}$ (N, S, C) в разнолигандных комплексных соединениях $\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_n$ атомы урана образуют тетрагонально-бипирамидальные полиэдры (искаженные октаэдры). В небольшой группе разнолигандных соединений $\text{UO}_2\text{Cl}_2\text{L}_n$ с отношением $2\text{Cl} : 4\text{N}$ реализуются гексагонально-бипирамидальные полиэдры атомов U с атомами Cl и N в экваториальной плоскости и нелинейной группой UO_2^{2+} ($\angle \text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(2)$ 161,81(11)–168,3(3)°).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Taylor J.C., Wilson P.W. The structure of anhydrous uranyl chloride by powder neutron diffraction // *Acta Crystallogr. Sect. B. Struct. Crystallogr. Cryst. Chem.* 1973. Vol. B29. No. 5. P. 1073–1076. DOI: 10.1107/s0567740873003882.
2. Debets P.C. The structures of uranyl chloride and its hydrates // *Acta Crystallogr. Sect. B. Struct. Crystallogr. Cryst. Chem.* 1968. Vol. B24. No. 3. P. 400–402. DOI: 10.1107/s056774086800244x.
3. Davidovich R.L., Goreschnik E.A. Structural chemistry of fluoride complexes of uranyl // *Struct. Chem.* 2023. Vol. 34 (1). P. 265–284. <https://doi.org/10.1007/s11224-022-02095-8>.
4. Taylor J.C., Wilson P.W. The structure of uranyl chloride monohydrate by neutron diffraction and the disorder of the water molecule // *Acta Crystallogr. Sect. B. Struct. Crystallogr. Cryst. Chem.* 1974. Vol. B30. No. 1. P. 169–175. DOI: 10.1107/s0567740874002421.
5. Wilkerson M.P., Burns C.J., Paine R.T., Scott B.L. Synthesis and Crystal Structure of $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3$: A Simple Preparation of an Anhydrous Uranyl Reagent // *Inorg. Chem.* 1999. Vol. 38. No. 18. P. 4156–4158. DOI: 10.1021/ic990159g.
6. Keramidas A.D., Rikkou M.P., Drouza C., Raptopoulou C.P., Terzis A., Pashalidis A. Investigation on uranyl interaction with bioactive ligands. Synthesis and structural studies of the uranyl complexes with glycine and N-(2-mercaptopropionyl)glycine // *Radiochim Acta.* 2002. Vol. 90. No. 9–11. P. 549–554. DOI: 10.1524/ract.2002.90.9-11_2002.549.
7. Charpin P., Lance M., Nierlich M., Vigner D., Marquet-Ellis H. Structure of Tris(N-tert-butylformamide)dichlorodioxouranium(VI) // *Acta Crystallogr.* 1988. Vol. C44. No. 8. P. 1489–1490. DOI: 10.1107/s0108270188003907.
8. Smith P.A., Spano T.L., Burns P.C. Synthesis and structural characterization of a series of uranyl-betaine coordination complexes // *Z. Krist. Cryst. Mater.* 2018. Vol. 233. P. 507–513. <https://doi.org/10.1515/zkri-2017-2139>.
9. Bombieri G., Forsellini E., Day J.P., Azeez W.I. Crystal and molecular structure of dichlorodioxobis(triphenylphosphine oxide)uranium(VI) // *J. Chem. Soc. Dalton Trans.* 1978. No. 6. P. 677–680. DOI: 10.1039/dt9780000677.
10. Akona S.B., Fawcett J., Holloway J.H., Russell D.R., Leban I. Structures of *cis*- and *trans*-dichlorodioxobis(triphenylphosphine oxide)uranium(VI) // *Acta Crystallogr. Section C. Cryst. Struct. Commun.* 1991. Vol. C47. No. 1. P. 45–48. DOI: 10.1107/s0108270190007181.
11. Kannan S., Barnes C.L., Duval P.B. Versatile new uranyl(VI) dihalide complexes supported by tunable organic amide ligands // *Chem. Commun.* 2005. No. 48. P. 5997–5998. <https://doi.org/10.1039/B512966D>.

12. Das D., Vats B.G., Kannan S., Kumar M., Sureshkumar M.K. Synthetic and structural studies of piperidine carboxamide uranyl ion complexes // *Polyhedron*. 2014. Vol. 81. P. 39–44.
DOI: 10.1016/j.poly.2014.05.037.
13. Vats B.G., Das D., Sadhu B., Kannan S., Pius I.C., Noronha D.M., Kumar M.P.B. Selective recognition of uranyl ions from bulk of thorium(IV) and lanthanide(III) ions by tetraalkyl urea: a combined experimental and quantum chemical study // *Dalton Trans.* 2016. Vol. 45. No. 25. P. 10319–10325.
DOI: 10.1039/c6dt01191h.
14. Russell J.C., du Plessis M.P., Nassimbeni L.R., du Preez J.G.H., Gellatly J.G.H. The Crystal and Molecular Structure of Dichlorobis(hexamethylphosphoramide)-dioxouranium(VI): $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot 2(\text{HMPA})$ // *Acta Crystallogr. Sect. B. Struct. Crystallogr. Cryst. Chem.* 1977. Vol. B33. P. 2062–2065.
<https://doi.org/10.1107/S0567740877007742>.
15. Du Preez J.G.H., Gellatly B.J., Jackson G., Nassimbeni L.R., Rodgers A.L. The chemistry of uranium. Pt 23. Isomorphous tetrachlorobis(hexamethylphosphoramide) uranium(IV) and tetrabromobis(hexamethylphosphoramide) uranium(IV) // *Inorg. Chim. Acta*. 1978. Vol. 27. P. 181–184.
DOI: 10.1016/s0020-1693(00)87281-3.
16. Julien R., Rodier N., Khodadad P. Structure Cristalline du Dioxodichloro Bis(hexamethylphosphorotriamide) Uranium(VI) $\text{UO}_2\text{Cl}_2\{\text{OP}[\text{N}(\text{CH}_3)_2]_3\}_2$ // *Acta Crystallogr. Sect. B. Struct. Crystallogr. Cryst. Chem.* 1977. Vol. B33. No. 8. P. 2411–2414.
<https://doi.org/10.1107/S0567740877008620>.
17. Haller L.J.L., Kaltsoyannis N., Sarsfield M.J., May I., Cornet S.M., Redmond M.P., Helliwell M.A. Structural and Theoretical Investigation of Equatorial cis and trans Uranyl Phosphinimine and Uranyl Phosphine Oxide Complexes $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2$ and $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PO})_2$ // *Inorg. Chem.* 2007. Vol. 46. No. 12. P. 4868–4875. DOI: 10.1021/ic062031m.
18. Weis E.M., Duval P.B., Jurisson S.S. Syntheses and structures of two uranyl complexes with DMPU // *Radiochim. Acta*. 2012. Vol. 100. No. 4. P. 237–241.
DOI: 10.1524/ract.2012.1911.
19. Jacobs A., van Vuuren C.P.J., van Rooyen P.H. The solid-state chemistry of uranium. Pt. 3. The crystal structure and thermochemistry of dichloro-bis($N_1N_1N'N'$ -tetramethylurea)-dioxouranium(VI) // *S. Afr. J. Chem.* 1986. Vol. 39. No. 4. P. 174–178.
20. Sarsfield M.J., May I., Cornet S.M., Helliwell M. Preference for Nitrogen versus Oxygen Donor Coordination in Uranyl- and Neptunyl(VI) Complexes // *Inorg. Chem.* 2005. Vol. 44. No. 21. P. 7310–7312.
DOI: 10.1021/ic051161c.
21. Bertke J.A., Bunge S.D. Stable analogs of the uranyl ion containing 1,1,3,3-tetramethylguanidine // *Dalton Trans.* 2007. No. 41. P. 4647–4649. DOI: 10.1039/b712054k.
22. Oldham Jr. W.J., Oldham S.M., Smith W.H., Costa D.A., Scott B.L., Abney K.D. Synthesis and structure of N-heterocyclic carbene complexes of uranyl dichloride // *Chem. Commun.* 2001. No. 15. P. 1348–1349. DOI: 10.1039/b102649f.
23. Kelley S.P., Smetana V., Nuss J.S., Dixon D.A., Vasiliu M., Mudring A.-V., Rogers R.D. Dehydration of $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ with a Soft Donor Ligand and Comparison of Their Interactions through X-ray Diffraction and Theoretical Investigation // *Inorg. Chem.* 2020. Vol. 59. P. 2861–2869.
DOI: 10.1021/acs.inorgchem.9b03228.
24. Lhoste J., Henry N., Loiseau T., Guyot Y., Abraham F. Crystal structures of 2,2':6',2''-terpyridine uranyl chlorides molecular assemblies and their luminescence signatures // *Polyhedron*. 2013. Vol. 50. No. 1. P. 321–327. DOI: 10.1016/j.poly.2012.11.026.
25. Copping R., Jeon B., Pemmaraju C.D., Wang S., Teat S.J., Janousch M., Tyliczszak T., Canning A., Gronbech-Jensen N., Prendergast D., Shuh D.K. Toward Equatorial Planarity about Uranyl: Synthesis and Structure of Tridentate Nitrogen-Donor $\{\text{UO}_2\}^{2+}$ Complexes // *Inorg. Chem.* 2014. Vol. 53. No. 5. P. 2506–2515. DOI: 10.1021/ic4026359.
26. Berthet J.-C., Siffredi G., Thuery P., Ephritikhine M. Synthesis and crystal structure of pentavalent uranyl complexes. The remarkable stability of UO_2X ($\text{X} = \text{I}, \text{SO}_3\text{CF}_3$) in non-aqueous solutions // *Dalton Trans.* 2009. No. 18. P. 3478–3494. DOI: 10.1039/b820659g.

27. Schöne S., Radoske T., März J., Stumpf T., Patzschke M., Ikeda-Ohno A. $[\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{phen})_2]$, a Simple Uranium(VI) Compound with a Significantly Bent Uranyl Unit (phen=1,10-phenanthroline) // *Chem. – A Eur. J.* 2017. Vol. 23. No. 55. P. 13574–13578. DOI: 10.1002/chem.201703009.
28. Pedrick E.A., Schultz J.W., Wu G., Mirica L.M., Hayton T. W. Perturbation of the O–U–O Angle in Uranyl by Coordination to a 12-Membered Macrocyclic // *Inorg. Chem.* 2016. Vol. 55. No. 11. P. 5693–5701. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.6b00799.

REFERENCES

1. Taylor J.C., Wilson P.W. The structure of anhydrous uranyl chloride by powder neutron diffraction. *Acta Crystallogr. Sect. B. Struct. Crystallogr. Cryst. Chem.* 1973;B29(5):1073–1076.
2. Debets P.C. The structures of uranyl chloride and its hydrates. *Acta Crystallogr. Sect. B. Struct. Crystallogr. Cryst. Chem.* 1968;B24(3):400–402.
3. Davidovich R.L., Goreshnik E.A. Structural chemistry of fluoride complexes of uranyl. *Struct. Chem.* 2023;34(1):265–284.
4. Taylor J.C., Wilson P.W. The structure of uranyl chloride monohydrate by neutron diffraction and the disorder of the water molecule. *Acta Crystallogr. Sect. B. Struct. Crystallogr. Cryst. Chem.* 1974;B30(1):169–175.
5. Wilkerson M.P., Burns C.J., Paine R.T., Scott B.L. Synthesis and Crystal Structure of $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{THF})_3$: A Simple Preparation of an Anhydrous Uranyl Reagent. *Inorg. Chem.* 1999;38(18):4156–4158.
6. Keramidis A.D., Rikkou M.P., Drouza C., Raptopoulou C.P., Terzis A., Pashalidis A. Investigation on uranyl interaction with bioactive ligands. Synthesis and structural studies of the uranyl complexes with glycine and N-(2-mercaptopropionyl)glycine. *Radiochim. Acta.* 2002;90(9–11):549–554.
7. Charpin P., Lance M., Nierlich M., Vigner D., Marquet-Ellis H. Structure of Tris(N-tert-butylformamide)dichlorodioxouranium(VI). *Acta Crystallogr.* 1988;C44(8):1489–1490.
8. Smith P.A., Spano T.L., Burns P.C. Synthesis and structural characterization of a series of uranyl-betaine coordination complexes. *Z. Krist. Cryst. Mater.* 2018;233:507–513.
9. Bombieri G., Forsellini E., Day J.P., Azeez W.I. Crystal and molecular structure of dichlorodioxobis(triphenylphosphine oxide)uranium(VI). *J. Chem. Soc. Dalton Trans.* 1978;(6):677–680.
10. Akona S.B., Fawcett J., Holloway J.H., Russell D.R., Leban I. Structures of *cis*- and *trans*-dichlorodioxobis(triphenylphosphine oxide)uranium(VI). *Acta Crystallogr. Section C. Cryst. Struct. Commun.* 1991;C47(1):45–48.
11. Kannan S., Barnes C.L., Duval P.B. Versatile new uranyl(VI) dihalide complexes supported by tunable organic amide ligands. *Chem. Commun.* 2005;(48):5997–5998.
12. Das D., Vats B.G., Kannan S., Kumar M., Sureshkumar M.K. Synthetic and structural studies of piperidine carboxamide uranyl ion complexes. *Polyhedron.* 2014;81:39–44.
13. Vats B.G., Das D., Sadhu B., Kannan S., Pius I.C., Noronha D.M., Kumar M.P.B. Selective recognition of uranyl ions from bulk of thorium(IV) and lanthanide(III) ions by tetraalkyl urea: a combined experimental and quantum chemical study. *Dalton Trans.* 2016;45(25):10319–10325.
14. Russell J.C., du Plessis M.P., Nassimbeni L.R., du Preez J.G.H., Gellatly J.G.H. The Crystal and Molecular Structure of Dichlorobis(hexamethylphosphoramide)-dioxouranium(VI): $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot 2(\text{HMPA})$. *Acta Crystallogr. Sect. B. Struct. Crystallogr. Cryst. Chem.* 1977;B33:2062–2065.
15. Du Preez J.G.H., Gellatly B.J., Jackson G., Nassimbeni L.R., Rodgers A.L. The chemistry of uranium. Part 23. Isomorphous tetrachlorobis(hexamethylphosphoramide) uranium(IV) and tetrabromobis(hexamethylphosphoramide) uranium(IV). *Inorg. Chim. Acta.* 1978;27:181–184.
16. Julien R., Rodier N., Khodadad P. Structure Cristalline du Dioxodichloro Bis(hexamethylphosphorotriamide) Uranium(VI) $\text{UO}_2\text{Cl}_2\{\text{OP}[\text{N}(\text{CH}_3)_2]_3\}_2$. *Acta Crystallogr. Sect. B. Struct. Crystallogr. Cryst. Chem.* 1977;B33(8):2411–2414.
17. Häller L.J.L., Kaltsoyannis N., Sarsfield M.J., May I., Cornet S.M., Redmond M.P., Helliwell M.A. Structural and Theoretical Investigation of Equatorial *cis* and *trans* Uranyl Phosphinimine and Uranyl Phosphine Oxide Complexes $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PNH})_2$ and $\text{UO}_2\text{Cl}_2(\text{Cy}_3\text{PO})_2$. *Inorg. Chem.* 2007;46(12):4868–4875.

18. Weis E.M., Duval P.B., Jurisson S.S. Syntheses and structures of two uranyl complexes with DMPU. *Radiochim. Acta.* 2012;100(4):237–241.
19. Jacobs A., van Vuuren C.P.J., van Rooyen P.H. The solid-state chemistry of uranium. Part 3. The crystal structure and thermochemistry of dichloro-bis($N_1N_1N'_1N'_1$ -tetramethylurea)-dioxouranium(VI). *S. Afr. J. Chem.* 1986;39(4):174–178.
20. Sarsfield M.J., May I., Cornet S.M., Helliwell M. Preference for Nitrogen versus Oxygen Donor Coordination in Uranyl- and Neptunyl(VI) Complexes. *Inorg. Chem.* 2005;44(21):7310–7312.
21. Bertke J.A., Bunge S.D. Stable analogs of the uranyl ion containing 1,1,3,3-tetramethylguanidine. *Dalton Trans.* 2007;(41):4647–4649.
22. Oldham Jr. W.J., Oldham S.M., Smith W.H., Costa D.A., Scott B.L., Abney K.D. Synthesis and structure of N-heterocyclic carbene complexes of uranyl dichloride. *Chem. Commun.* 2001(15):1348–1349.
23. Kelley S.P., Smetana V., Nuss J.S., Dixon D.A., Vasiliu M., Mudring A.-V., Rogers R.D. Dehydration of $UO_2Cl_2 \cdot 3H_2O$ and $Nd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ with a Soft Donor Ligand and Comparison of Their Interactions through X-ray Diffraction and Theoretical Investigation. *Inorg. Chem.* 2020; 59:2861–2869.
24. Lhoste J., Henry N., Loiseau T., Guyot Y., Abraham F. Crystal structures of 2,2':6',2''-terpyridine uranyl chlorides molecular assemblies and their luminescence signatures. *Polyhedron.* 2013;50(1):321–327.
25. Copping R., Jeon B., Pemmaraju C.D., Wang S., Teat S.J., Janousch M., Tyliczszak T., Canning A., Grønbech-Jensen N., Prendergast D., Shuh D.K. Toward Equatorial Planarity about Uranyl: Synthesis and Structure of Tridentate Nitrogen-Donor $\{UO_2\}^{2+}$ Complexes. *Inorg. Chem.* 2014;53(5):2506–2515.
26. Berthet J.-C., Siffredi G., Thuéry P., Ephritikhine M. Synthesis and crystal structure of pentavalent uranyl complexes. The remarkable stability of UO_2X ($X = I, SO_3CF_3$) in non-aqueous solutions. *Dalton Trans.* 2009;(18):3478–3494.
27. Schöne S., Radoske T., März J., Stumpf T., Patzschke M., Ikeda-Ohno A. $[UO_2Cl_2(phen)_2]$, a Simple Uranium(VI) Compound with a Significantly Bent Uranyl Unit (phen=1,10-phenanthroline). *Chem. – A Eur. J.* 2017;23(55):13574–13578.
28. Pedrick E.A., Schultz J.W., Wu G., Mirica L.M., Hayton T.W. Perturbation of the O–U–O Angle in Uranyl by Coordination to a 12-Membered Macrocyclic. *Inorg. Chem.* 2016;55(11):5693–5701.

*Подписка на журнал «Вестник Дальневосточного отделения РАН»
принимается с любого номера Агентством подписки
и доставки периодических изданий Урал-Пресс (www.ural-press.ru).
Подписной индекс 70193 в Каталоге периодических изданий «Газеты и журналы»
Урал-Пресс.*

*Полнотекстовые варианты статей можно найти в Интернете:
<http://elibrary.ru/issues.asp?id=2774>, <http://journals.rcsi.science/0869-7698/issue/view/>*

Ответственные за номер: Г.И. Долгих, А.Г. Клыков
Над номером работали: В.С. Жердев, Л.А. Русова, Н.С. Мун, Г.А. Веренцова

Учредители
Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Российская академия наук»
119991, г. Москва, Ленинский просп., д. 14
Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Дальневосточное отделение
Российской академии наук»
690091, г. Владивосток, ул. Светланская, д. 50

Адрес редакции:
690091, Владивосток, ул. Светланская, 50, к. 51
Тел. +7(423)222-25-88
E-mail: vestnikdvo@hq.febras.ru
<https://vestdvoras.ru>

Издатель
Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Российская академия наук»
119991, Москва, Ленинский просп., д. 14
Исполнитель по контракту № 4У-ЕП-020-2-25
от 11.03.2025 ФГБУ «Издательство «Наука»
121099, г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1

Подписано к печати
Дата выхода в свет
Формат 70 × 108 1/16
Усл. печ. л.
Уч.-изд. л.
Тираж экз.

Отпечатано в ФГБУ «Издательство «Наука»
121099, г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1

Заказ
Цена свободная