Вестник Московского университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 1946 г.

Серия 5 **ГЕОГРАФИЯ**

2024 • Т. 79 • № 1

ЯНВАРЬ–ФЕВРАЛЬ

Издательство Московского университета

Выходит один раз в два месяца

Посвящается 270-летию Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

СОДЕРЖАНИЕ

География и экология

Пахомова О.М., Григорьев В.Ю., Сазонов А.А., Повалишникова Е.С., Фролова Н.Л. Гидрологический режим водотоков и проблемы водоснабжения населения в Республике Калмыкия 3

Битюкова В.Р., Дехнич В.С., Кравчик А.И., Касимов Н.С. Оценка влияния автономных систем отопления жилых строений на загрязнение воздуха в муниципальных образованиях (на примере Байкальского региона) 22

Афанасьева А.О., Лебедева С.А. Экологическое состояние участка «Оглахты» Хакасского заповедника по результатам наблюдений 2022 года 37

Методы географических исследований

Дюжова К.В. Субрецентные спорово-пыльцевые спектры аллювиальных отложений рек Дон и Кубань и их значение при палеогеографических реконструкциях 48

Эволюционная география

Лысенко Е.И., Ткач А.А., Макшаев Р.Р., Янина Т.А., Зенина М.А. Палеоэкологические условия в преддельтовом районе Северного Каспия в голоцене 61

Синюткина А.А., Гашкова Л.П., Харанжевская Ю.А. Пирогенное изменение болотной растительности и торфа в Западной Сибири 78

Региональные исследования

Ермолов А.А., Кажукало Г.А., Носков А.И., Огородов С.А. Рельеф дна Обской губы Карского моря 89

Романов А.А., Коблик Е.А., Редькин Я.А. Пространственная организация населения птиц островов Уруп и Итуруп (Курильские острова) 103

Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук Дж.Ю., Васильчук А.К., Еремина И.Д., Чижова Ю.Н. Вариации значений $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ атмосферных осадков Москвы в 2017–2019 гг. 114

Краткие сообщения

Жаринов С.Н., Голубева Е.И., Зимин М.В. Оценка пирогенного воздействия на лесные территории Тверской области 125

Смирнова А.А. Географические факторы ревитализации сельских населенных пунктов «без населения» 133

Куликова Ж.М., Добролюбов С.А. Объемные характеристики тихоокеанских вод в Северном Ледовитом океане 141

LOMONOSOV GEOGRAPHY JOURNAL

Dedicated to the 270th anniversary
of the Lomonosov Moscow State University

CONTENTS

Geography and ecology

Pakhomova O.M., Grigoriev V.Yu., Sazonov A.A., Povalishnikova E.S., Frolova N.L. Hydrological regime of water streams and the problems of public water supply in the Republic of Kalmykia 3

Bityukova V.R., Dekhnich V.S., Kravchik A.I., Kasimov N.S. Assessment of the impact of autonomous residential heating systems on air pollution in municipalities (case study of the Baikal region) 22

Afanaseva A.O., Lebedeva S.A. Ecological condition of the Oglakhty site of the Khakass Nature Reserve based on the results of 2022 observations 37

Methods of geographical studies

Dyuzhova K.V. Subrecent pollen assemblages in alluvial deposits of the Don and Kuban rivers and their significance for palaeogeographic reconstructions 48

Evolutionary geography

Lysenko E.I., Tkach A.A., Makshaev R.R., Yanina T.A., Zenina M.A. Palaeoecological situation in pre-delta area of the North Caspian Sea during the Holocene 61

Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Kharanzhevskaya Yu.A. Pyrogenic changes of bog vegetation and peat in Western Siberia 78

Regional studies

Ermolov A.A., Kazhukalo G.A., Noskov A.I., Ogorodov S.A. Seafloor morphology of the Ob River Gulf, Kara Sea 89

Romanov A.A., Koblik E.A., Redkin Y.A. Spatial organization of bird population of the Urup and Iturup Islands (Kuril Islands) 103

Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk J.Yu., Vasil'chuk A.C., Eremina I.D., Chizhova Yu.N. Variations of $\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$ values of precipitation in Moscow from 2017 to 2019 114

Short communications

Zharinov S.N., Golubeva E.I., Zimin M.V. Assessment of pyrogenic impact on forest areas in the Tver region 125

Smirnova A.A. Geographical factors of revitalization of rural settlements "without population" 133

Kulikova Zh.M., Dobrolyubov S.A. Volumetric characteristics of Pacific waters in the Arctic Ocean 141

© «Вестник Московского университета», 2024

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 556.18

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВОДОТОКОВ И ПРОБЛЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ КАЛМЫКИЯ

О.М. Пахомова[1], **В.Ю. Григорьев**[2], **А.А. Сазонов**[3], **Е.С. Повалишникова**[4], **Н.Л. Фролова**[5]

[1–5] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши*
[2–3] *Институт водных проблем Российской академии наук*

[1] *Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: olpah@mail.ru*
[2] *Мл. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: vadim308g@mail.ru*
[3] *Ст. преподаватель, канд. геогр. наук; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com*
[4] *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: elenapovalishnikova@gmail.com*
[5] *Проф., д-р геогр. наук; e-mail: frolova_nl@mail.ru*

Постоянный дефицит пресной воды для питьевого и коммунально-бытового использования в Республике Калмыкия в последнее время ощущается критически остро. Это связано как с природным факторами (увеличивающейся засушливостью климата, ограниченностью запасов пресных поверхностных и подземных вод, отсутствием достаточно протяженных участков крупных рек с постоянным стоком), так и с изношенностью гидротехнических сооружений. Эксплуатация подземных вод на существующих месторождениях привела к их истощению и ухудшению качества, при этом крупные месторождения пресных и слабосолоноватых подземных вод юга Прикаспия невозможно использовать из-за повышенного содержания в них загрязняющих веществ. Ремонт старых и строительство новых водоводов от р. Волги требуют постоянных значительных финансовых вложений федерального уровня, поэтому в последние годы активно обсуждается новый способ увеличения запаса пресных вод, пригодных для питьевого водоснабжения, – искусственное пополнение подземных вод (ИППВ). В статье дается современная оценка водных ресурсов малоизученного поверхностного стока рек Калмыкии, рассмотрены возможность и целесообразность создания инфильтрационных бассейнов для пополнения запасов подземных вод, рассчитаны параметры и режим работы пяти планируемых бассейнов.

Основным источником пресных поверхностных вод в Калмыкии являются реки Ергенинской возвышенности, среднемноголетний современный сток с восточного склона которой оценен в 0,120 км^3/год, с западного – в 0,105 и с южного – в 0,045 км^3/год. Установлены тенденции современного изменения гидрологического режима рек под влиянием изменений климата: сокращение годового стока и его внутригодовое перераспределение с сокращением весеннего половодья, незначительным ростом зимнего стока и выравниванием летнего меженного. Расчет режима функционирования планируемых инфильтрационных бассейнов позволил сделать следующие выводы: максимально возможный объем суммарной инфильтрации в них составит около 923 тыс. м^3/год, что в 8,7 раза меньше современного водозабора из Троицкого и Баярнинского месторождений для водоснабжения населения республики; достаточно эффективная работа бассейнов возможна только при ежегодной очистке водохранилищ-отстойников от накапливающихся иловых отложений, в противном случае коэффициент фильтрации грунтов будет сокращаться, что приведет к снижению инфильтрационного питания в десятки раз. Таким образом, ИППВ могут быть только временной мерой, восполняющей снижение уровня грунтовых вод, до реконструкции и строительства новых водоводов от Волги для обеспечения водоснабжения Элисты и окрестностей питьевой водой приемлемого качества.

Ключевые слова: водные ресурсы, подземные воды, Ергенинская возвышенность, искусственные инфильтрационные бассейны, скорость инфильтрации, расчет гидрографа, изменение климата

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.1

ВВЕДЕНИЕ

Республика Калмыкия (РК) большей частью расположена в Прикаспийской низменности, на западе – частично на Ергенинской возвышенности, выполняющей роль водораздела между бассейнами Дона и Каспийского моря. Ширина возвышенности

на территории РК составляет 50–80 км. В среднем абсолютные высоты составляют около 120–140 м, возрастая на юге до 218 м. В пределах республики выделяются четыре природные зоны: степная – 0,24 млн га, сухостепная – 2,18 млн га, полупустынная – 2,93 млн га, пустынная – 2,24 млн га. Это один из самых засушливых регионов страны. В пределах РК проживает 264 210 чел. (на 2023 г.), из которых около 103 тыс. – в г. Элисте.

Гидрологический режим водотоков РК слабо изучен, что связано, главным образом, с отсутствием постоянных водотоков, сток которых мог бы использоваться для водоснабжения. Значительная часть территории РК зачастую отмечается как не имеющая поверхностного стока [Водные ресурсы России…, 2008; Гидрохимический сток рек…, 2020]. Всего на территории РК имеется 313 водных объектов, из них 144 водохранилища, 139 прудов, 11 противопаводковых сооружений, 15 озер, имеющих комплексное хозяйственное значение, четыре накопителя сточных вод [Габунщин, 2009].

Преобладающее количество водных ресурсов в регионе сосредоточено в озерах: Маныч-Гудило, Ханата, Сарпа, Деед Хулсун, Состинских, являющихся приемниками сточных вод, поэтому вода в них не пригодна для питьевого водоснабжения [Хочаева, Васильева, 2017]. На территории Калмыкии 43 малых водотока, суммарной протяженностью 2078 км, а также средние и большие реки, такие как Кума, Маныч и др., общей протяженностью 520 км. Гидрографическая сеть РК развита очень слабо. На севере модуль стока левобережных притоков Дона составляет 0,5–1,0 л/с·км^2. Южнее из-за сухого и жаркого климата модуль стока уменьшается до 0, часто наблюдается пересыхание водотоков, стекающих со склонов Ергенинской возвышенности. Реки восточной части РК относятся к бассейну Волги. На юго-западе водотоки относятся к бассейнам Кумы и Маныча. Гидрографическая сеть по территории республики распределена неравномерно: основная часть водотоков сосредоточена на западе Калмыкии и стекает с восточных склонов Ергенинской возвышенности (рис. 1). Небольшие водотоки, стекающие по многочисленным балкам Ергенинской возвышенности, образуют лиманы, зачастую летом пересыхающие. Главными искусственными водными магистралями являются Кумо-Манычский и Черноземельский каналы, используемые для переброски стока рек. Суммарная водосборная площадь в пределах территории Калмыкии составляет 74,8 тыс км^2.

Гидрологическая изученность района чрезвычайно слабая, в настоящее время действует один гидрологический пост, расположенный в балке Амта-Бургуста в поселке Кетченеры (см. рис. 1), в остальных районах Калмыкии, в том числе на территории Прикаспийской низменности, на озерах и в крупных городах наблюдения не ведутся.

Централизованное хозяйственно-питьевое водоснабжение населения РК осуществляется за счет подземных и поверхностных вод. Основная доля поверхностного стока формируется в реках с площадью водосбора 30–780 км^2 и длиной 20–60 км и балках (их около 40) на восточной части Ергенинской возвышенности. По предварительным данным в 2022 г. доля подземных вод (ПВ) в балансе хозяйственно-питьевого водоснабжения в РК составила 57,2%, в г. Элисте – 63,9% [Справка…, 2023]. Прогнозные ресурсы подземных вод в РК составляют 1,6 млн м^3/сут, из которых 69,4 тыс. м^3/сут (4,2%) разведаны [Махота, Ершов, 2010]. Добыча подземных вод в РК достигает 24,8 тыс. м^3/сут. В 2017 г. в РК превышение гигиенических нормативов по санитарно-химическим показателям отмечалось в 35,7% проб воды из водоемов первой категории водопользования, используемых в качестве источников питьевого и хозяйственно-бытового водопользования, и в 52,3% проб воды из водоемов второй категории, используемых для рекреационных целей. Процент обеспеченности качественным водоснабжением городских жителей в среднем по России – 92,5%, в Калмыкии же этот показатель составляет 0%. В частности, в Элисте минерализация водопроводной воды достигает 2–2,2 г/дм^3 при нормативе для питьевой воды 1 г/дм^3. Эта вода Роспотребнадзором вынужденно признана питьевой по причине отсутствия иных источников водоснабжения. В 2021 г. питьевой водой приемлемого качества из централизованных систем водоснабжения было обеспечено всего 7,5% населения Калмыкии, учитывая, что по согласованию с Роспотребнадзором для питьевого водоснабжения используются солоноватые воды с минерализацией до 1,5 г/дм^3.

Хозяйственно-питьевое водоснабжение населения Элисты, в частности, осуществляется подземными водами миоцен-плиоценового (ергенинского) водоносного горизонта водозаборов «Верхнеяшкульский» (Троицкое месторождение подземных вод (МПВ) с дебитом 30 тыс. м^3/сут) и «Баяртинский» (Баяртинское МПВ с дебитом 20 тыс. м^3/сут), расположенных к северу от столицы. В 2022 г. суммарная добыча пресных ПВ, извлекаемых на территории РК, составила 23,14 тыс. м^3/сут, из них на месторождениях – 22,65 тыс. м^3/сут. Для водоснабжения Элисты добыча составила 21,6 тыс. м^3/сут. Ергенинский водоносный горизонт в пределах РК обладает ре-

сурсами подземных вод в 90 тыс. м^3/сут при минерализации менее 1 г/дм^3 и 115–145 тыс. м^3/сут при минерализации от 1 до 1,5 г/дм^3 [Бембеев, Щипицын, 2005; Цуркан, 1993а]. Освоение запасов ПВ в целом по территории РК составляет 39,7%, для г. Элисты – 47,0%. В 2022 г. в ергенинском водоносном горизонте отмечались повышенные величины минерализации (1,1–1,4 ПДК), жесткости (1,3 ПДК), натрия (1,2–2,5 ПДК), хлоридов (1,1–1,9 ПДК), железа (3,0–6,3 ПДК), марганца (7,9 ПДК) [Справка…, 2023].

Основными причинами низкого качества питьевой воды, подаваемой населению, являются: природное загрязнение вод источников питьевого водоснабжения; отсутствие зон санитарной охраны, обустроенных в соответствии с действующими требованиями; недостаточная эффективность технологий обработки воды в связи с отсутствием современного комплекса водоподготовки и обеззараживания; высокая степень износа водоочистных сооружений (установок для забора воды, оборудования насосных станций, станций очистки воды или водоподготовки, водопроводных сетей, резервуаров для обеспечения водой и пр.); ненадлежащее содержание колодцев и каптажей, слабая защищенность подземных водоносных горизонтов от поверхностного загрязнения, сброс неочищенных сточных вод [Схема…, 2014]. Среди источников загрязнения подземных вод в районе Элисты можно отдельно выделить свалки бытовых отходов и поля фильтрации очистных сооружений.

В Прикаспийской части РК сложилась критическая ситуация – распространенные там небольшие линзы пресных и слабоминерализованных подземных вод характеризуются сложными гидрогеологическими условиями залегания, при этом крупные месторождения пресных и слабосолоноватых подземных вод юга Прикаспия невозможно использовать из-за повышенного содержания в них загрязняющих веществ: мышьяка, фенолов, ароматических углеводородов и бора. Использование опреснительных установок для водоснабжения в Калмыкии не получило широкого распространения в основном из-за отсутствия разработанных методик, стоимости опресненной воды и из-за проблем с утилизацией рассолов после опреснения.

Система водоснабжения РК включает в себя ~121 насосную станцию водопровода первого и второго подъемов, пять очистных сооружений водопровода, семь канализационных насосных станций, одно очистное сооружение канализации. Протяженность сетей водоснабжения составляет 1543,92 км. Уровень износа объектов водоснабжения по официальным данным свыше 30%.

Традиционно для пополнения запасов пресных вод в РК использовались водоводы от р. Волги, но из-за сильной изношенности гидротехнических сооружений, протечек и неподконтрольных изъятий стока по пути от Волги до Элисты теряется более 50% подводимого стока [Схема…, 2014]. Стоимость строительства нового водопровода от Волги до Калмыкии оценена в 14 млрд р. [Строительство…, 2022].

В рамках региональной комплексной программы «Чистая вода» на 2009–2022 гг., принятой правительством РК [О региональной…, 2009], было предусмотрено строительство ряда объектов водоснабжения и водоотведения.

Таким образом, вопрос обеспечения населения качественной питьевой водой стоит в республике крайне остро, а современное состояние питьевого водоснабжения РК можно охарактеризовать как критическое. Положение осложняет наблюдающееся изменение климата, которое на территории Калмыкии проявляет себя прежде всего в росте температуры воздуха и сопутствующего увеличения испарения, что очевидно влияет на динамику и высоту снежного покрова, запасы воды в снеге и почве и в итоге отражается на запасах поверхностных и подземных вод.

Исходя из вышеизложенного, была сформулирована следующая цель настоящего исследования: проанализировать основные гидрометеорологические факторы формирования стока и современный гидрологический режим водотоков Ергенинской возвышенности (основных поверхностных источников водоснабжения населенных пунктов Калмыкии) с учетом изменяющегося климата, а также рассмотреть один из возможных вариантов покрытия дефицита водных ресурсов в республике путем формирования искусственных подземных источников водоснабжения как аккумуляторов поверхностного стока.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно имеющимся данным, рост температуры воздуха в регионе начался в первой четверти XX в. [IPCC, 2013]. Потепление проходило в две волны: 1910–1945 гг. и наиболее интенсивное после 1976 г. с периодом относительной стабильности температуры воздуха в 1946–1975 гг. [Ранькова и др., 2014]. Середина 1970-х гг. рассматривалась как годы «климатического сдвига» [Полонский, Башарин, 2008]. Для юго-востока европейской части России наиболее интенсивный рост температуры воздуха начался с конца 1980-х гг. По этой причине оценка изменений метеорологических характеристик проводилась с 1976 г., а их средние значения рассчитывались отдельно для периода до и после 1976 г.

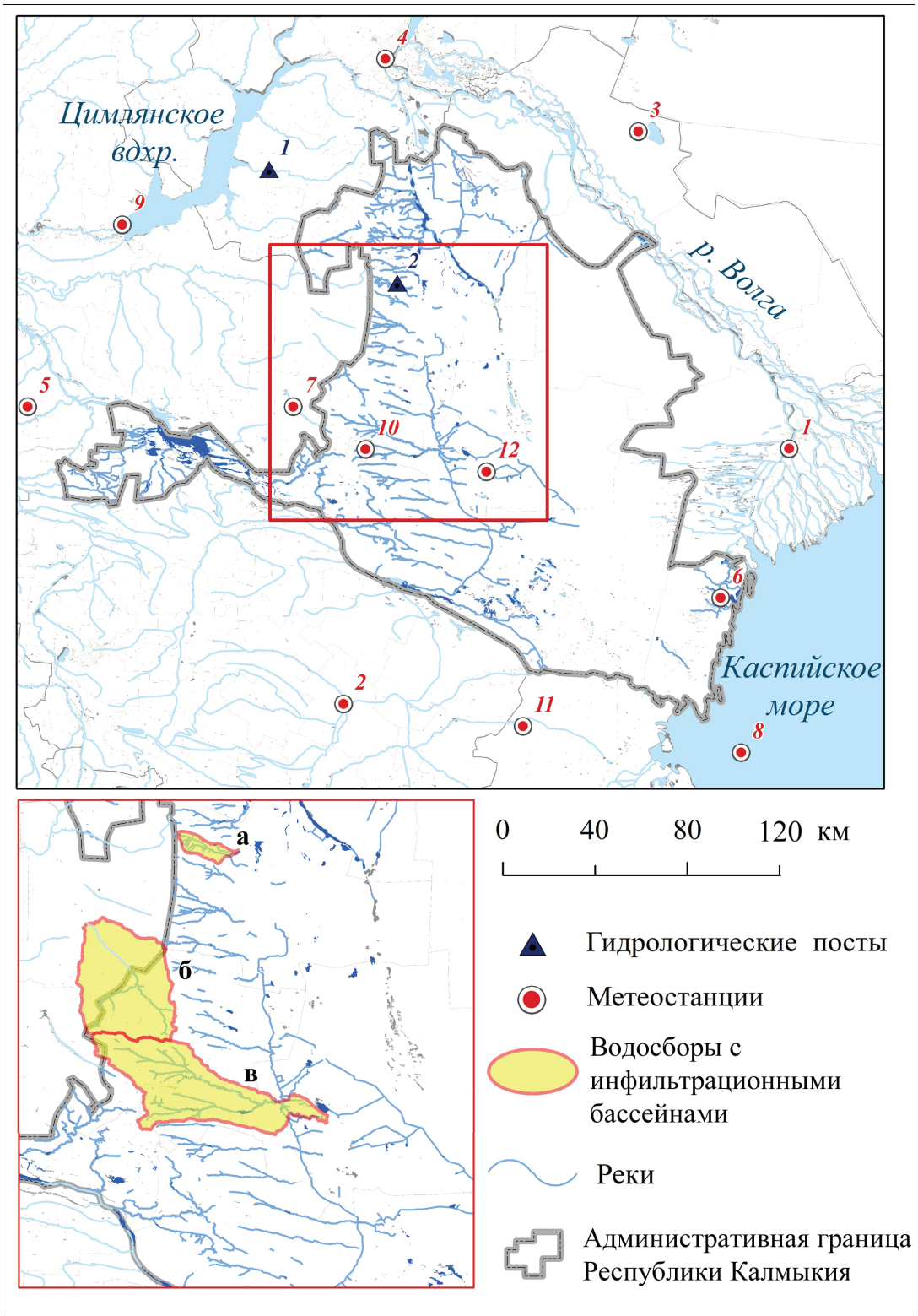


Рис. 1. Гидрографическая сеть Республики Калмыкия с опорными расчетными створами и метеостанциями. *Метеостанции:* 1 – Астрахань; 2 – Буденновск; 3 – Верхний Баскунчак; 4 – Волгоград; 5 – Гигант; 6 – Лагань; 7 – Ремонтное; 8 – о. Тюлений; 9 – Цимлянск; 10 – Элиста; 11 – Южно-Сухумск; 12 – Яшкуль. *Гидрологические посты:* 1 – р. Аксай Есауловский – х. Водянский; 2 – р. Амта-Бургуста – п. Кетченеры. *Водосборы рек с планируемыми инфильтрационными бассейнами:* а – р. Амта-Бургуста; б – б. Загиста; в – р. Яшкуль

Fig. 1. Hydrographic network of the Republic of Kalmykia with reference cross-sections and weather stations. *Weather stations*: 1 – Astrakhan; 2 – Budennovsk; 3 – Upper Baskunchak; 4 – Volgograd; 5 – Giant; 6 – Lagan; 7 – Remontnoe; 8 – Tyulenij Island; 9 – Tsimlyansk; 10 – Elista; 11 – Yuzhno-Sukhumsk; 12 – Yashkul. *Hydrological posts*: 1 – r. Aksai Esaulovsky – farm Vodyansky; 2 – r. Amta-Burgusta – Ketchenery village. *River catchments with planned infiltration basins*: a – r. Amta-Burgusta; б – Zagista gulch; в – r. Yashkul

Наиболее важным для формирования водных ресурсов в любом бассейне является период весеннего половодья, основными факторами формирования которого являются запасы воды в снежном покрове, влажность и промерзание почвы, наличие зимних оттепелей и дружность снеготаяния [Варенцова и др., 2022]. Для анализа динамики высоты снежного покрова в РК были выбраны 10 метеостанций с малым числом пропусков в рядах наблюдений за 1976–2020 гг. (см. рис. 1). Поскольку на территории Калмыкии снегомерные съемки не проводятся, запасы воды в снежном покрове были оценены единственно возможным методом – дистанционным, по данным проекта GlobSnow 3 [GlobSnow, 2022]. Однако в условиях неустойчивой, прерываемой оттепелями зимы ошибка определения может возрастать. Чтобы минимизировать возможную величину ошибки анализ был проведен по среднемесячным значениям запасов за февраль и март.

Влажность почвы как характеристика, влияющая на величину потерь стока половодья, анализировалась по данным архива ERA-5 Land, полученным на основе работы модели H-TESSEL и реанализа ERA-5 за 1981–2020 гг. [Hersbach и др., 2020].

Динамика годового и сезонного стоков была проанализирована по данным двух гидрологических постов: на малой реке Амта-Бургуста в одноименной балке и на р. Аксай Есауловкий (х. Водянский, 48,0° с. ш., 43,4° в. д.) [Автоматизированная…, 2022]. Амта-Бургуста – малая река в Кетченеровском районе Калмыкии. Берет свое начало в северных Ергенях в балке Амта-Бургуста и течет преимущественно с запада на восток. Теряется у подножия Ергеней на Прикаспийской низменности близ поселка Бургсун. Длина реки – 23 км, площадь водосборного бассейна – 99 км². Река Аксай Есауловкий (длина 179 км, площадь бассейна – 2588 км²) – левый приток Дона – была выбрана в качестве подходящего по условиям формирования стока и площади бассейна аналога (за неимением других данных натурных наблюдений). В связи со слабой гидрологической изученностью региона расчет средних и характерных расходов воды рек Ергенинской возвышенности проводился в соответствии с [СП 33-101-2003…, 2004; СНиП-2.01.14-1983, 1985; Атлас…, 1986] для малоизученных рек и при отсутствии материалов гидрометрических наблюдений. Оценка качества расчетов по методикам проверена по данным гидропоста Кетченеры в балке Амта-Бургуста (опорного створа для восточного и южного склонов Ергенинской возвышенности) и гидропоста х. Водянский на р. Аксай Есауловский (опорного створа для западного склона Ергенинской возвышенности).

В данной статье рассмотрен один из способов решения проблемы дефицита водных ресурсов в аридных районах с целью водообеспечения населения – искусственное пополнение запасов подземных вод (ИППВ) водами приемлемого качества за счет аккумуляции в подземных резервуарах весеннего талого стока.

ИППВ – комплекс инженерных мероприятий, направленных на увеличение питания подземных вод, а также на улучшение качества добываемой воды. Необходимые условия для создания систем ИППВ – наличие потребителей, водоносного горизонта, удовлетворяющего критериям емкостных и фильтрационных свойств; наличие возможного источника восполнения подземных вод определенного качества. В районе Ергенинской возвышенности существует значительная потребность в водных ресурсах, но отсутствуют источник восполнения и емкость для аккумуляции воды [Зекцер и др., 2012]. Тем не менее в работах [Искусственное…, 2005; Цуркан, 1993а; Цуркан 1993б] обосновывается возможность строительства подземных инфильтрационных бассейнов, создание которых зависит не только от фильтрационных свойств пород, но в большей степени от объема стока и режима водотоков Ергенинской возвышенности.

Согласно [Плотников, 1983], наиболее благоприятные для искусственного восполнения – водоносные горизонты аллювиальных отложений речных долин, реже – конусы выноса и водоносные горизонты дочетвертичных терригенных и карбонатных пород. Принято считать, что искусственное восполнение эффективно, если у водовмещающих отложений коэффициент фильтрации не менее 20 м/сут, мощность не менее 10 м, проводимость не менее 100 м²/сут [Зекцер и др., 2012]. В долинах рек инфильтрационные бассейны рекомендуется располагать либо на пойме, либо на первой надпойменной террасе.

Для оценки возможности проектирования и успешного функционирования инфильтрационных бассейнов в процессе исследования были проведены расчеты:

– коэффициентов инфильтрации водовмещающих водоносных горизонтов;

– гидрографа фильтрующихся вод;

– основных параметров и режима работы инфильтрационных бассейнов.

Расчет величины инфильтрации из инфильтрационного бассейна. Согласно [Bouwer, 1978], величина инфильтрации в слое *i* рассчитывалась как

$$V = K\frac{H + l - h}{l}, \qquad (1)$$

где V – скорость инфильтрации (расход) в i-м слое, K – коэффициент инфильтрации в промоченной

зоне, H – высота слоя воды над водоупором (глубина воды в инфильтрационном бассейне), l – глубина промоченного слоя. Величина капиллярного всасывания h (с учетом преобладания суглинков с прослоями песка в зоне аэрации) для Ергенинской возвышенности может быть выбрана равной 25 см [Bouwer et al., 1999]. Отметим, что K не совпадает с коэффициентом фильтрации ($K_ф$) в водонасыщенной зоне. Для песка $K \approx 0{,}5K_ф$, для глин $K \approx 0{,}25K_ф$.

При достаточно мощной водоненасыщенной зоне дробь в формуле (1) достигает 1 за время, много меньшее, чем продолжительность инфильтрации. В результате для практических целей можно принять $V = K$. Однако формула (1) может давать завышенные результаты при $l < H$, что характерно для балок долин, где l близко к 0. Также формула (1) дает завышенные результаты, если скорость инфильтрации значительно больше скорости движения в водоносном горизонте. В обоих случаях образуется гидрокупол (groundwater mounding). Если вершина купола достигает дна инфильтрационного бассейна, градиент напора становится менее 1. По этой причине для расчета V использовалась регрессионная зависимость, представленная в [Massmann et al., 2003]:

$$V = K\frac{H+l}{47{,}6K_ф^{0{,}1}}C_F, \qquad (2)$$

где H, l и K аналогичны формуле (1), $K_ф$ – коэффициент фильтрации, C_F – коэффициент, учитывающий размеры инфильтрационного пруда:

$$C_F = 402{,}5F^{-0{,}76}, \qquad (3)$$

где F – площадь инфильтрационного бассейна. При этом $0{,}2 < C_F < 1$. К нему вводились два поправочных коэффициента. Первый учитывал геометрию бассейна (C_{F1}) [Massmann et al., 2003]:

$$C_{F1} = 0{,}98 + 0{,}02 \cdot L/B, \qquad (4)$$

где L – длина бассейна, а B – его ширина (при этом $C_{F1} < 1{,}4$); второй – заиление, кольматацию и обрастание дна инфильтрационного бассейна (C_{F2}). Последний с учетом физико-географических особенностей Калмыкии был принят равным 0,6. При этом его величина уменьшается со временем. В случае если условия эксплуатации инфильтрационных бассейнов не соблюдаются, величина инфильтрационного питания может уменьшиться на один-два порядка.

Информация о фильтрационных свойствах грунтов балок и оврагов Ергенинской возвышенности была получена из [Махота, Ершов, 2010], где приводятся сведения опытных откачек и моделирования режима подземных вод Троицкого и Барятинского месторождений. Расчетные значения $K_ф$ для пород зоны аэрации, представленных аллювиально-делювиальными суглинками и глинами с прослоями песка, изменяются от 1,1 м/сут до 2,69 м/сут, при среднем значении 1,93 м/сут. Величина коэффициента K для русловых и пойменных отложений, представленных в основном средними суглинками, составляет 0,4–0,6 м/сут. $K_ф$ для аллювиально-делювиальных отложений (прослоев песка и супеси в глинах и суглинках) составляет порядка 0,4 м/сут. $K_ф$ ергенинского водоносного горизонта – 20 м/сут.

Поскольку искусственное восполнение подземных вод планировалось через выходы песков ергенинского водоносного горизонта, $K_ф$ был принят равным 12 м/сут [Махов, Ершов, 2010], а $K = 0{,}5K_ф$. Коэффициент фильтрации ($K_ф$) илистого слоя после его осушения сравнительно высок и изменяется от 0,03 до 0,05 м/сут. Таким образом, можно предположить, что $K_ф$ инфильтрационного бассейна в результате его многолетней эксплуатации и формирования слоя илистых отложений в начале сезона восполнения (когда в нем еще сохранились трещины после осушки) может составить 0,05 м/сут. Определенную оценку величины $K_ф$ при условии отсутствия чистки дна инфильтрационного бассейна, а также при условии целостности слоя илистых отложений могут дать сведения о скорости фильтрации из пруда в долине р. Яшкуль, составляющие 0,002–0,004 м/сут.

Расчет притока воды к инфильтрационному бассейну (гидрографа) осуществлялся в два этапа. На первом этапе для выбранных створов определялся средний слой стока, его коэффициент вариации (C_v) и асимметрии (C_s). Принималось, что распределение годового стока подчиняется обобщенному распределению экстремальных величин GEV.

Использование GEV в качестве модели годового стока объясняется особенностями его формирования: практически весь годовой сток проходит пиками половодья, а в отдельные годы возможно его отсутствие. С помощью генератора случайных чисел было получено 1000 значений вероятности p от 0 до 1, на основании которых по заданной GEV был сгенерирован многолетний ряд слоя стока у за январь–май. Для модели внутригодового распределения стока были использованы данные наблюдений на посту б. Амта-Бургуста – с. Кетченеры. Ряд стока на р. Амта-Бургуста (1959–2018 гг.) был поделен на три категории в зависимости от величины эмпирической обеспеченности слоя стока за январь–май: маловодные ($p > 66{,}6\%$), средние по водности ($33{,}3 < p < 66{,}6\%$) и многоводные ($p < 33{,}3\%$) годы. Дальнейший расчет происходил по схеме метода реального года [Рекомендации…, 1975].

Расчет режима работы инфильтрационных бассейнов проводился по приведенным выше формулам для разных сценариев обеспеченности поверхностного стока, исходя из следующих предположений:

– перед поступлением на инфильтрационные бассейны речная вода отстаивалась в водохранилищах-отстойниках, расположенных выше инфильтрационных бассейнов;

– на 1 ноября водохранилище считалось пустым;

– параметры для функции распределения вероятности объема годового стока брались согласно [Атлас…, 1986];

– внутрисезонное распределение стока бралось по данным б. Амта-Баргуста;

– в силу того что величина испарения в ноябре–мае с поверхности водосбора близка к величине потенциального испарения, дополнительные потери на испарение с водной поверхности считались равными 0;

– дополнительные потери на смачивание зоны аэрации при заполнении водохранилища зависели, среди прочего, от уровня грунтовых вод и степени промачивания почвы в долинах рек после прохождения половодья. Величина потерь считалась постоянной и равной 50 мм. Величина потерь относилась на начало периода питания (1 ноября);

– наполнение водохранилища происходило с ноября по февраль. В дальнейшем этой водой пополнялись подземные воды. Сток воды за март – май не задерживался в водохранилище и проходил транзитом. В течение марта вода в водохранилище отстаивалась. Непосредственно ИППВ осуществлялось с апреля по май;

– расчеты инфильтрации производились для 25 вариантов, учитывающих различные комбинации возможного объема водохранилища и коэффициента фильтрации;

– площадь покрытия водой дна инфильтрационного бассейна не зависела от уровня воды в нем;

– расстояние между дном инфильтрационного бассейна и уровнем воды в ергенинском водоносном горизонте на основе данных [Махота, Ершов, 2010] было принято равным 15 м;

– с 1 апреля по 30 мая в результате заиления и обрастания дна инфильтрационных бассейнов коэффициент фильтрации толщи грунтов, слагающих их дно, убывал от начального значения до 66,6% от него;

– первого июня независимо от степени наполненности водохранилища они полностью срабатывались;

– для расчета скорости фильтрации использовалась формула (2). Для инфильтрационных бассейнов в долине р. Яшкуль коэффициент C_{F2} составил 0,8. Для инфильтрационного бассейна в долине Хурын-Сала – $C_{F2} = 1$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Главный источник питания рек и балок Калмыкии – осадки, выпадающие в холодную часть года. Роль дождевого питания невелика. На большинстве водотоков весь сток проходит весной в течение 30–50 дней, иногда этот временной интервал сокращается до 10 дней. На долю весеннего половодья приходится около 70–90% годового стока, таким образом, можно сказать, что в соответствии с классификацией М.И. Львовича, питание рек республики исключительно снеговое. В южной части Ергенинской возвышенности все водотоки представляют собой сухие балки, в которых наблюдается сток только в период весеннего снеготаяния и обильных дождей. Продолжительность весеннего половодья колеблется в довольно широких пределах в зависимости от размеров водосбора, интенсивности и продолжительности снеготаяния, которое может продолжаться от 1–3 дней на очень малых балках при дружной весне до двух и более недель на более крупных реках при затяжном снеготаянии. Большинство балок и рек непосредственно после весеннего половодья пересыхают и остаются без воды до следующего года. Круглогодичный сток наблюдается на реках, питание которых дополняется родниковыми водами: Аршань-Зельмень, Амта-Бургуста, Кара-Сал, Соленая, Яшкуль, Элистинка, Наин-Шара и др. На территории республики выявлено всего 110 родников, приуроченных, как правило, к среднему течению рек [Мимишев и др., 2018]. Питание за счет подземных вод незначительно, уменьшается с севера на юг и зависит от размеров водосбора, возрастая с увеличением последнего. Еще одной причиной круглогодичного стока может служить поступление сточных вод.

Проведенные расчеты неизученного стока основных рек и балок Ергенинской возвышенности позволили оценить величину поверхностных водных ресурсов региона и потенциал их дальнейшего использования. Впервые для этого региона получено столь полное представление о годовом и сезонном поверхностном стоке (табл. 1). Для водотоков в балках Яшкуль, Загиста и Хурын-Сала проведена оценка среднегодовых и сезонных расходов требуемой обеспеченности для участков месторождений подземных вод (Троицкое и Баяртинское), в пределах которых планируется создание системы ИППВ. На р. Яшкуль это пос. Верхний Яшкуль (F = 455 км^2). В устье б. Хурын-Сала в месте предполагаемой плотины F = 117 км^2. Для створов планируемых плотин рассчитаны соответствующие объемы стока годового и максимального за половодье: для створа р. Яшкуль – с. Троицкое – 7,2; 5,65 млн м^3 (при планируемом объеме водохранилища 3–3,5 млн м^3), для устья б. Хурын-

Сала – 1,29; 1,04 млн м^3 (при планируемом объеме водохранилища – 1–1,5 млн м^3) соответственно и проведены дополнительные расчеты годовых и сезонных расходов воды требуемой обеспеченности (табл. 2).

Оценка климатических условий формирования половодья. Средняя дата появления снежного покрова в РК варьирует от 21 ноября (на севере) до 21 декабря (о. Тюлений). Наиболее позднее установление снежного покрова (3 декабря) отмечается в центральной части республики (п. Яшкуль). Сход снежного покрова начинается в среднем с 22 февраля от побережья Каспия и заканчивается 23 марта на севере республики. Продолжительность залегания снежного покрова, таким образом, варьирует от 92 суток на севере до 23 суток на юге Калмыкии. Средняя максимальная высота снежного покрова в течение зимы незначительна, но также имеет четкую пространственную дифференциацию от 27,4 см в северных районах до 7,7 см на Каспийском побережье. При этом в течение зимы во время оттепелей снежный покров может полностью сходит на период от одного до нескольких дней.

В результате проведенного анализа метеорологических рядов были выявлены следующие современные климатические тенденции:

– в наименьшей степени изменения климата коснулись юго-восточной и западной частей Калмыкии;

– на всей территории Калмыкии отмечено сокращение продолжительности залегания снежного покрова, причем наименьшее – на побережье Каспия (от 1 дня/10 лет на о. Тюлений) и наибольшее на севере и северо-западе республики (до 9 дней/10 лет, мс Ремонтное);

– отмечен сдвиг даты схода снежного покрова в северных и центральных районах Калмыкии на более поздние сроки, в южных районах снег стал сходить чуть раньше;

– в северных и северо-западных районах выявлен незначительный рост числа периодов без снега в течение сезона;

– средняя и максимальная высота снежного покрова при этом практически не изменилась, таким образом, можно сделать вывод об отсутствии значимых изменений в величине запаса воды в снежном покрове – главном источнике весеннего питания рек и формирования основной доли их годового стока.

Максимальный запас воды в снежном покрове, по данным [GlobSnow, 2022], на рассматриваемой территории наблюдается в феврале и имеет широтную закономерность распространения: от >7 мм на южной оконечности Ергеней, до ~20 мм на северной. В марте в южной и центральной части Калмыкии снег зачастую отсутствует, в результате чего среднемесячные величины запасов воды в снежном покрове составляют первые миллиметры (<5 мм).

Поскольку в ряде случаев половодье на реках Ергенинской возвышенности начинается уже в январе, многолетняя динамика влажности почвы анализировалась по данным за декабрь в верхнем метровом слое [ERA5-Land, 2022]. Было установлено, что в 1981–2019 гг. влажность почвы в декабре практически на всей территории Калмыкии снижалась, причем наиболее интенсивно (>3,8%/10 лет) в северных, более увлажненных районах Ергеней (рис. 2). Вероятно, это связано с тем, что в южных районах в декабре регулярно бывают оттепели, во время которых влажность почвы растет за счет таяния снежного покрова и выпадения жидких осадков. С ростом температуры воздуха оттепели стали случаться чаще.

До 2005 г. влажность почвы составляла в среднем 0,253. Однако с 2006 г. наметилась тенденция ее уменьшения, и за 2006–2019 гг. ее средняя величина опустилась до 0,225, с минимумом в декабре 2012 г. – 0,176. Уменьшение влажности почвы влечет за собой рост потерь весеннего стока на фильтрацию в грунты.

Оценка изменения годового и сезонного стока. Статистически значимое сокращение годового стока и наиболее заметное его внутрисезонное перераспределение в южных районах России (в частности в бассейне Дона) отмечено в [Kireeva et al., 2016, 2019; Джамалов и др., 2017; Blöschl et al., 2019; Варенцова и др., 2021] и подтверждается нашим анализом. Так, в бассейне р. Есауловский Аксай сокращение годового стока за последние 40 лет достигает 32% и является статистически значимым. С 2003 по 2020 гг. в бассейне Аксая, как на многих других реках бассейна Дона, наблюдалось затяжное маловодье (рис. 3). При общем сокращении годового стока отмечено выравнивание его внутригодового распределения за счет сокращения половодья и выравнивания меженных расходов (уменьшения амплитуды их колебаний).

Оценка особенностей формирования стока на водосборах аридных зон в современных условиях изменения климата была проведена на основе опубликованных ранее результатов научных исследований [Барабанов и др., 2018; Коронкевич и др., 2018; Долгов и др., 2020], в которых формирование стока с гидрографической сети в пределах бровок речной долины и склонового стока водораздельных поверхностей рассматривалось отдельно. По результатам этих исследований на севере Ергенинской возвышенности после 1980 г. было отмечено заметное сокращение склонового стока с зяби на 83% (с 6 до 1 мм), а с уплотненной пашни на 70% (с 23 до 7 мм). В результате подобных изменений, согласно [Коронкевич и др., 2018], в степной зоне после 2000 г. произошло изменение источников питания половодья.

Таблица 1

Среднемноголетние годовые и сезонные характеристики стока водотоков Ергенинской возвышенности

Названия рек и балок	Площадь водосбора, км²	Модуль стока, л/с×км²	Среднегодовой расход воды, м³/с				Максимальный расход воды половодья, м³/с			Минимальный 30-суточный расход Q_{50}, м³/с		
			Q_0	Q_5	Q_{50}	Q_{95}	Q_5	Q_{50}	Q_{95}	Лето	Зима	Год
Восточный склон Ергенинской возвышенности – бассейн бессточных Сарпинских озер												
Р. Мал. Тингута	35	1,00	0,04	0,090	0,028	0,004	21,9	1,88	0,005	0,004	0,003	0,003
Б. Средн. Ласта	106	0,90	0,10	0,245	0,076	0,011	45,0	4,28	0,015	0,012	0,010	0,009
Б. Дальняя Ласта	115	0,85	0,10	0,257	0,077	0,011	45,9	4,43	0,021	0,013	0,010	0,009
Р. Грязная	108	0,80	0,09	0,231	0,067	0,009	42,7	4,06	0,015	0,012	0,010	0,009
Р. Ялмата	335	0,75	0,25	0,71	0,185	0,019	77,7	10,9	0,160	0,037	0,030	0,027
Р. Зельмень	563	0,70	0,39	1,096	0,295	0,032	101	14,2	0,209	0,062	0,051	0,046
Б. Большая Зуха	63	0,60	0,04	0,113	0,026	0,002	25,9	2,23	0,006	0,007	0,006	0,005
Б. Серпин Сала	73	0,50	0,04	0,11	0,025	0,002	26,0	2,30	0,009	0,008	0,007	0,006
Р. Аршань-Зельмень	434	0,48	0,21	0,625	0,144	0,011	65,1	9,13	0,134	0,048	0,039	0,035
Р. Каменная	258	0,45	0,12	0,348	0,08	0,006	50,1	7,03	0,103	0,029	0,023	0,021
Б. Сухая	48	0,45	0,02	0,065	0,015	0,001	18,6	1,56	0,004	0,005	0,004	0,004
Б. Элиста	249	0,35	0,09	0,261	0,06	0,004	34,9	4,90	0,072	0,028	0,023	0,02
Б. Широкая	35	0,35	0,01	0,037	0,008	0,001	14	1,18	0,003	0,004	0,003	0,003
Р. Амта-Бургуста	181	0,40	0,07	0,217	0,05	0,004	40,3	4,71	0,044	0,020	0,016	0,015
Б. Гашун-Бургуста	224	0,38	0,09	0,255	0,059	0,004	41,1	5,77	0,085	0,025	0,020	0,018
Б. Бухота (Сухота)	544	0,35	0,19	0,571	0,132	0,010	59,9	8,41	0,123	0,060	0,050	0,044
Б. Кегульта	236	0,35	0,08	0,248	0,057	0,004	39	5,48	0,080	0,026	0,021	0,019
Б. Овата	255	0,35	0,09	0,268	0,062	0,005	40,3	5,66	0,083	0,028	0,023	0,021
Б. Ар-Нур	184	0,35	0,06	0,193	0,045	0,003	34,4	4,09	0,038	0,020	0,017	0,015
Б. Дунд-Нур	224	0,35	0,08	0,235	0,054	0,004	36,6	5,14	0,075	0,025	0,020	0,018
Б. Эмнэ-Нур	204	0,35	0,07	0,214	0,049	0,004	33,7	4,74	0,069	0,023	0,019	0,017
Б. Ялмата	360	0,35	0,13	0,378	0,087	0,006	44,3	6,21	0,091	0,040	0,033	0,029
Б. Курин-Эккин	186	0,35	0,07	0,195	0,045	0,003	30,2	4,24	0,062	0,021	0,017	0,015
Р. Яшкуль	1860	0,35	0,65	1,953	0,451	0,033	89,9	12,6	0,185	0,206	0,169	0,151
Б. Улан-Зуха	773	0,35	0,28	0,84	0,194	0,014	54,9	7,71	0,113	0,086	0,070	0,063
Б. Мукта	454	0,35	0,16	0,477	0,11	0,008	41,8	5,87	0,086	0,050	0,041	0,037

Окончание таблицы 1

Названия рек и балок	Площадь водосбора, км²	Модуль стока, л/с×км²	Среднегодовой расход воды, м³/с				Максимальный расход воды половодья, м³/с			Минимальный 30-суточный расход Q_{50}, м³/с		
			Q_0	Q_5	Q_{50}	Q_{95}	Q_5	Q_{50}	Q_{95}	Лето	Зима	Год
Б. Семен	606	0,21	0,13	0,382	0,088	0,006	46,4	6,51	0,095	0,067	0,055	0,049
Б. Семен	295	0,21	0,06	0,186	0,043	0,003	33,8	4,75	0,070	0,033	0,027	0,024
Б. Шупта	92	0,20	0,02	0,055	0,013	0,001	17,5	1,61	0,006	0,010	0,008	0,007
Б. Шаред	324	0,21	0,07	0,198	0,049	0,004	31,5	5,15	0,128	0,036	0,029	0,026
Западный склон Ергенинской возвышенности – бассейн р. Дон												
Р. Есауловский Аксай	2110	1,0	2,11	6,144	1,509	0,133	239	33,5	0,492	0,215	0,249	0,200
Р. Курмоярский Аксай	316	0,85	0,27	0,776	0,194	0,018	96,3	13,5	0,198	0,032	0,037	0,030
Р. Курмоярский Аксай	1180						165	23,2	0,340	0,120	0,139	0,112
Р. Кара-Сал	1214	0,45	0,55	1,639	0,379	0,028	116	16,2	0,238	0,124	0,143	0,115
Б. Загиста	926	0,38	0,35	1,056	0,244	0,018	91,5	12,8	0,188	0,094	0,060	0,056
Р. Джурак-Сал	96	0,40	0,04	0,115	0,027	0,002	32,8	3,07	0,011	0,010	0,011	0,009
Южный склон возвышенности – бассейн оз. Маныч-Гудило												
Б. Улан-Зуха	1388	0,30	0,42	1,249	0,289	0,021	373	52,4	0,77	0,154	0,126	0,112
Б. Хар-Зуха	925	0,35	0,32	0,971	0,224	0,017	354	49,7	0,73	0,103	0,084	0,075
Б. Наин-Шара	781	0,35	0,27	0,82	0,189	0,014	350	49,2	0,72	0,087	0,071	0,063
Б. Хагин-Сала	433	0,45	0,19	0,398	0,176	0,058	285	56,8	2,55	0,044	0,051	0,041
Б. Джалга	614	0,40	0,25	0,538	0,216	0,059	294	62,3	3,30	0,063	0,072	0,058

Примечание. Здесь и далее расходы воды: Q_0 – среднемноголетний; Q_5 – 5%-й, Q_{50} – 50%-й и Q_{95} – 95%-й обеспеченности.

Таблица 2

Среднемноголетние расходы воды балок Яшкуль и Хурын-Сала в створах планируемых инфильтрационных бассейнов

Названия рек и балок	Площадь водосбора, км²	Модуль стока, л/с×км²	Среднегодовой расход воды, м³/с				Максимальный расход половодья, м³/с			Минимальный 30-суточный расход Q_{50}, м³/с		
			Q_0	Q_5	Q_{50}	Q_{95}	Q_5	Q_{50}	Q_{95}	Лето	Зима	Год
Р. Яшкуль, верх. Яшкуль	455	0,35	0,16	0,478	0,11	0,008	35,8	39,0	1,47	0,050	0,037	0,039
Б. Хурын-Сала	117						0,123	0,028	0,002	0,013	0,009	0,010

Доля склонового стока в половодье в степной зоне уменьшилась с 50 до 13%, а с гидрографической сети выросла с 42 до 70%. Величина подземного стока и стока верховодки выросла с 8 до 17%. Сокращение склонового стока объясняется уменьшением глубины промерзания, влажности почвы и запасов воды в снеге. Сток в гидрографическую сеть со склонов речной долины менее подвержен климатическим изменениям. Высокий коэффициент стока, несмотря на малую глубину промерзания, сохраняется благодаря относительно большой крутизне склонов. Также в результате метелевого переноса в понижениях рельефа скапливается больше снега, чем на плакоре: максимальные снегозапасы в овражно-балочной сети превышают их аналогичную величину на склонах лесостепной зоны в три раза. Однако, в связи с сокращением доли твердых и смешанных осадков с середины 1970-х гг. [Коронкевич, 1990], интенсивность метелевого переноса зимних осадков ослабла. Таким образом, вероятно, что более 70% стока половодья в пределах Ергенинской возвышенности формируется в пределах гидрографической сети, и с середины 1970-х гг. существует тенденция к дальнейшему увеличению этой доли за счет уменьшения склонового стока.

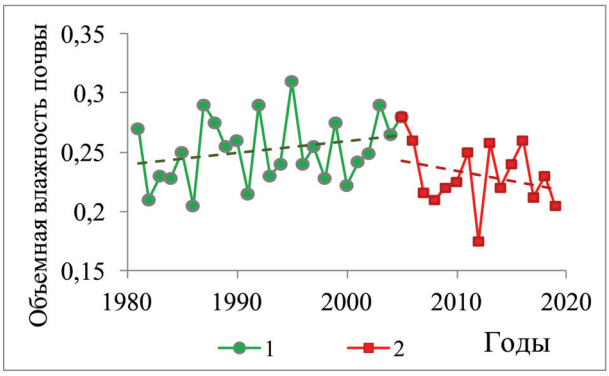


Рис. 2. Объемная влажность почвы в декабре в Троицком районе Калмыкии:
1 – 1981–2005 гг.; 2 – 2006–2019 гг.

Fig. 2. Volumetric soil moisture in December in the Troitsky region of Kalmykia:
1 – 1981–2005; 2 – 2006–2019

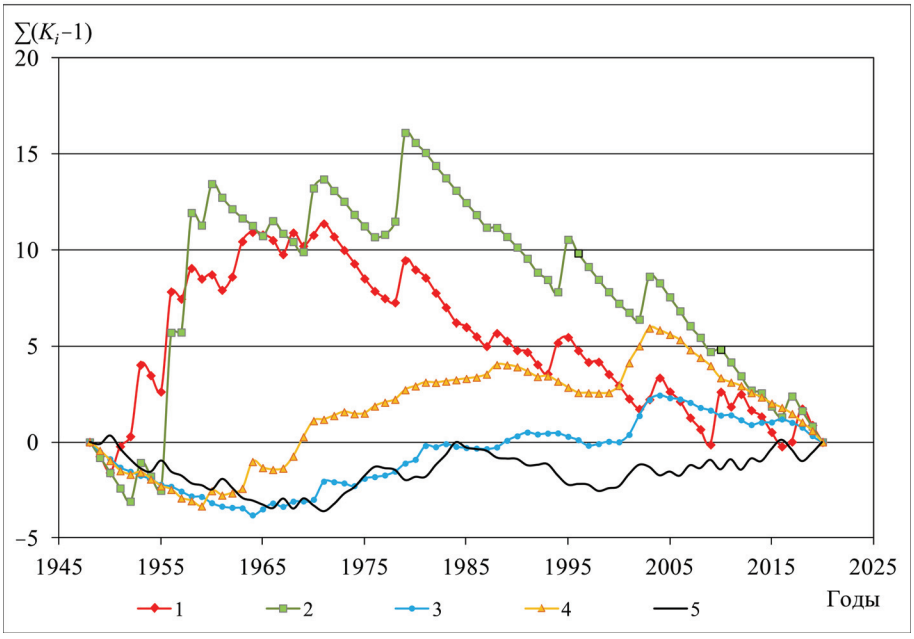


Рис. 3. Разностные интегральные кривые стока р. Аксай Есауловский – х. Водянский:
1 – годового; 2 – среднего меженного; минимального месячного (3 – зимнего и 4 – летнего); 5 – коэффициента естественной зарегулированности

Fig. 3. Difference integral curves of river flow for Aksai Esaulovsky – farm Vodyansky:
1 – annual; 2 – average low water; minimum monthly (3 – winter and 4 – summer); 5 – coefficient of natural water regulation

Таким образом, в целом можно утверждать, что при современных условиях изменения климата и существующих устойчивых тенденциях изменения основных факторов формирования стока и, как следствие, гидрологического режима водотоков Калмыкии ситуация с доступностью пресной воды в будущем лишь ухудшится и необходимо искать способы устранения дефицита водных ресурсов и решения вопроса устойчивого водоснабжения населения. Одним из возможных направлений является наращивание объемов водопользования за счет подземных вод. Однако их ресурсы необходимо поддерживать во избежание истощения при чрезмерном отборе, да и качество этих вод в настоящее время не соответствует питьевым стандартам. В связи с этим для условий Калмыкии задачу водоснабжения населения было предложено решить путем искусственного пополнения подземных вод (ИППВ) водами талого весеннего стока. Основные ресурсы пресных подземных вод в пределах Калмыкии формируются в пределах Ергенинской возвышенности. На ее восточном склоне речная сеть представлена левыми притоками Сала, а на правом – более чем 20 малыми реками и балками. Некоторый опыт эксплуатации ИППВ в Калмыкии уже имеется. Согласно [Цуркан, 1993а], строительство земляной дамбы весной 1989 г. позволило увеличить питание подземных вод на участке Троицкого МПВ с 60 тыс. м^3 до порядка 95 тыс. м^3 за сезон. В дальнейшем дамба была размыта и в 1990 г. уже не функционировала.

Расчет параметров и режима работы инфильтрационных бассейнов. По данным о планируемых инфильтрационных бассейнах, выходах ергенинских песков на поверхность и результатам расчетов стока проведена оценка потенциальных размеров инфильтрационных бассейнов и объем возможного притока вод к ним (табл. 3).

В базовом сценарии (см. табл. 3) величина питания из инфильтрационных бассейнов, расположенных в долине р. Яшкуль, составит 923 тыс. м^3/год, а из бассейнов, расположенных в долине б. Хурын-Сала, – 134 тыс. м^3/год, т. е. суммарно инфильтрационные бассейны будут восполнять порядка 16,9% объемов откачки подземных вод (15 тыс. м^3/сут) на второй очереди Троицкого водозабора. Среднемноголетняя величина питания зависит как от размеров водохранилищ, так и от коэффициентов фильтрации. При объемах водохранилищ в 1263 тыс. м^3 в долине Яшкуля и 183 тыс. м^3 в долине Хурын-Сала величина ИППВ достигает максимума, т. к. эти величины представляют собой максимально возможную величину питания из инфильтрационных бассейнов. При большем объеме задержания поверхностных вод в водохранилищах к началу мая не вся вода из них успеет профильтроваться в инфильтрационных бассейнах. При меньшем объеме задержания объем водохранилищ определяет среднемноголетнюю величину питания практически по линейной зависимости – она составляет от 65 до 88% от объема водохранилища.

Таблица 3

Среднегодовая величина притока воды к инфильтрационным бассейнам и их морфометрические параметры для ряда водотоков Калмыкии

Водоток	Инфильтрационный бассейн	Площадь, м^2	Коэффициент фильтрации по базовому сценарию $K_ф$	Глубина залегания воды, м	Объем водохранилища по базовому сценарию, млн м^3
Яшкуль	1	10 000	12	15	2,5
	2	10 000	12	15	
	3	750	12	15	
Хурын-Сала	4	2400	12	15	1,0

В процессе работы инфильтрационных бассейнов величина инфильтрации из них снижается. Скорость снижения $K_ф$ зависит от проведения мероприятий по чистке дна инфильтрационных отложений, удаления донных отложений и верхнего слоя почвогрунтов, подвергшегося кольматации. От величины $K_ф$ зависит максимально возможная величина инфильтрации, в результате по мере его снижения величина инфильтрации все меньше зависит от объема притока воды к водохранилищу и от объема самого водохранилища. Так, при снижении $K_ф$ в 10 раз суммарный объем инфильтрационного питания уменьшается с 923 до 159 тыс. м^3/год. Обобщающий график зависимости величины среднемноголетнего инфильтрационного питания от объема водохранилища для рек Яшкуль и Хурын-Сала представлен на рис. 4.

Наибольшее влияние на величину инфильтрационного питания водность года оказывает при базовых значениях объема водохранилища и коэффициента фильтрации. Так, величина питания в год 10%-й

обеспеченности речного стока превышает аналогичную величину в год 80%-й обеспеченности в долине р. Яшкуль в 5,4 раза, а в долине р. Хурын-Сала в 3,1 раза. При $K_ф$ менее 1,2 м/сут величина питания из инфильтрационных бассейнов практически не зависит от объема водохранилища, а величины питания 80%-й и 10%-й обеспеченности не отличаются друг от друга, т. к. основным фактором, лимитирующим величину ИППВ, становится скорость инфильтрации, а не количество доступной воды.

По результатам расчетов среднемноголетняя величина инфильтрационного питания при 80%-й обеспеченности объема притока составит от 2,8 тыс. м^3/год (январь–май) в б. Амта-Бургуста до 18,2 тыс. м^3/год в б. Улан-Зуха. В качестве сценария изменения $K_ф$ принималось, что при отсутствии очистки дна инфильтрационных бассейнов в среднем величина инфильтрационного питания будет уменьшаться на 14% в год, и через 20 лет эксплуатации их роль в питании подземных вод сведется к минимуму. При этом для маловодных лет (90%-й обеспеченности стока) пополнение подземных вод минимально, начиная с первого года их эксплуатации. Заметно большие объемы инфильтрующихся вод будут в первые 10 лет эксплуатации бассейнов с наибольшим их заполнением (годы 50%-й и 10%-й обеспеченности стока).

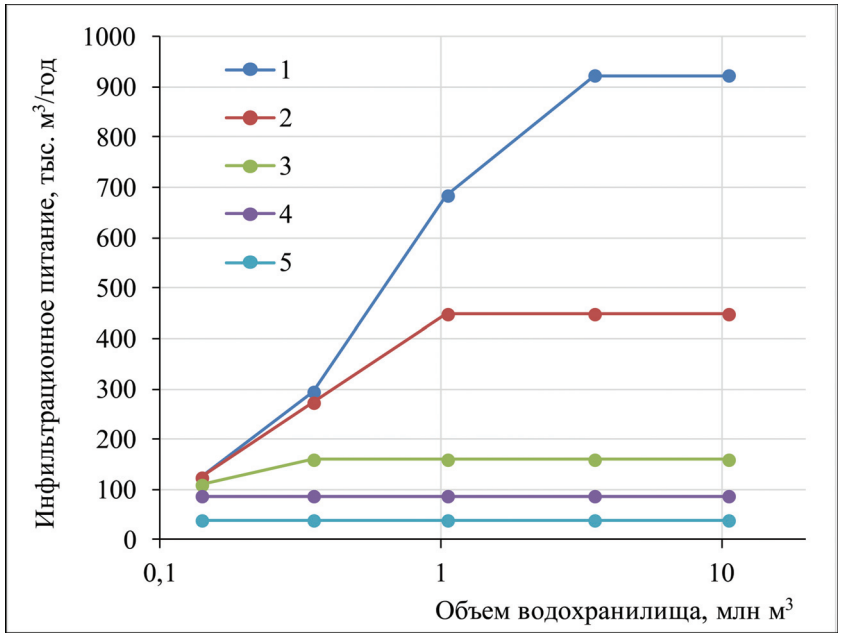


Рис. 4. Зависимость среднемноголетней величины инфильтрационного питания в долинах рек Яшкуль и Хурын-Сала от объема водохранилищ в них при коэффициентах фильтрации в инфильтрационных бассейнах:
1 – 12 м/с; 2 – 4,2 м/с; 3 – 1,2 м/с; 4 – 0,6 м/с; 5 – 0,24 м/с

Fig. 4. Dependence of the long-term average value of infiltration nutrition in the Yashkul and Khuryn-Sala river valleys on the volume of reservoirs in them under the following filtration coefficients in infiltration basins:
1 – 12 m/s; 2 – 4,2 m/s; 3 – 1,2 m/s; 4 – 0,6 m/s; 5 – 0,24 m/s

Объемы инфильтрационного питания в первые 10 лет эксплуатации бассейнов подвержены заметным ежегодным колебаниям, которые зависят от гидрографа притока воды к инфильтрационному бассейну за сезон. В годы 90%-й обеспеченности инфильтрационное питание из бассейнов практически отсутствует, составляя от 0,033 тыс. до 0,92 тыс. м^3, что в 20–80 раз меньше среднемноголетней величины. В год 80%-й обеспеченности величина питания в 2–2,5 раза меньше среднемноголетней, а в год 10%-й обеспеченности превышает ее в 1,5–1,6 раза.

Отметим, что ежегодная очистка инфильтрационного бассейна позволяет избежать снижения $K_ф$, увеличить среднемноголетнее питание в 2,8–2,9 раза по сравнению с эксплуатацией бассейнов без очистки и в 1,7–1,8 раза в случае проведения очистки раз в 10 лет. Среднемноголетняя величина инфильтрационного питания в бассейнах выбранных рек практически полностью зависит от морфометрических параметров инфильтрационных бассейнов и коэффициента влагопереноса пород зоны аэрации. Это связано с тем, что среднемноголетняя величина притока воды к инфильтрационным бассейнам превышает величину инфильтрации из них в среднем в 1000 раз (от 720 для б. Улан-Зуха до 1510 для р. Яшкуль).

ВЫВОДЫ

Потепление климата в регионе происходило в две волны: в 1910–1945 гг. и после 1976 г. (наиболее интенсивное). Рост температуры воздуха в РК (как и на всем юго-востоке ЕТР) начался с конца 1980-х гг. Отмечен сдвиг сроков схода снежного покрова на более ранние сроки и сокращение общего периода залегания снежного покрова, особенно в северных и северо-восточных районах республики.

Вследствие климатических изменений наметились тенденции сокращения годового стока рек РК и его внутригодового перераспределения путем сокращения весеннего, роста зимнего и выравнивания колебания меженного летнего стока. Во многих балках РК отмечается исключительно сезонный (весенний) сток с полным пересыханием русел в теплую часть года. Основными источниками поверхностных водных ресурсов в РК являются малые реки и временные водотоки Ергенинской возвышенности. При слабой изученности гидрологического режима рек РК была проведена количественная оценка современных водных ресурсов. Среднемноголетний сток рек с восточного склона Ергенинской возвышенности оценен в 0,120 км^3/год, западного склона – в 0,105 и южного – в 0,045 км^3/год. Проведены оценки стока в годы разной обеспеченности.

При естественном дефиците водных ресурсов в РК в условиях аридного климата также заметно ухудшается их качество, усугубленное антропогенным загрязнением вод, что в настоящее время критическим образом сказывается на водоснабжении населения. Использование подземных вод для покрытия дефицита водоснабжения привело к истощению их запасов и образованию депрессионных воронок в местах водозаборов. Для восполнения запасов подземных вод и улучшения их качества рассмотрен альтернативный вариант пополнения подземных вод за счет инфильтрации поверхностного стока, аккумулируемого в инфильтрационных бассейнах (ИППВ).

Величина притока воды к инфильтрационному бассейну в большинстве лет мало лимитирует величину инфильтрационного питания подземных вод из него, т. к. она практически полностью зависит от морфометрических параметров инфильтрационного бассейна и коэффициента влагопереноса пород зоны аэрации. Так среднемноголетний приток воды к инфильтрационным бассейнам превышает величину инфильтрации из них в среднем в 6,8 раза. Кроме того, в случае отсутствия ежегодных мероприятий по очистке инфильтрационных бассейнов и уменьшения коэффициента фильтрации, питание подземных вод будет сокращаться и достигнет порядка 38 тыс. м^3/год.

Суммарный расход Троицкого и Баярнинского МПВ (22 тыс. м^3/сут) в 8,7 раза выше, чем максимально возможный объем суммарной инфильтрации из четырех предполагаемых инфильтрационных бассейнов (около 923 тыс. м^3/год). Кроме того, неустойчивость поверхностного стока, а в перспективе – снижение весеннего стока при снижении количества зимних осадков может сделать строительство и поддержание в рабочем состоянии ИППВ экономически невыгодным, а в условиях вероятного отсутствия у водоемов ИППВ зон санитарной охраны, обустроенных в соответствии с действующими требованиями, опасными с точки зрения ухудшения качества существующих подземных вод. Также вызывает вопросы возможность размыва стенок водохранилищ-отстойников при половодьях или паводках высокой обеспеченности.

Таким образом, ИППВ можно рассматривать в качестве временной меры, позволяющей немного уменьшить интенсивность снижения УГВ до реставрации существующих либо до строительства новых гидротехнических сооружений, в частности водоводов, поставляющих волжскую воду в Элисту.

Благодарность. Работа проводилась в рамках темы госзадания кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова ч. 2 I.10 «Анализ, моделирование и прогнозирование изменений гидрологических систем, водных ресурсов и качества вод суши», оценка возможности и целесообразности создания инфильтрационных бассейнов для пополнения запасов подземных вод – за счет гранта РНФ № 21-47-00008. Климатический анализ проведен в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды» (программа «Климат и окружающая среда»). Часть данных собрана и обработана в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации Федеральное агентство водных ресурсов. URL: https://gmvo.skniivh.ru/ (дата обращения 15.11.2022).

Атлас расчетных гидрологических карт и номограмм. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 23 л.

Барабанов А.Т., Долгов С.В., Коронкевич Н.И. Влияние современных изменений климата и сельскохозяйственной деятельности на весенний поверхностный склоновый сток в лесостепных и степных районах Русской равнины // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 4. С. 332–340.

Бембеев А.В., Щипицын М.Н. Оценка эксплуатационных запасов пресных и солоноватых подземных вод на территории Республики Калмыкия // Южно-российский вестник геологии, географии и глобальной энергии. 2005. № 1(10). С. 71–86.

Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Харламов М.А., Варенцов М.И., Фролова Н.Л., Повалишникова Е.С. Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. I. Обзор исследований // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. Т. 384. № 2. С. 92–116. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-2-92-116.

Варенцова Н.А., Гречушникова М.Г., Повалишникова Е.С., Киреева М.Б., Харламов М.А., Фролова Н.Л. Влияние климатических и антропогенных факторов на весенний сток в бассейне Дона // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 5. С. 91–108.

Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: Государственный гидрологический институт, 2008. 600 с.

Габунщин С.В. Экологическая безопасность России на региональном уровне (на материалах Республики Калмыкия). Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ, 2009. 192 с.

Гидрохимический сток рек европейской части России. Атлас / под ред. Р.Г. Джамалова, О.С. Решетняк, М.М. Трофимчука. М.: ИВП РАН, 2020. 155 с.

Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: ГЕОС, 2017. 204 с.

Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А. Ландшафтно-гидрологические изменения в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 674–685. DOI: 10.31857/S032105962006005X

Зекцер И.С., Потапова Е.Ю., Четверикова А.В., Штенгелов Р.С. Перспективы искусственного восполнения подземных вод юга европейской части России // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 6. С. 624–638.

Искусственное пополнение запасов грунтовых вод при решении проблемы водоснабжения в Калмыкии // Недра Поволжья и Прикаспия. Саратов, 2005. Вып. 41. С. 29–34.

Коронкевич Н.И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. М.: Наука, 1990. 205 с.

Коронкевич Н.И., Георгиади А.Г., Долгов С.В., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Милюкова И.П. Изменение стока снегового половодья на южном макросклоне Русской равнины в период 1930–2014 гг. // Лед и снег. 2018. Т. 58. № 4. С. 498–506.

Махота Т.А., Ершов Г.Е. Переоценка эксплуатационных запасов пресных подземных вод Троицкого и Баяртинского месторождений для муниципальных нужд г. Элисты Республики Калмыкия: в 6 кн. и 1 папке. Книга 1: Геологический отчет. 2010. 192 с.

Мимишев А.А., Очирова А.Н., Кирилаев В.А., Шараева Б.М., Джальчинова Т.Б. Анализ основных источников питьевого водоснабжения на территории Республики Калмыкия // Геология, география и глобальная энергия. 2018. № 2(69). С. 26–39.

Плотников Н.А. Проектирование систем искусственного восполнения подземных вод для водоснабжения. М.: Стройиздат, 1983. 230 с.

Полонский А.Б., Башарин Д.В. Влияние климатического сдвига 1976–1977 гг. на крупномасштабную структуру приземных метеорологических полей Евразии // Метеорология и гидрология. 2008. № 5. С. 16–30.

Рекомендации по расчетам внутригодового распределения стока при строительном проектировании. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 72 с.

СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. Государственный комитет СССР по делам строительства. М.: Стройиздат, 1985. 36 с.

СП-33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, 2004. 72 с.

Хочаева С.С., Васильева П.Д. О проблемах использования водных объектов Калмыкии, являющихся источниками водоснабжения // Наука и бизнес: пути развития. 2017. № 12. С. 68–73.

Цуркан С.Я. Оценка условий формирования и возможности искусственного пополнения ресурсов подземных вод Калмыкии для их рационального использования: дис. … канд. геол.-минерал. наук. М.: ВСЕГИНГЕО, 1993а. 240 с.

Цуркан С.Я. Условия формирования ресурсов пресных подземных вод Калмыкии // Геоинформмаркт, 1993б. Вып. 8. С. 29–34.

Blöschl G., Hall J., Viglione A. Changing climate both increases and decreases European river floods, Nature, 2019, vol. 573, p. 108–111, DOI: 10.1038/s41586-019-1495-6.

Bouwer H. Groundwater hydrology, McGraw-Hill, New York, 1978, 480 p.

Bouwer H., Back J.T., Oliver J.M. Predicting infiltration and ground water mounting for artificial recharge, *Journal Hydrol. Eng*., Am. Soc. Civil. Eng., 1999, vol. 4(4), p. 350–357.

Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 Global Reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, DOI: 10.1002/qj.3803.

Kireeva M.B., Frolova N.L., Dzhamalov R.G., Rets E.P., Povalishnikova E.S., Pakhomova O.V. Low flow on the rivers of the European part of Russia and its hazards, Geography, Environment, Sustainability, 2016, vol. 9, no. 4, p. 33–47, DOI: 10.15356/2071-9388_04v09_2016_03.

Kireeva M.B., Frolova N.L., Rets E.P. et al. Evaluating climate and water regime transformation in the European part of Russia using observation and reanalysis data for the 1945–2015 period, International Journal of River Basin Management, 2019, vol. 18, no. 4, p. 491–502, DOI: 10.1080/15715124.2019.1695258.

Massmann J.W., Butchart C., Stolar S. Infiltration Characteristics, Performance, and Design of Stormwater Facilities, Final Research Report, Research Project T1803, Task 12, Washington State Department of Transportation, Olympia, Washington, 2003.

Электронные ресурсы

О региональной комплексной программе «Чистая вода» на 2009–2022 годы. Электронный фонд

Консорциум «Кодекс». URL: https://docs.cntd.ru/document/460201863 (дата обращения 20.04.2023).

Ранькова Э.Я., Груза Г.В., Рочева Э.В., Самохина О.Ф. Температура приземного воздуха // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., 2014. С. 37–72. URL: https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/od2/od2.pdf (дата обращения 04.04.2023).

Справка о современном состоянии подземных вод и опасных экзогенных геологических процессов на территории Республики Калмыкия в 2022 г. URL: http://geomonitoring.ru/download/spravki/yfo/%D0%A1%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BA%D0%B0%20%D0%A0%D0%B5%D1%81%D0%BF%D1%83%D0%B1%D0%BB%D0%B8%D0%BA%D0%B0%20%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D0%BC%D1%8B%D0%BA%D0%B8%D1%8F.pdf?ysclid=lm9j3ogumm441606806 (дата обращения 20.04.2023).

Строительство водопровода от Волги до Калмыкии // Правительство Республики Калмыкия. 2022. URL: http://kalmregion.ru/novosti/stroitelstvo-vodoprovoda-ot-volgi-do-kalmykii-/ (дата обращения 15.06.2022).

Схема комплексного использования и охраны водных объектов бессточных районов междуречья Терека, Дона и Волги. Книга 2: Оценка экологического состояния и ключевые проблемы бессточных районов. Западно-Каспийское БВУ, 2014. 29 с. URL: http://zkbvu.ru/upload/medialibrary/3f3/3f36ebd80fb8bf333e01ac51fb2aecd5.pdf (дата обращения 10.04.2023).

ERA5-Land, *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), URL: https://www.ecmwf.int/en/era5-land (дата обращения 14.02.2022).

GlobSnow, *GlobSnow v.3.0*, Finnish Meteorological Institute, ESA, URL: https://www.globsnow.info/ (дата обращения 14.02.2022).

IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013, Hartmann D., Klein Tank A., Rusticucci M. et al., chapter 2, Observations: Atmosphere and Surface, p. 159–254, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, URL: https://www.researchgate.net/publication/262677624_IPCC_2013_Climate_Change_2013_in_The_Physical_Science_Basis_Working_Group_I_Contribution_to_the_Fifth_Assessment_Report_of_the_Intergovernmental_Panel_on_Climate_Change_WMOUNEP_Cambridge (дата обращения 15.04.2023).

Поступила в редакцию 05.08.2023
После доработки 25.09.2023
Принята к публикации 06.10.2023

HYDROLOGICAL REGIME OF WATER STREAMS AND THE PROBLEMS OF PUBLIC WATER SUPPLY IN THE REPUBLIC OF KALMYKIA

O.M. Pakhomova[1], V.Yu. Grigoriev[2], A.A. Sazonov[3], E.S. Povalishnikova[4], N.L. Frolova[5]

[1–5] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology*
[2–3] *Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences*

[1] *Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: olpah@mail.ru*
[2] *Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: vadim308g@mail.ru*
[3] *Senior Lecturer, Ph.D. in Geography; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com*
[4] *Senior Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: elenapovalishnikova@gmail.com*
[5] *Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: frolova_nl@mail.ru*

The constant shortage of fresh water for drinking and municipal use in the Republic of Kalmykia has become critically acute recently. Both natural factors, i.e. increasing climate aridity, limited reserves of fresh surface and groundwater, lack of sufficiently long sections of large rivers with constant flow, and the deterioration of hydraulic structures are the reasons. The exploitation of groundwater in existing deposits has led to their depletion and deterioration, while large deposits of fresh and slightly brackish groundwater in the southern Caspian region cannot be used because the content of pollutants in them is rather high. Recovery of old and construction of new water pipelines from the Volga River requires permanent significant financial investments at the federal level. Therefore, recently a new way to increase the supply of fresh water suitable for drinking purposes, i.e. an artificial groundwater recharge (AGR), has been actively discussed. The article provides an actual assessment of water resources of the little-studied surface runoff of the rivers of Kalmykia, considers the possibility and feasibility of creating infiltration basins to replenish groundwater reserves, and calculates the parameters and operating mode of five planned basins.

The main source of fresh surface water in Kalmykia is the rivers of the Ergeni Upland. The average long-term flow from its eastern slope is estimated at 0,120 km^3/year, from the western slope at 0,105 km^3/year and from the southern slope at 0,045 km^3/year. Trends in modern modification of the hydrological regime of rivers

under the influence of climate change have been revealed, namely a decrease in annual runoff and its intra-annual redistribution with a reduction of spring floods, a slight increase in winter runoff and a leveling of summer low-water periods. Calculation of the operating mode of planned infiltration basins allowed us to draw the following conclusions: the maximum possible volume of total infiltration will be about 220 thousand m^3/year, which is 36 times less than the present-day water intake from the Troitsk and Bayarninsky fields for public water supply; sufficiently efficient operation of pools is only possible with annual cleaning of accumulated silt deposits, otherwise the soil filtration coefficient will come down each year, resulting in the reduction of infiltration supply by dozens times. Thus, the AGR can only be a temporary measure to compensate for the subsidence of groundwater level until the reconstruction and construction of new water pipelines from the Volga River to supply the city of Elista and the surrounding area with drinking water of acceptable quality.

Keywords: water resources, groundwater, Ergeni Upland, artificial recharge ponds, infiltration rate, hydrograph calculation, climate change

Acknowledgements. The work was carried out under the State Task of the Department of Land Hydrology, MSU Faculty of Geography, Part 2 I.10 Analysis, modeling and forecasting of changes in hydrological systems, water resources and land water quality (CITIS number 121051400038). Assessment of the possibility and feasibility of creating infiltration basins for groundwater recharge was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 21-47-00008). The climatic analysis was carried out under the Development Program of the Interdisciplinary Scientific–Educational School of the Lomonosov Moscow State University "The Future of the Planet and Global Environmental Changes" ("Climate and Environment"). Part of data were collected and processed under the State Task of the Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences (Theme FMWZ-2022-0001).

REFERENCES

Atlas raschetnykh gidrologicheskikh kart i nomogramm [Atlas of calculated hydrological maps and nomograms], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986, 23 p.

Barabanov A.T., Dolgov S.V., Koronkevich N.I. Effect of Present-Day Climate Changes and Agricultural Activities on Spring Overland Runoff in Forest-Steppe and Steppe Regions of the Russian Plain, *Water Resources*, 2018, vol. 45, no. 4, p. 447–454.

Bembeev A.V., Schipicyn M.N. Ocenka ekspluatacionnyh zapasov presnyh i solonovatyh podzemnyh vod na territorii Respubliki Kalmykija [Estimation of the operational reserves of fresh and brackish groundwater in the territory of the Republic of Kalmykia], *Juzhno-rossijskij vestnik geologii, geografii i global'noj energii*, 2005, no. 1(10), p. 71–86. (In Russian)

Blöschl G., Hall J., Viglione A. Changing climate both increases and decreases European river floods, Nature, 2019, vol. 573, p. 108–111, DOI: 10.1038/s41586-019-1495-6.

Bouwer H. *Groundwater hydrology*, McGraw-Hill, New York, 1978, 480 p.

Bouwer H., Back J.T., Oliver J.M. Predicting infiltration and ground water mounting for artificial recharge, *Journal Hydrol. Eng*., Am. Soc. Civil. Eng., 1999, vol. 4(4), p. 350–357.

Curkan S.Ja. *Ocenka uslovij formirovanija i vozmozhnosti iskusstvennogo popolnenija resursov podzemnyh vod Kalmykii dlja ih racional'nogo ispol'zovanija* [Assessment of the conditions of formation and the possibility of artificial replenishment of groundwater resources of Kalmykia for their rational use], Ph.D. Thesis in Geology and Mineralogy, Moscow, VSEGINGEO Publ., 1993a, 240 p. (In Russian)

Curkan S.Ja. Uslovija formirovanija resursov presnyh podzemnyh vod Kalmykii [Conditions for the Formation of Fresh Groundwater Resources in Kalmykia], *Geoinformmarkt*, Moscow, 1993b, iss. 8, p. 29–34. (In Russian)

Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Barabanova E.A. Landscape-hydrological changes in the Don basin, *Water Resources*, 2020, vol. 47, no. 6, p. 934–944, DOI: 10.1134/S0097807820060056.

Dzhamalov R.G., Kireeva M.B., Kosolapov A.E., Frolova N.L. *Vodnye resursy basseina Dona i ikh ekologicheskoe sostoyanie* [Water resources of the Don basin and their ecological state], Moscow, GEOS Publ., 2017, 204 p. (In Russian)

Gabunshhin S.V. *Ekologicheskaja bezopasnost' Rossii na regional'nom urovne (na materialah respubliki Kalmykija)* [Environmental safety of Russia at the regional level (based on the materials of the Republic of Kalmykia)], Rostov-on-Don, SKNC VSh JuFU Publ., 2009, 192 p. (In Russian)

Gidrohimicheskij stok rek Evropejskoj chasti Rossii. Atlas [Hydrochemical runoff of rivers in the European part of Russia. Atlas], R.G. Dzhamalov, O.S. Reshetnjak, M.M. Trofimchuk (eds.), Moscow, IVP RAN Publ., 2020, 155 p. (In Russian)

Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 Global Reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, DOI: 10.1002/qj.3803.

Iskusstvennoe popolnenie zapasov gruntovyh vod pri reshenii problemy vodosnabzhenija v Kalmykii [Artificial replenishment of groundwater reserves in solving the problem of water supply in Kalmykia], *Nedra Povolzh'ja i Prikaspija*, Saratov, 2005, iss. 41, p. 29–34. (In Russian)

Khochaeva S.S., Vasil'eva P.D. O problemakh ispol'zovaniya vodnykh ob"ektov Kalmykii, yavlyayushchikhsya istochnikami vodosnabzheniya [On the problems of using water bodies in Kalmykia, which are sources of water supply], *Nauka i biznes: puti razvitiya*, 2017, no. 12, p. 68–73. (In Russian)

Kireeva M.B., Frolova N.L., Dzhamalov R.G., Rets E.P., Povalishnikova E.S., Pakhomova O.V. Low flow on the rivers of the European part of Russia and its hazards, Geography, Environment, Sustainability, 2016, vol. 9, no. 4, p. 33–47, DOI: 10.15356/2071-9388_04v09_2016_03.

Kireeva M.B., Frolova N.L., Rets E.P. et al. Evaluating climate and water regime transformation in the European

part of Russia using observation and reanalysis data for the 1945–2015 period, International Journal of River Basin Management, 2019, vol. 18, no. 4, p. 491–502, DOI: 10.1080/15715124.2019.1695258.

Koronkevich N.I. Vodnyj balans Russkoj ravniny i ego antropogennye izmenenija [Water balance of the Russian Plain and its anthropogenic changes], Moscow, Nauka Publ., 1990, 205 p. (In Russian)

Koronkevich N.I., Georgiadi A.G., Dolgov S.V., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Miljukova I.P. Izmenenie stoka snegovogo polovod'ja na juzhnom makrosklone Russkoj ravniny v period 1930–2014 gg. [Change in snow flood flow in the southern macro-slope of the Russian Plain in the period 1930-2014], *Led i sneg*, 2018, vol. 58, no. 4, p. 498–506. (In Russian)

Mahota T.A., Ershov G.E. *Pereocenka ekspluatacionnyh zapasov presnyh podzemnyh vod Troickogo i Bajartinskogo mestorozhdenij dlja municipal'nyh nuzhd g. Eliste Respubliki Kalmykija, v 6 kn. i 1 papke* [Reassessment of operational fresh groundwater reserves of the Troitskoye and Bayartinskoye deposits for municipal needs in the city of Elista of the Republic of Kalmykia, in 6 books and 1 folder], book 1, 2010, 192 p. (In Russian)

Massmann J.W., Butchart C., Stolar S. *Infiltration Characteristics, Performance, and Design of Stormwater Facilities*, Final Research Report, Research Project T1803, Task 12, Washington State Department of Transportation, Olympia, Washington, 2003.

Mimishev A.A., Ochirova A.N., Kirilaev V.A., Sharaeva B.M., Dzhal'chinova T.B. Analiz osnovnyh istochnikov pit'evogo vodosnabzhenija na territorii Respubliki Kalmykii [Analysis of the main sources of drinking water supply over the territory of the Republic of Kalmykia], *Geologija, geografija i global'naja energija*, 2018, no. 2(69), p. 26–39. (In Russian)

Plotnikov N.A. *Proektirovanie sistem iskusstvennogo vospolnenija podzemnyh vod dlja vodosnabzhenija* [Engineering of artificial groundwater replenishment systems for water supply], Moscow, Strojizdat Publ., 1983, 230 p. (In Russian)

Polonskij A.B., Basharin D.V. Vlijanie klimaticheskogo sdviga 1976–1977 gg. na krupnomasshtabnuju strukturu prizemnyh meteorologicheskih polej Evrazii [Mpact of climate shift 1976–1977 on the large-scale structure of the surface meteorological fields of Eurasia], *Meteorologija i gidrologija*, 2008, no. 5, p. 16–30. (In Russian)

Rekomendatsii po raschetam vnutrigodovogo raspredelenija stoka pri stroitel'nom proektirovanii [Recommendations for calculating intra-annual flow distribution during construction design], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, 72 p. (In Russian)

SNiP 2.01.14-83. *Opredelenie raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Determination of calculated hydrological characteristics], USSR State Committee for Construction Affairs, Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 36 p. (In Russian)

SP-33-101-2003. Svod pravil po proektirovaniju i stroitel'stvu. Opredelenie osnovnyh raschetnyh gidrologicheskih harakteristik [A set of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics], Moscow, Gosstroj Rossii Publ., 2004, 72 p. (In Russian)

Varentsova N.A., Grechushnikova M.G., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Frolova N.L. Vliyanie klimaticheskikh i antropogennykh faktorov na vesennii stok v basseine Dona [Assessment of climatic and anthropogenic impact on spring runoff in the Dom River basin], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.,* 2021, no. 5, p. 91–108. (In Russian)

Varentsova N.A., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Varentsov M.I., Frolova N.L., Povalishnikova E.S. Formirovanie vesennego stoka rek ETR: osnovnye faktory i sposoby ikh ucheta, I. Obzor issledovanii [Formation of spring runoff of rivers in the EPR: main factors and methods of taking them into account, I. Review of research], *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2022, vol. 384, no. 2, p. 92–116, DOI: 10.37162/2618-9631-2022-2-92-116. (In Russian)

Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie [Water resources of Russia and their use], I.A. Shiklomanov (ed.), Sankt-Petersburg, Gosudarstvennyi gidrologicheskii institute Publ., 2008, 600 p. (In Russian)

Zektser I.S., Potapova E.Y., Chetverikova A.V., Shtengelov R.S. Perspectives of artificial recharge of groundwater in southern European Russia, *Water Resources*, 2012, vol. 39, no. 6, p. 672–684, DOI: 10.1134/S0097807812060085.

Web sources

Avtomatizirovannaja informacionnaja sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnyh ob'ektov (AIS GMVO). Ministerstvo prirodnyh resursov i jekologii Rossijskoj Federacii Federal'noe agentstvo vodnyh resursov [Automated information system for state monitoring of water bodies (AIS GMVO). Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation Federal Agency for Water Resources], URL: https://gmvo.skniivh.ru/ (data access 15.11.2022). (In Russian)

O regional'noi kompleksnoi programme "Chistaya voda" na 2009–2022 gody. Elektronnyi fond Konsortsium "Kodeks" [About the regional comprehensive program "Clean Water" for 2009–2022, Electronic fund Consortium "Code", URL: https://docs.cntd.ru/document/460201863 (access date 20.04.2023). (In Russian)

Ran'kova E.Ya., Gruza G.V., Rocheva E.V., Samokhina O.F. Temperatura prizemnogo vozdukha [Surface air temperature], *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation], Moscow, 2014, p. 37–72, URL: https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/od2/od2.pdf (access date 04.04.2023). (In Russian)

Spravka o sovremennom sostoyanii podzemnykh vod i opasnykh ekzogennykh geologicheskikh protsessov na territorii Respubliki Kalmykiya v 2022 g. [Information on the current state of groundwater and hazardous exogenous geological processes in the territory of the Republic of Kalmykia in 2022], URL: http://geomonitoring.ru/download/spravki/yfo/%D0%A1%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BA%D0%B0%20%D0%A0%D0%B5%D1%81%D0%BF%D1%83%D0%B1%D0%BB%D0%B8%D0%BA%D0%B0%20%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D0%BC%D1%8B%D0%BA%D0%B8%D1%8F.pdf?ysclid=lm9j3ogumm441606806 (access date 20.04.2023). (In Russian)

Stroitel'stvo vodoprovoda ot Volgi do Kalmykii [Construction of a water pipeline from the Volga to Kalmykia], Government of the Republic of Kalmykia, 2022, URL: http://kalmregion.ru/novosti/stroitelstvo-vodoprovoda-ot-volgi-do-kalmykii-/ (access date 15.06.2022). (In Russian)

Shema kompleksnogo ispol'zovanija i ohrany vodnyh ob"ektov besstochnyh rajonov mezhdurech'ja Tereka, Dona i Volgi [Scheme of the integrated use and protection of water bodies of drainless areas of the interfluve of the Terek, Don and Volga], book 2, 2014, 29 p., URL: http://zkbvu.ru/upload/medialibrary/3f3/3f36ebd80fb8bf333e01ac51fb2aecd5.pdf (access date 10.04.2023). (In Russian)

ERA5-Land, *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), URL: https://www.ecmwf.int/en/era5-land (access date 14.02.2022).

GlobSnow, GlobSnow v.3.0, Finnish Meteorological Institute, ESA, URL: https://www.globsnow.info/ (access date 14.02.2022).

IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013, Hartmann D., Klein Tank A., Rusticucci M. et al., chapter 2, Observations: Atmosphere and Surface, p. 159–254, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, URL: https://www.researchgate.net/publication/262677624_IPCC_2013_Climate_Change_2013_in_The_Physical_Science_Basis_Working_Group_I_Contribution_to_the_Fifth_Assessment_Report_of_the_Intergovernmental_Panel_on_Climate_Change_WMOUNEP_Cambridge (access date 15.04.2023).

Received 05.08.2023
Revised 25.09.2023
Accepted 06.10.2023

Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2024. Т. 79. № 1. С. 22–36

УДК: 504.3.054: 504.75 (282.256.341)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ ЖИЛЫХ СТРОЕНИЙ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА В МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ (НА ПРИМЕРЕ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА)

В.Р. Битюкова[1], **В.С. Дехнич**[2], **А.И. Кравчик**[3], **Н.С. Касимов**[4]

[1, 3, 4] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет*
[2] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Казахстанский филиал, кафедра экологии и природопользования*

[1] *Кафедра экономической и социальной географии России, проф., д-р геогр. наук; e-mail: v.r.bityukova@geogr.msu.ru*
[2] *Ст. преподаватель, канд. геогр. наук; e-mail: vodo.ast@gmail.com*
[3] *Кафедра экономической и социальной географии России, магистрант; e-mail: nastya.kravchik@gmail.com*
[4] *Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, академик, д-р геогр. наук; e-mail: nskasimov@geogr.msu.ru*

В статье предложена методика расчета объема выбросов в атмосферу от автономных систем отопления (АСО) индивидуальных жилых строений на основе оценки количества и площади подворий с применением данных дистанционного зондирования, объема, вида использованного топлива и типа источника сжигания по данным опросов населения и администраций муниципальных районов и поселений. Оценка значимости АСО как источника загрязнения атмосферы проведена на трех масштабных уровнях: по структуре потребления топлива выделены регионы России, в которых наибольшее значение имеют используемые населением теплоагрегаты; в разрезе муниципальных образований для Байкальской природной территории рассчитан объем выбросов от печного топлива, выделены типы территорий по структуре источников выбросов и для населенных пунктов проведена оценка роли АСО в загрязнении жилой зоны. Выявлено, что сжигание печного топлива является доминирующим источником выбросов (свыше 90%) для большей части Байкальского региона. Выбросы индивидуальных жилых строений при использовании угля и дров, в отличие от ТЭЦ и котельных, в большинстве случаев приводят к значительному воздействию на качество атмосферного воздуха (до 4,9 ПДК твердых частиц и диоксида серы), причем ареалы такого воздействия ограничены жилой зоной населенных пунктов. Стратегии снижения загрязнения определяются положением территории, характером расселения, уровнем доходов, сложившейся структурой потребления топлива, наличием разрабатываемых месторождений угля и другими факторами.

Ключевые слова: печное топливо, Байкал, ТЭЦ, котельные, ареалы рассеяния выбросов

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.2

ВВЕДЕНИЕ

Автономные системы отопления (АСО) могут вносить значительный вклад в уровень загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов. Используемые для отопления жилищ печи и котлы являются источником около 40% мировой эмиссии монооксида углерода [Energy…, 2016], менее 10% общемирового объема присутствующих в окружающей атмосфере $PM_{2,5}$. Около половины этого объема приходится на бытовое отопление с использованием биомассы, а большая часть образуется в результате сжигания угля для целей бытового отопления [Отопление…, 2014]. Сжигание топлива как фактор загрязнения атмосферы, изменения климата и влияния на здоровье населения исследовано на разном масштабе: по странам [Perera, 2018], регионам [Тикунов и др., 2017], городам [Cheng et al., 2019], как модельное исследование для одного дома [Fadel et al., 2022] и в наименьшей степени по муниципальным образованиям (МО), в основном моделируя вклад источников из-за недостаточной статистической обеспеченности [Garland et al., 2008; Padoan et al., 2020].

Объем потребления топлива в России составляет около 1200 млн тонн условного топлива (т.у.т.) (2021), из которых 30% расходуется на производство электроэнергии, 37% используется в качестве сырья для производства другого топлива (в основном, бензина и дизельного топлива) и 20% – конечное потребление в отраслях народного хозяйства, в том числе промышленность (9%) и население (8%) имеют примерно равный вклад. Население использовало 78 млн т.у.т. природного топлива, 54 млн т.у.т. продуктов переработки топлива и около 70 млн т.у.т. тепловой энергии [Сведения…, 2022].

В России от сжигания топлива ежегодно выбрасывается 4,3 млн т загрязняющих веществ, или 33%

валового выброса от стационарных источников, в том числе 22% – производство электроэнергии, 11% – сжигание топлива для обеспечения теплом населения и технологических процессов в промышленности [Информация…, 2022]. В малых городах и сельских населенных пунктах теплоснабжение обеспечивают котельные и локальные отопительные установки. Печи и котлы в частных домах – конструктивно самый простой вариант, но при этом наименее экологичный. Так, на ТЭЦ и ГРЭС улавливается до 90% загрязняющих веществ, из отходящих газов котельных – до 20% [Информация…, 2022].

Доля общей площади жилищного фонда, использующей АСО в стране, составляет 38%, в республиках Северного Кавказа, в Калмыкии и на Алтае эта доля в 1,5–2 раза выше. Однако в большинстве этих регионов уровень газификации превышает 80% [Благоустройство…, 2022]. Основные проблемы возникают в регионах, в которых значительна доля площади, использующей АСО на угле и дровах, а уровень газификации близок к 0. Так, в республиках Алтай и Тыва эта доля составляет 70–82%, в Бурятии – 52, в Забайкальском крае – 48, в Иркутской области – 33% (рис. 1).

Байкальская природная территория (БПТ) обладает особым охранным статусом и, исходя из особенностей и значимости факторов влияния на уникальный природный объект, делится на три зоны. Центральная экологическая зона (ЦЭЗ) расположена в непосредственной близости от озера; буферная зона, включающая водосборный бассейн, – преимущественно на восточном берегу; зона атмосферного загрязнения – на западном. В ЦЭЗ не только запрещены некоторые виды деятельности, но и ликвидированы крупные источники промышленного воздействия, а влияние автотранспорта, небольших котельных и АСО меняется по сезонам из-за летнего туристического потока и сжигания топлива в осенне-зимний период [Антонов и др., 2022].

Несмотря на опасность загрязнения приземного слоя атмосферы в зоне жилой застройки при сжигании топлива в АСО, выбросы от них в статистке не учитываются. Если ТЭЦ и котельные отчитываются перед органами Росприроднадзора об объемах и структуре выбросов, то выбросы от АСО можно рассчитать только на основе нормативных методик расчета загрязнения. Данные системы очень важно учитывать, поскольку они не оборудованы системами очистки, и выбросы от них рассеиваются на меньшей высоте, в результате создаются большие концентрации загрязняющих веществ [Карелин и др., 2019].

В настоящее время методика оценки масштабов загрязнения от АСО отсутствует по ряду причин: нет точных данных о количестве домовладений, не обеспеченных централизованным теплоснабжением, о количестве и виде топлива, используемого населением, типе индивидуальных теплоагрегатов. Из-за сложности оценки объемов выбросов АСО не включаются в так называемые сводные расчеты загрязнения атмосферного воздуха[1] либо оцениваются с существенными неопределенностями [Волкодаева и др., 2023]. Из-за недостаточности первичных данных для моделирования рассеивания выбросов от АСО расчеты загрязнения приземного слоя атмосферы проводят для ограниченного числа источников [Толстова, Овчинников, 2020].

Исследования влияния АСО во многом сводятся к технологическим аспектам, классификации современных котельных агрегатов [Соколов, 2011], оценке эффективности таких систем в малоэтажном загородном строительстве [Иванов, 2011; Драбкина, Елсуков, 2019]. На основе лабораторных исследований сравниваются удельные выбросы при использовании разных видов топлива [Любов и др., 2019; Отопление…, 2014], дается характеристика микроэлементного состава образцов бурых теплоэнергетических углей при сжигании в АСО, рассматриваются выбросы CO, SO_2, NO_x, C, металлов [Михайлюта, Леженин, 2022]. Исследование почв в зоне влияния разных типов источников в Улан-Баторе (Монголия) показало, что низкотемпературное сжигание угля формирует слабоконтрастные аномалии Cu и Zn в районах юрточной застройки, в то время как в промышленной зоне вблизи ТЭЦ наблюдались аномалии As, Cr и Mo [Кошелева и др., 2010]. Как источник канцерогенного риска для человека рассматриваются выбросы ПАУ и их производных при сжигании углей [Household, 2010].

Другая линия изучения АСО – сравнение методик и нормативов расчета удельных выбросов. Например, обзор 12 методик по результатам расчета выбросов NO_2 показал низкую сходимость результатов расчетов [Костылева и др., 2021, с. 111]. Для оценки выбросов от АСО в пределах какой-то территории важно определить количество и площадь использующих их домовладений. Цель данной работы – разработка алгоритма расчета объемов выбросов в атмосферу от автономных систем отопления и оценка их роли в муниципалитетах БПТ и в сельских населенных пунктах ЦЭЗ, а также выявление особенностей рассеяния выбросов при сжигании топлива в АСО по сравнению с другими типами источников.

[1] Сводные расчеты – важный инструмент государственного управления в области охраны атмосферного воздуха, порядок которых утвержден Приказом Минприроды РФ от 29 ноября 2019 года № 813. Результаты их проведения представляют собой обобщенные сведения о концентрациях загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на территории населенного пункта или его части, полученные с использованием методов расчетов рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Их проведение необходимо для включения территорий в нацпроект «Чистый воздух».

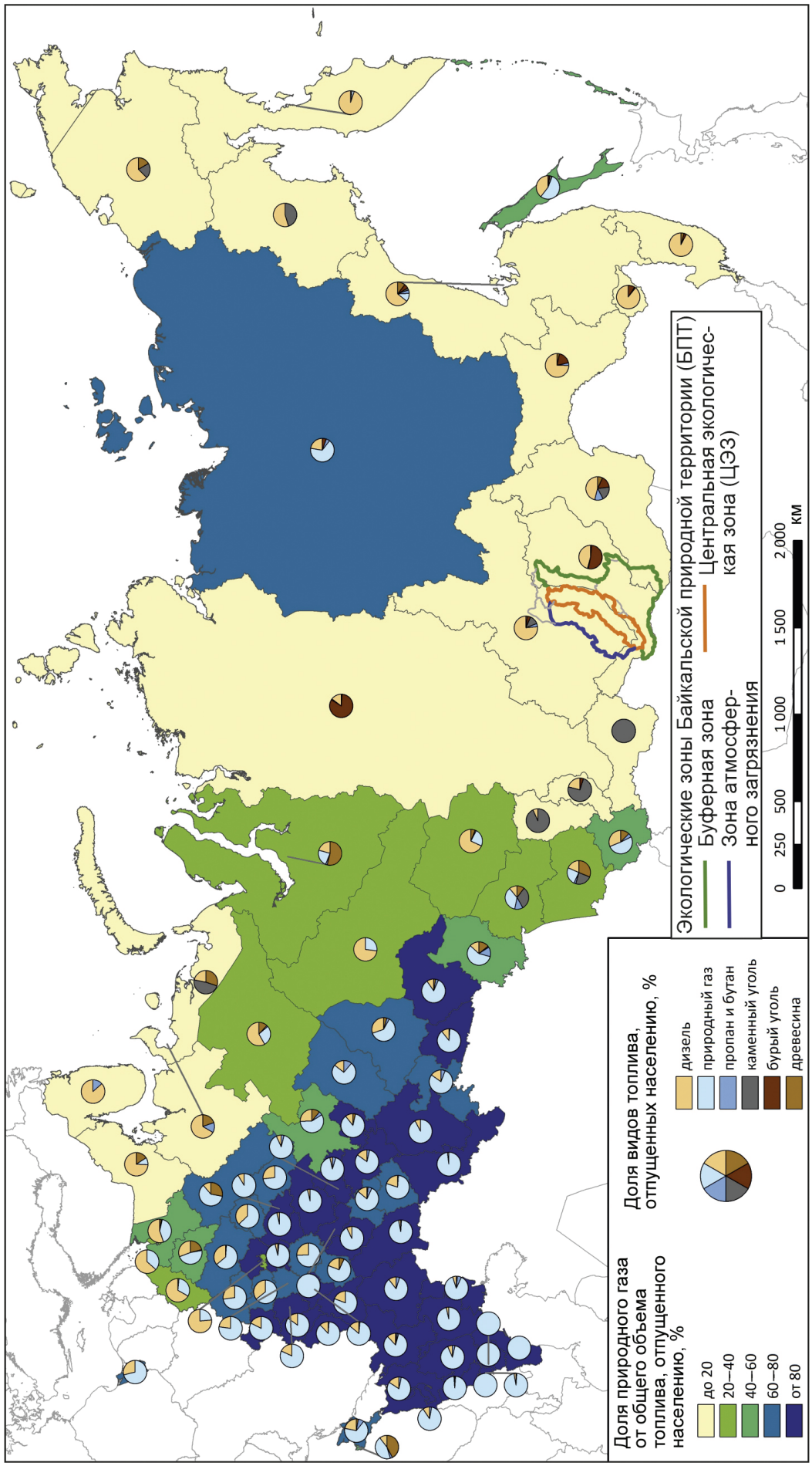


Рис. 1. Доля видов топлива, отпускаемых населению по субъектам России, 2020 г.

Fig. 1. The share of fuel types sold to the population by constituent entities of Russia, 2020

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В расчетах использовались следующие данные:

– перечень МО 1-го и 2-го уровней, входящих в состав БПТ и населенных пунктов в ЦЭЗ [Экологический…, 2022] и данные OpenStreetMap о местоположении населенных пунктов;

– спутниковые снимки Sentinel-2, Maxar (предоставлены сервисом Google Earth) для автоматического и визуального дешифрирования зон индивидуальной застройки и подсчета количества подворий;

– сервис «Яндекс.Панорамы» для визуальной проверки и коррекции результатов автоматического дешифрирования;

– данные о жилой площади в разрезе муниципалитетов [Показатели…, 2022];

– опросы глав и специалистов администраций в 32 муниципальных районах, 57 сельских поселениях и населения в 125 населенных пунктах БПТ использовались для определения видов топлива, используемого в АСО жилых строений, а также для оценки среднего потребления топлива на 1 м^2 жилой площади;

– для верификации методов определения числа индивидуальных жилых строений и расчета выбросов от АСО использовались материалы, предоставленные органами администрации исследованных районов и сельских поселений; заключения о проведении сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха на территории населенных пунктов в соответствии с контрактом от 17.07.2021 № 00066 «Проведение сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха на территории г. Улан-Удэ, пос. Селенгинск и пос. Каменск Кабанского района, г. Гусиноозерск Селенгинского района».

Методика исследования включала два этапа: расчет объемов выбросов и расчет ареалов рассеяния выбросов от АСО для сравнения с другими источниками.

Расчет объема выбросов от сжигания топлива в АСО жилых строений в разрезе населенных пунктов, входящих в ЦЭЗ, состоял из следующих шагов:

Выявление границ отдельных частных подворий в пределах населенного пункта методом автоматического дешифрирования космических снимков, включая их сегментацию (разделение изображений на фрагменты с относительно однородными спектральными характеристиками); классификацию сегментированного изображения с обучением для разделения сегментов, включающих здания и строения, растительность, дороги и незадернованные поверхности, границы между подворьями; создание маски отдельных подворий, т. е. выделение зон между границами подворий и конвертацию растровой маски в векторный слой (рис. 2).

Рис. 2. Пример результатов промежуточных этапов автоматического дешифрирования границ подворий в зонах индивидуальной жилой застройки

Fig. 2. An example of the results of intermediate stages of automatic decoding of the boundaries of farmsteads in zones of individual residential development

Визуальная проверка и коррекция границ подворий с применением снимков, доступных в сервисах Google Earth и «Яндекс.Панорамы». Для этого использовались данные о количестве индивидуальных жилых домов, полученные в ходе опросов администрации некоторых репрезентативных сельских поселений и населенных пунктов. В целом расхождение в оценках количества домовладений составляет

около 7,3%, что, как правило, характерно для населенных пунктов с размещением туристических баз и других мест размещения рекреантов, которые слабо отличимы от индивидуальной жилой застройки при автоматическом дешифрировании.

Подсчет количества подворий для всех населенных пунктов ЦЭЗ показал, что в целом средний размер индивидуального домохозяйства в ЦЭЗ составляет 2,26 чел., но численность постоянного населения на одно подворье в населенных пунктах варьирует значительно: от 0,16 (п. Толбазиха) до 29 чел. (г. Байкальск). В сельских населенных пунктах, где отсутствуют многоквартирные дома и объекты рекреации, средний размер индивидуального домохозяйства составляет 1,7 чел.

Распределение площади индивидуальных жилых строений поселений пропорционально количеству подворий в пределах населенных пунктов, входящих в поселение. Оценка площади жилых строений для всей БПТ по населенным пунктам проведена путем распределения значений жилой площади, доступной в базах Росстата [Благоустройство…, 2022], пропорционально количеству индивидуальных подворий.

Оценка среднего потребления топлива (угля и дров) для отопления 1 м² жилой площади определялась по данным опросов населения и представителей администрации репрезентативных поселений. Опросы и интервью показали, что в сельских населенных пунктах, особенно в удаленных от городских центров, доля использования дров увеличивается до 90% ввиду высокой стоимости угля и сложностей его доставки. В городах доля дров ниже и варьирует от 40 до 60%. При этом среднее удельное потребление дров составляет около 0,25 м³/м² жилой площади в год, а потребление угля – около 80 кг/м². Для проверки точности расчетов с применением опросов было произведено сравнение с данными, полученными в администрации Северо-Байкальского района. Средние расхождения в оценках составляют около 17% (табл. 1).

Таблица 1

Расхождение расхода топлива в автономных системах отопления между результатами расчетов и данными администрации Северо-Байкальского района

Населенный пункт	Расход топлива, т		Тип топлива
	по результатам расчетов, основанных на опросах населения	по данным администрации Северо-Байкальского района	
Кичера	3396	4000	Дрова
Нижнеангарск	22 056	21 900	Дрова
Нижнеангарск	509	600	Уголь
Верхняя заимка	3257	3100	Дрова
Холодная	1269	1240	Дрова
Байкальское	11 308	10 700	Дрова

Расчет выбросов загрязняющих веществ от сжигания топлива проводился по формуле:

$$M_{tot} = s_{\text{д.о}}\, b_{\text{д.уд}} \left(M_{\text{NO}_x\,\text{д.уд}} + M_{\text{SO}_2\,\text{д.уд}} + M_{\text{CO}\,\text{д.уд}} + M_{\text{тв}\,\text{д.уд}}\right) + \\ + s_{\text{у.о}}\, b_{\text{у.уд}} \left(M_{\text{NO}_x\,\text{у.уд}} + M_{\text{SO}_2\,\text{у.уд}} + M_{\text{CO}\,\text{у.уд}} + M_{\text{тв}\,\text{у.уд}}\right),$$

где M_{tot} – объем выбросов от АСО, т/год; $s_{\text{д.о}}$ – площадь строений с АСО, использующих дрова; $s_{\text{у.о}}$ – площадь строений с АСО, использующих уголь; $b_{\text{д.уд}}$ и $b_{\text{у.уд}}$ – удельный расход соответственно дров и угля на 1 м² жилых строений, т/(м²·год); $M_{\text{NO}_x\,\text{д.уд}}$, $M_{\text{SO}_2\,\text{д.уд}}$, $M_{\text{CO}\,\text{д.уд}}$, $M_{\text{тв}\,\text{д.уд}}$ – удельные объемы выбросов соответственно NO_x, SO_2, CO и взвешенных частиц на 1 т сожженных дров (в данном исследовании, согласно [Методика…, 1999], принято значение в 53,65 кг выбросов на тонну сожженных дров); $M_{\text{NO}_x\,\text{у.уд}}$, $M_{\text{SO}_2\,\text{у.уд}}$, $M_{\text{CO}\,\text{у.уд}}$, $M_{\text{тв}\,\text{у.уд}}$ – удельные объемы выбросов соответственно NO_x, SO_2, CO и взвешенных частиц на одну 1 т сожженного угля [Методика…, 1999]. Удельные объемы выбросов варьируют в зависимости от месторождения используемого угля приблизительно в диапазоне 20%. В среднем по исследуемой территории удельный выброс от сжигания 1 т угля составляет 88,75 кг.

Верификация полученных результатов осуществлялась путем сравнения расчетных значений выбросов с данными заключений о проведении сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха на территории населенных пунктов в соответствии

с контрактом № 00066 «Проведение сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха на территории г. Улан-Удэ, пос. Селенгинск и пос. Каменск Кабанского района, г. Гусиноозерск Селенгинского района» от 17.07.2021. При разработке заключений авторами использовались в том числе результаты натурных обследований жилых кварталов с целью уточнения расположения автономных источников теплоснабжения и параметров источников выбросов. Среднее расхождение расчетов с данными, представленными в заключениях, составляет около 14% (табл. 2). Согласно результатам расчетов в программном комплексе «ЭРА» это соответствует погрешности в оценке приземных концентраций около 5%.

Таблица 2

Расхождения в оценке объемов выбросов АСО с данными заключений о проведении сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха

Муниципальное образование	Объем выбросов, т/год	
	по результатам расчетов	по данным, содержащимся в заключении
Городское поселение «Город Гусиноозерск»	1564	2031
Городское поселение «Каменское»	990	976
Городское поселение «Селенгинское»	759	1039
Городской округ «Город Улан-Удэ»	22 100	23 852

Для *оценки особенностей рассеяния выбросов в зоне жилой застройки* при сжигании топлива в АСО и других типах источников (ТЭЦ и котельных) был проведен расчет *среднегодовых приземных концентраций*, формирующихся от всех типов источников, с учетом значений суммарных выбросов, температуры и скорости выхода газо-воздушной смеси, высоты и диаметра устья источника при метеорологических условиях, близких к среднегодовым [Методы…, 2022]. Выбросы загрязняющих веществ от ТЭЦ опубликованы в Государственном докладе «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2021 году» [Государственный…, 2021], а объем выбросов котельных был рассчитан по [Методика…, 1999] на основе данных об объемах и видах используемого топлива, типе котла, предоставленных администрациями МО. Для расчетов объемов выбросов были использованы характеристики Черемховского и Ирша-Бородинского угля, дров, пеллетов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Роль АСО в структуре выбросов муниципальных образований. Для БПТ вклад АСО в суммарный объем выбросов, включая автотранспорт[2], составляет 35% (265 тыс. т в год), что сопоставимо с выбросами от ТЭЦ и котельных (335 тыс. т), в 2,2 раза превышает выбросы от автотранспорта и судов и в 3,2 раза – промышленное загрязнение.

Для МО среднее значение выбросов от использования АСО составило 5,4 тыс. т в год, максимальный объем выбросов в городе Улан-Удэ (28,3 тыс. т), а минимальный – в г. Свирске (1,4 тыс. т). Различия в основном обусловлены тремя факторами: численностью населения, долей площади жилых строений без центрального отопления и топливом, которое использует население. Достаточно высокий объем выбросов характерен для пригородных районов Улан-Удэ со значительной долей угля – Иволгинского, Заиграевского, а также большинства южных МО Бурятии. Значительная доля угля в АСО характерна для Забайкальского края, а также Черемховского и Усольского районов Иркутской области.

Таким образом, АСО наряду с ТЭЦ и котельными являются доминирующим источником выбросов в большинстве МО. Но в территориальной структуре выделяются две полосы, расположенные вдоль Транссиба и БАМа, где разнообразные источники вносят свой вклад в загрязнение воздуха (рис. 3). Транссиб стал осью формирования агломераций вокруг региональных центров, здесь находятся крупнейшие электростанции, энерго- и топливоемкие производства. БАМ – зона нового развития: освоение Ковыктинского газоконденсатного месторождения, строительство газопровода «Сила Сибири», второй ветки БАМа и терминала по отгрузке газового конденсата в п. Окунайский – все это способствует разнообразию источников выбросов и топлив-

[2] Выбросы от автотранспорта рассчитаны по данным ФНС (форма 5-т) и «Методике определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха» (утверждено Приказом Минприроды России от 27.11.2019 № 804. Зарегистрировано в Минюсте России 24.12.2019 № 56957).

ных ресурсов. Между ними расположена обширная территория сельской местности, где при печном отоплении домов традиционно используются дрова и отходы лесозаготовки – главный источник загрязнения, но по мере продвижения на юг в топливном балансе населения увеличивается доля угля.

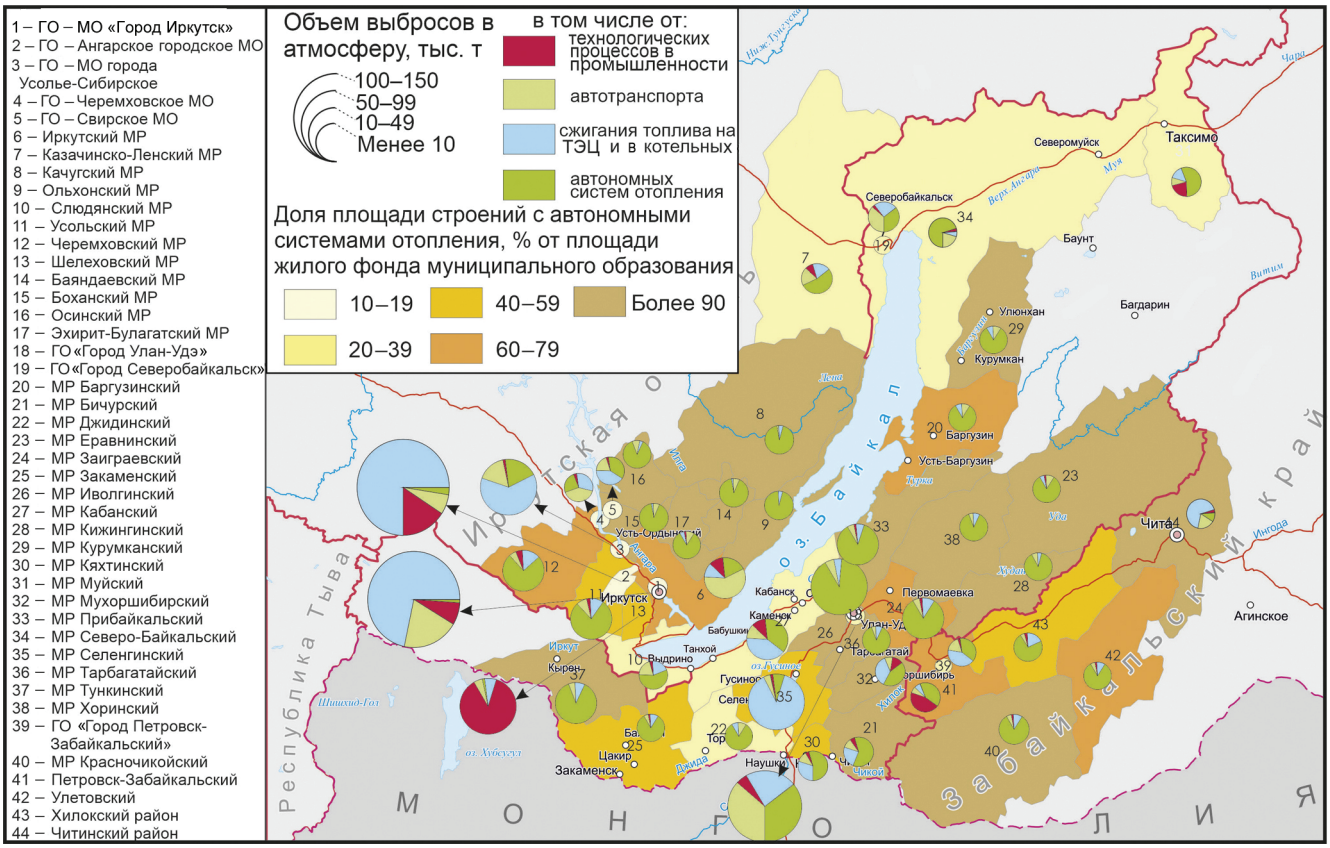


Рис. 3. Доля выбросов от автономных систем отопления в общем объеме выбросов в атмосферу в муниципальных районах, входящих в БПТ

Fig. 3. Share of emissions from autonomous heating systems in total air emissions in municipal areas included in the BNT

В результате особенностей ЭГП и ресурсного потенциала районов вокруг Байкала сформировалось несколько типов территорий по соотношению разных источников загрязнения атмосферы:

– в Иркутско-Черемховской агломерации и Селенгинском районе Бурятии основными источниками выбросов являются ТЭЦ и котельные в сочетании с 10–20% выбросов от автотранспорта и промышленности. Здесь размещены крупные не только в масштабах региона, но и страны топливные электростанции на угле. Объем выбросов от ТЭЦ в Иркутске и Ангарске превышает 200 тыс. т в год. В г. Усолье-Сибирское ТЭЦ-11 после закрытия основного предприятия «Усольехимпром» стала главным источником выбросов. В Селенгинском районе Бурятии основной источник загрязнения – Гусиноозерская ГРЭС, работающая на местном угле;

– в городах Улан-Удэ, Северобайкальск, Черемхово и Свирск, в пригородных Иволгинском и Читинском районах, рекреационном Ольхонском районе примерно равный вклад в загрязнение вносят централизованное, локальное теплоснабжение и автотранспорт;

– на отдельных территориях сохранилась существенная доля промышленных выбросов, в основном от предприятий цветной металлургии: в Шелехове (выбросы алюминиевого завода) и в Петровске-Забайкальском, в Муйском районе (золотодобыча);

– большая часть МО характеризуется преобладанием печного топления. В Иркутской области значительная часть частного сектора использует электроэнергию, поскольку тарифы на нее в шесть раз ниже, чем в соседней Республике Бурятия, в северной части преобладают дрова. На восточном берегу примерно в равных пропорциях используются дрова и уголь, особенно в районах, где он добывается. В Мухоршибирском, Бичурском и соседних с ними районах Бурятии используют в основном каменный

уголь Тугнуйского и бурый Окино-Ключевского разрезов; в Петровск-Забайкальском, Хилокском и Читинском районах – бурый уголь Тигнинского месторождения. Даже в г. Гусиноозерске, несмотря на наличие ГРЭС, в частном секторе топят углем, который работники Гусиноозерского разреза получают по льготным ценам.

Особое место занимает ЦЭЗ, где печное топливо является главным источником выбросов, несмотря на их небольшие объемы. Повышенной плотностью выбросов характеризуются относительно крупные населенные пункты, с частичным присутствием угля. Вблизи южного берега озера, в Утуликском сельском поселении и Слюдянском городском поселении плотность выбросов варьирует от 2 до 17 т/км^2. На западном берегу в с. Еланцы, где проживает около 5,5 тыс. чел. и используется частично уголь, плотность выбросов составляет 2,4 т/км^2. На восточном берегу озера в районе дельты Селенги, в Колесовском, Красноярском, Байкало-Кударинском сельских поселениях плотность выбросов в зоне варьирует от 1,1 до 3,1 т/км^2. Данная зона содержит более 15 населенных пунктов с объемом выбросов от 20 до 595 т/год (рис. 4).

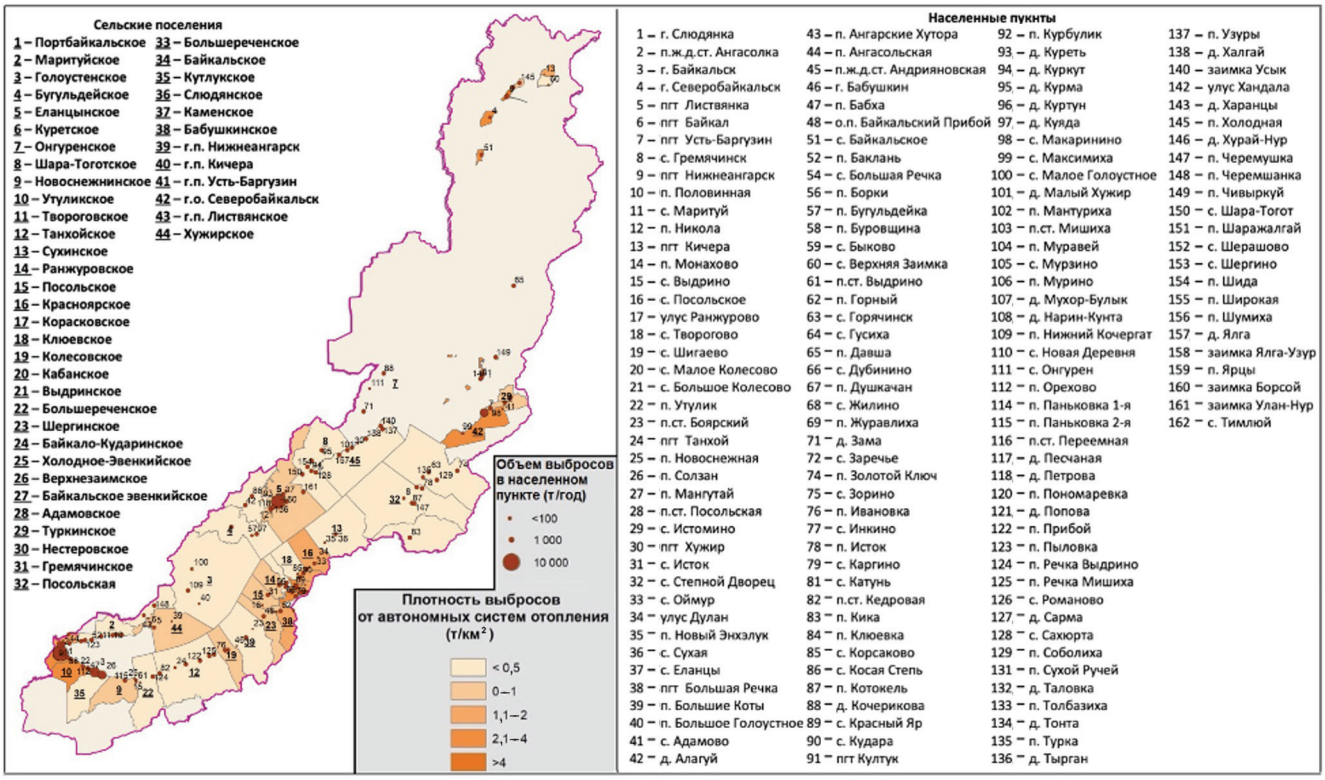


Рис. 4. Выбросы автономных систем отопления жилых строений в населенных пунктах, расположенных в ЦЭЗ БПТ

Fig. 4. Emissions from autonomous heating systems of residential buildings in settlements located in the central ecological zone of the Baikal natural territory

Структура источников во многом определяет и меры снижения загрязнения: в Иркутско-Черемховской агломерации выбросы от частного сектора можно снизить, подключив ИЖС к существующим котельным. Например, в окраинных районах г. Черемхово за счет средств нацпроекта «Экология» реализуется такой сценарий. В северной части западного берега, в лесных Казачинско-Ленском, с меньшей вероятностью Качугском районах, перспективным является перевод на газ. Такому сценарию способствует прокладка магистрального газопровода, затрудняет его реализацию – низкие доходы и консервативность населения, которому сложно менять сложившийся уклад жизни. С аналогичными сложностями могут столкнуться и стратегии большего использования пеллет из отходов деревообработки, производимых в п. Улькан, поскольку для этого также необходимо заменить печи на котлы нового типа.

Мелкоселенный тип расселения, большие расстояния между населенными пунктами, высокий уровень тарифов на электроэнергию в Бурятии и Забайкальском крае, а также низкоширотное расположение в сравнении с остальной частью страны могут сделать перспективным для населения использование солнечных панелей. Солнечные электростанции небольшой мощности уже работают

в с. Тарбагатай в Бурятии и в Читинском районе, но они отдают энергию в сеть. Разработка программы помощи населению в установке солнечных панелей для начала в ЦЭЗ будет способствовать не только снижению уровня загрязнения, но и улучшению качества жизни, имиджа территории, развитию экологического туризма.

Особенности рассеяния выбросов от разных источников сжигания топлива. Роль АСО в загрязнении зоны жилой застройки определяется не только объемами выбросов, но и особенностями их рассеяния по сравнению с выбросами от ТЭЦ и котельных. Для поселений разного типа на юго-западном берегу Байкала были рассчитаны ареалы рассеяния, при этом особый интерес представляли территории, на которых наблюдается сочетание ареалов от разных типов источников.

Таблица 3

Основные характеристики ареалов рассеяния выбросов в атмосферу от разных типов источников в Иркутской области

Источники выбросов	Объем выбросов, т/год	Среднегодовые концентрации, доля от ПДК	Структура ареала рассеяния, радиус зон, км от источника	
			«ветровой тени»	увеличения приземных концентраций
ТЭЦ: ТЭЦ-9, ТЭЦ-9 (участок 1), ТЭЦ-10 г. Ангарска, Новоиркутская ТЭЦ, Шелеховский участок, ТЭЦ-11 г. Усолье-Сибирское	$5{,}7–55{,}2 \cdot 10^3$ [Государственный доклад…, 2021]	До 0,4–0,6 в местах индивидуального воздействия ТЭЦ-9 и до 0,94 в местах пересечения ареалов воздействия ТЭЦ-9 и ТЭЦ-10	0–1, до 2 у наиболее крупных ТЭЦ	0,5–5, максимально до 8
Котельные: с. Еланцы (3), д. Куреть, п. Бугульдейка «Угольная», п. Листвянка, п. Портбайкал, «Центральная» г. Свирска, Черемхово (5)	40–1792[1]	0,18–1,11	Нет	До 0,5–1
АСО (дрова, уголь, электрокотлы): с. Еланцы, д. Куреть, д. Бугульдейка, с. Онгурен, г. Черемхово	158–2200[2]	1,6–4,9	Нет	До 2,5 от населенного пункта, для малых не выходит за пределы населенного пункта
АСО (электрокотлы, дрова): п. Портбайкал, п. Листвянка, п. Большая Речка	59–261	0,5–0,76	Нет	Не выходит за пределы населенного пункта

Примечание. [1] Рассчитано по данным потребления топлива котельными (данные администрации района) и [Методика…, 1999].
[2] Рассчитано по [Показатели…, 2022; Сведения…, 2022], расчетам, основанным на анализе данных дистанционного зондирования, опросах местного населения и глав администраций муниципальных образований и методике [Методика…, 1999].

Особенностями *ареалов рассеяния выбросов ТЭЦ* является достаточно низкая концентрация в пределах зоны воздействия, не превышающая ПДК, что характерно не только для станций на газе [Битюкова и др., 2021], но и для крупнейших угольных ТЭЦ (Ново-Иркутская ТЭЦ, ТЭЦ-9 и ТЭЦ-10 в г. Ангарске). Однако существенную опасность от угольных станций представляет большой радиус зоны с заметным (более 0,1 ПДК) воздействием на качество воздуха, который достигает 5–10 км от источника и выходит за пределы населенного пункта, а также то, что в структуре выбросов наибольшая концентрация характерна для SO_2 (0,9 ПДК). Результаты в целом согласуются с исследованиями, в которых рассчитаны зоны различной частоты превышения ПДКс.с. на территории Прибайкалья [Вологжина, 2012].

Пространственная дифференциация ареалов всех веществ схожа: выделяются зоны с наименьшей концентрацией в непосредственной близости от источников, так называемые зоны «ветровой тени», затем концентрации увеличиваются, достигают максимума и постепенно убывают. Размер зон по каждому веществу обусловлен разной скоростью

оседания: минимальный характерен для взвешенных частиц, наибольший – для SO_2. В результате наибольший уровень концентрации твердых частиц достигается уже на удалении более чем 2,7 км, а SO_2 – 6,9 км от источника. В этих условиях жилые районы городов Ангарск, Иркутск и Шелехов находятся в зоне заметного загрязнения SO_2, а западная часть г. Ангарска также и NO_2. Для ТЭЦ-11 г. Усолье-Сибирское превышения ПДК по всем веществам отсутствуют, наибольшие концентрации достигаются при выбросах SO_2 – 0,23 ПДК, формируя два максимума приземных концентраций – к северу и к югу от источника (рис. 5, А).

Котельные являются источниками выбросов средней высоты. С одной стороны, они также не формируют превышений ПДК, максимальные приземные концентрации обусловлены выбросами SO_2, с другой – отсутствует зона ветровой тени, максимальные концентрации расположены в непосредственной близости от источника (для SO_2 не превышает 200 м, взвешенных частиц – 400–600 м). В результате объем выбросов котельных в большинстве случаев не превышает 1 тыс. т в год, а концентрации загрязняющих веществ в среднем в 3–4 раза выше, чем у высоких источников (табл. 3).

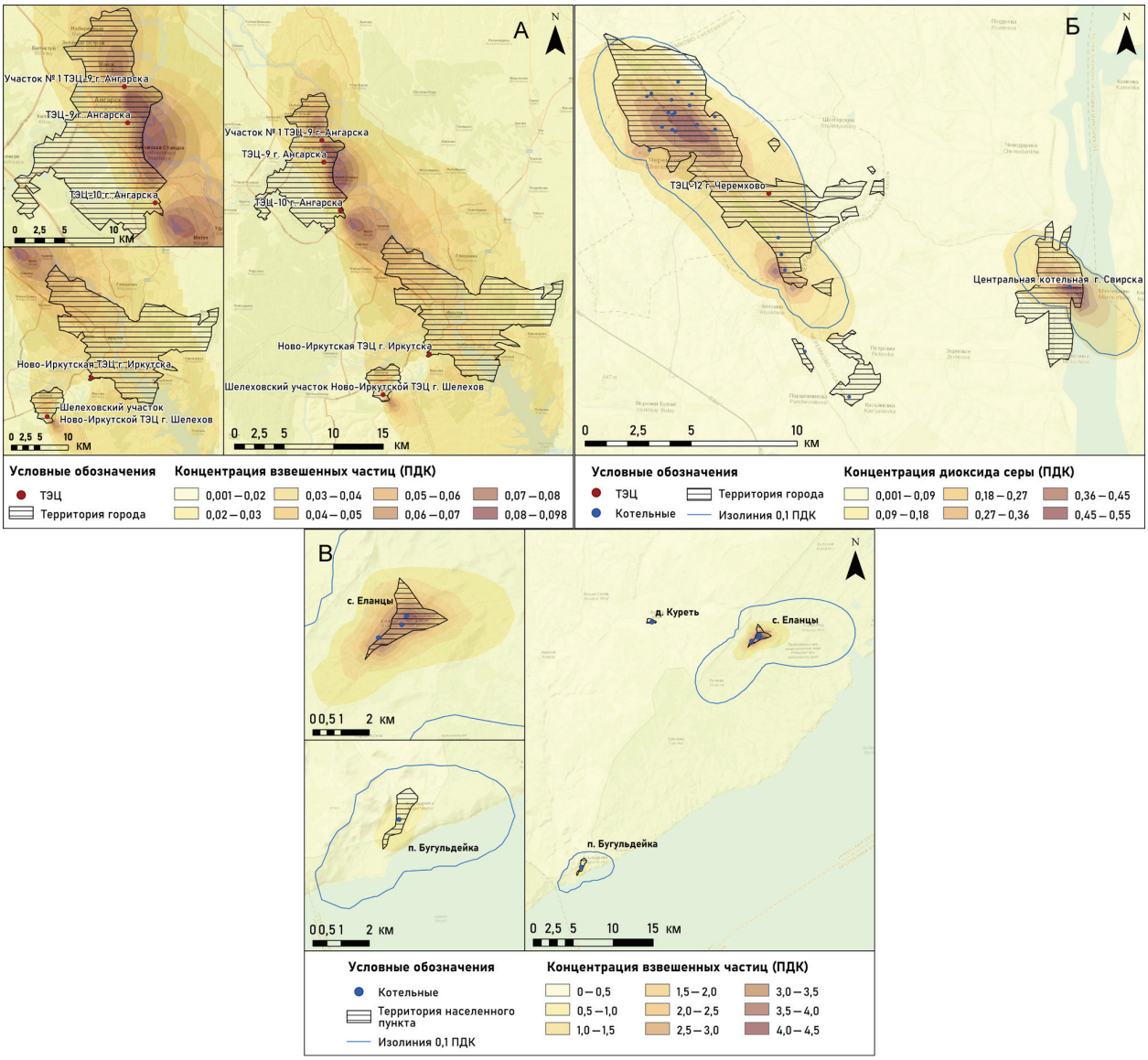


Рис. 5. Среднегодовые концентрации взвешенных частиц, формирующиеся в результате рассеяния выбросов от: А – ТЭЦ городов Иркутск, Шелехов и Ангарск; Б – котельных и ТЭЦ г. Черемхово; В – АСО в с. Еланцы, д. Куреть и п. Бугульдейка

Fig. 5. Average annual concentrations of suspended particles formed as a result of dispersion of emissions from: А – CHPPs in Irkutsk, Shelekhov and Angarsk; Б – boiler houses and CHPPs in Cheremkhovo; В – from autonomous heating systems of individual residential buildings in the villages Elantsy, Kuret and Buguldeyka

АСО создают более высокие уровни загрязнения в поселениях, где используются дрова и уголь (Еланцы, Бугульдейка, Куреть, Онгурен, окраина г. Черемхово). Вторым фактором является число источников. Так, в населенных пунктах, где расположено более 1000 домов, средняя концентрация загрязняющих веществ превышает ПДК в 4,5–5 раз, 300–400 домов – в 2–2,5 раза, около 200 домов – 0,75–1 ПДК. В самом крупном с. Еланцы зона с пятикратным превышением ПДК имеет радиус до 2,5 км и охватывает всю территорию села, а зона 0,1 ПДК распространяется до 10 км. Чем меньше населенный пункт, тем более простую структуру представляют собой ареалы рассеяния (см. рис. 5, В).

Результаты расчетов среднегодовых концентраций, формирующихся от выбросов котельных и АСО п. Байкал, Листвянка и Большая Речка, где большая часть домовладений использует электрические котлы и дрова, показали, что превышения ПДК по всем веществам отсутствуют. Зона с максимальными значениями концентраций формируется за пределами территории населенных пунктов. Между поселками Байкал и Листвянка наблюдается зона с максимальными концентрациями радиусом около 1 км. В зону с существенным влиянием попадает восточная часть п. Байкал.

В западной части Иркутско-Черемховской агломерации, где действуют все три типа источников, среднегодовые концентрации, формирующиеся при рассеивании выбросов загрязняющих веществ от котельных и ТЭЦ-12, незначительно превышают ПДК. Наибольшие приземные концентрации формируются при рассеивании выбросов взвешенных частиц и SO_2 и равны 1,1 и 0,5 ПДК соответственно. Выделяются три максимума приземных концентраций SO_2, которые расположены в пределах территории городов Черемхово и Свирск (см. рис. 5, Б). Радиус наибольшей такой зоны равен около 1 км, наименьшей – 0,15 км. Для взвешенных частиц формируется один максимум, затрагивающий большую часть г. Свирска радиусом около 1,2 км. В г. Черемхово максимальный уровень превышения ПДК достигается в северо-западной и северной частях города, а также на периферии южной и восточной частей, имеющих малоэтажную застройку, где в АСО используется уголь. Данные результаты косвенно подтверждаются полевыми наблюдениями: для г. Улан-Батора определены степень техногенности выбросов и их основные источники. Доказано, что загрязнение снежного покрова уменьшается в ряду: юрточные районы > промзона > многоэтажные районы, т. е. наиболее опасные уровни загрязнения создаются в результате действия именно АСО на угле [Сорокина и др., 2013].

Таким образом, большинство котельных и ТЭЦ не приводит к превышению ПДК ни по одному загрязняющему веществу, что связано с большой высотой труб, наличием систем очистки выбросов от взвешенных частиц, а также сравнительно низкой плотностью указанных источников выбросов в регионе. Исключением является котельная г. Свирска, которая не имеет систем очистки выбросов, обладает большой мощностью, большими выбросами загрязняющих веществ, что приводит к превышению ПДК в непосредственной близости от источника.

Особенностями ареалов рассеяния выбросов индивидуальных жилых строений являются:

– отсутствие зоны низких приземных концентраций в непосредственной близости от источников, что связано с высокой плотностью источников выбросов в массивах индивидуальной жилой застройки, небольшой высотой труб, низким расходом газовоздушной смеси и относительно низкой температурой выброса;

– локальные максимумы концентрации тяготеют к центрам массивов индивидуальной жилой застройки;

– зоны превышения ПДК в большинстве случаев локальны (не более 700 м от источника) и не выходят за пределы населенных пунктов;

– зоны заметного (более 0,1 ПДК) воздействия на качество атмосферного воздуха распространяются на расстоянии не более 2–3 км от границ населенных пунктов;

– выбросы котельных и ТЭЦ образуют крупные по площади ареалы и могут оказывать воздействие на соседние населенные пункты, однако интенсивность такого воздействия в большинстве случаев невелика. Выбросы индивидуальных жилых строений, напротив, в большинстве случаев приводят заметному (>0,1 ПДК) и значительному (>1 ПДК) воздействию на качество атмосферного воздуха, однако ареалы такого воздействия редко существенно выходят за пределы населенных пунктов.

ВЫВОДЫ

Разработанный алгоритм расчета объемов выбросов загрязняющих веществ от индивидуальной жилой застройки на обширной территории Байкальского региона позволил определить масштабы данного типа загрязнения. В пределах БПТ, несмотря на наличие крупных промышленных предприятий, энергетики на угле, развитого автомобильного и речного транспорта, вклад АСО в объем выбросов в атмосферу превышает 32%. Если для крупных городов и промышленных районов в структуре источников выбросов в атмосферу на первом месте энергетика, то для значительных территорий с индивидуальной застройкой, менее развитых территорий

особое значение имеют АСО, вклад которых превышает 90%, что часто недооценивается, поскольку не фиксируется официальной статистикой.

Влияние АСО определяется системой расселения, уровнем благоустройства жилого фонда и спецификой используемого топлива. Территория БПТ среди регионов России характеризуется средним уровнем благоустройства, где около половины жилого фонда имеют АСО, но значительные объемы выбросов связаны с характером используемого топлива. Согласно проведенным опросам, уголь преобладает в южных районах Бурятии и Забайкальском крае, дрова – в северной части как Иркутской области, так и Бурятии. Несмотря на низкий тариф на электричество в Иркутской области, в зоне Черемховского угольного бассейна используют уголь, а в северной части – дрова.

Сжигание топлива является основным источником выбросов для почти всех районов БПТ, но на низовом уровне в крупных городах доминируют угольные ТЭЦ, унаследованные от периода ускоренной индустриализации, в малых городах и районных центрах – небольшие, но организованные источники, обслуживающие социальную сферу. Для большей части жилого фонда, особенно рассредоточенного, определяющими являются АСО. Они формируют единую зону воздействия между Транссибом и БАМом, включая территорию ЦЭЗ. Ситуацию дополнительно осложняет стремительное развитие рекреационной сферы, объекты которой рассредоточенные по побережью, что закрепляет архаичную модель системы отопления.

На значительной части территории страны АСО недооцененный, при этом повсеместный и очень опасный источник выбросов в атмосферу. Опасность загрязнения от АСО определяется низкой высотой источников, плотностью жилой застройки, отсутствием систем очистки и особенно видом используемого топлива. В зоне их влияния при использовании угля уровень приземных концентраций загрязняющих веществ возрастает до 5 ПДК, а дров – до 2–2,5 ПДК. Особенность БПТ – сочетание высокозольных местных углей и дров, которые выглядят более экологичными.

Полученные оценки объемов и характера рассеяния выбросов от АСО на данных территориях позволят включить их в систему приоритетных мер по снижению загрязнения. По плотности воздействия АСО превышают не только ТЭЦ, но и котельные. Для развития учреждений туризма и рекреации в ЦЭЗ необходимо использовать локальные установки возобновляемых источников энергии, в городах и крупных населенных пунктах – максимально использовать унаследованную инфраструктуру предприятий и котельные.

Разработанная методика показала высокий уровень точности расчетов. Новизна предложенной методики состоит в учете числа жилых помещений на основе космических снимков, которые выборочно верифицируются натурными обследованиями, что сопоставимо с оценкой муниципалитетов, которые используются в практике госуправления. Оценка площади жилых строений в разрезе населенных пунктов возможна путем распределения пропорционально количеству индивидуальных подворий. Это позволяет произвести расчет объема выбросов от АСО по всем регионам страны без необходимости проведения трудоемких натурных исследований.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта № 8/Д-2021 «Разработка интегрированной (интегральной) оценки антропогенного воздействия и состояния окружающей среды озера Байкал»; НИР государственного задания кафедры экономической и социальной географии России № 121051100161-9 «Современная динамика и факторы социально-экономического развития регионов и городов России и Ближнего Зарубежья».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антонов Е.В., Беляев Ю.Р., Битюкова В.Р., Бредихин А.В., Дехнич В.С., Еременко Е.А., Колдобская Н.А., Прусихин О.Е., Сафронов С.Г. Интегральная оценка антропогенного воздействия на Байкальской природной территории: методические подходы и типология муниципальных районов // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. № 3. С. 430–447. DOI: 10.31857/S2587556623030032.

Битюкова В.Р., Дехнич В.С., Петухова Н.В. Влияние ГРЭС на загрязнение воздуха городов России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 4. С. 38–51.

Волкодаева М.В., Карелин А.О., Ломтев А.Ю., Канчан Я.С., Левкин А.В., Тимин С.Д. Учет выбросов загрязняющих веществ от автономных источников теплоснабжения индивидуальных жилых домов при проведении сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха для населенных пунктов // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102. №. 2. С. 141–147. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-2-141-147.

Вологжина С.Ж. Оценка пространственно-временного распределения антропогенных примесей в атмосфере Прибайкалья: автореф. дис. … канд. геогр. наук. Улан-Удэ, 2012. 22 с.

Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2022 году». Иркутск: Ин-т географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2021. 360 с.

Драбкина Е.В., Елсуков А.В. Оценка энергоэффективности автономных источников теплоснабжения // Наука и техника транспорта. 2019. № 3. С. 88–92.

Иванов В.А. Исследование целесообразности использования автономных систем теплоснабжения на Севере // Актуальные вопросы технических наук: материалы Междунар. науч. конференции (г. Пермь, июль 2011 г.). Пермь: Меркурий, 2011. С. 57–58.

Карелин А.О., Ломтев А.Ю., Фридман К.Б., Еремин Г.Б., Панькин А.В. Выявление источников выбросов загрязняющих веществ, вызывающих жалобы населения на неприятные запахи. Гигиена и санитария. 2019. Т. 98. № 6. С. 601–607. DOI: 10.18821/0016-9900-2019-98-6-601-607.

Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Бажа С.Н., Гунин П.Д., Голованов Д.Л., Ямнова И.А., Энхамгалан С. Загрязнение почв тяжелыми металлами в промышленных городах Монголии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2010. № 3. С. 20–27.

Костылева Н.В., Дьяков М.С., Кварцхава К.Р. Сравнительный анализ подходов к расчету выбросов в атмосферный воздух от индивидуальных теплоагрегатов // Проблемы региональной экологии. 2021. № 6. С. 108–112.

Любов В.К., Попов А.Н., Попова Е.И., Малыгин П.В., Солнышкова Л.М. Исследование эффективности сжигания древесного биотоплива в теплогенерирующей установке // Лесной журнал. 2017. № 4. С. 149–161.

Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 20 Гкал в час. М.: Госкомэкология РФ, 1999. 76 с.

Михайлюта С.В., Леженин А.А. Влияние выбросов автономных источников теплоснабжения на загрязнение атмосферного воздуха // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 4. С. 116–123.

Соколов Б.А. Паровые и водогрейные котлы малой и средней мощности: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. 3-е изд., стер. М.: Академия, 2011. 128 с.

Сорокина О.И., Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Голованов Д.Л., Бажа С.Н., Доржготов Д., Энх-Амгалан С. Тяжелые металлы в воздухе и снежном покрове Улан-Батора // География и природные ресурсы. 2013. № 3. С. 159–170.

Тикунов В.С., Черешня О.Ю., Грибок М.В., Яблоков В.М. Методика оценки регионов России по уровню загрязнения воздуха // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 5. с. 43–48.

Толстова Ю.И., Овчинников А.А. Загрязнение воздушного бассейна городов выбросами источников теплоснабжения // Сб. ст. VI Международной конференции: Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур SAFETY2020. Екатеринбург, 2020. С. 188–192.

Cheng Y., Engling G., He K.-B. et al. Biomass burning contribution to Beijing aerosol, *Atmos. Chem. Phys*., 2013. vol. 13, no. 15, p. 7765–7781, DOI: 10.5194/acp-13-7765-2013.

Fadel M., Ledoux F., Seigneur M. et al. Chemical Profiles of Pm2.5 Emitted from Various Anthropogenic Sources of the Eastern Mediterranean: Cooking, Wood Burning, and Diesel Generators, *Environmental Research*, 2022, vol. 211, 113032.

Household use of solid fuels and high temperature frying, *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, 2010, vol. 95, p. 1–424.

Garland R., Yang H., Schmi O. et al. Aerosol optical properties in a rural environment near the mega-city Guangzhou, China: Implications for regional air pollution, radiative forcing, and remote sensing, *Atmos. Chem. Phys*., 2008, vol. 8, no. 3, p. 5161–5186, DOI: 10.5194/acpd-8-6845-2008.

Padoan S., Zappi A., Adam T. et al. Organic Molecular Markers and Source Contributions in a Polluted Municipality of North-East Italy: Extended Pca-Pmf Statistical Approach, *Environmental Research,* 2020, vol. 186, 109587, DOI: 10.1016/j.envres.2020.109587.

Perera F. Pollution from fossil-fuel combustion is the leading environmental threat to global pediatric health and equity: Solutions exist, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2018, vol. 15(1), 16, DOI: 10.3390/ijerph15010016.

Электронные ресурсы

Благоустройство жилищного фонда по субъектам Российской Федерации. Росстат. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Jil_bl.xls; https://gks.ru/dbscripts/munst/munst25/DBInet.cgi#1 (дата обращения 08.07.2022).

Информация о выбросах загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников (2ТП (воздух)) за 2018–2022 гг. // База данных Росприроднадзора (Федеральная служба по надзору в сфере природопользования). URL: https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/air-protect/ (дата обращения 08.07.2022).

Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе (утв. Приказом Минприроды РФ № 273 от 06.06.2017 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе»). URL: https://minjust.consultant.ru/documents/36322?items=1 (дата обращения 22.05.2022).

Отопление жилья древесиной и углем: воздействие на здоровье человека и варианты политики в Европе и Северной Америке // Доклад Совместной целевой группы по аспектам воздействия загрязнения воздуха на здоровье человека. ООН. Европейская экономическая комиссия Исполнительный орган по Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния. Тридцать третья сессия. Женева, 8−12 декабря 2014 года. URL: https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2014/ (дата обращения 08.02.2023).

Сведения об использовании топливно-энергетических ресурсов. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). ЕМИСС, 2022. URL: https://www.fedstat.ru/indicator/58486 (дата обращения 05.02.2023).

Показатели муниципальных образований // Федеральная служба государственной статистики (Росстат), 2022. URL: http://www.gks.ru (дата обращения 08.07.2022).

Экологический мониторинг озера Байкал. Информационный ресурс. URL: http://www.baikalake.ru/about/uvpn/ (дата обращения 26.12.2022).

Energy access and Air pollution, International Energy Agency, 2016, URL: https://www.iea.org/reports/energy-access-and-air-pollution (дата обращения 26.12.2022).

Поступила в редакцию 24.07.2023
После доработки 10.09.2023
Принята к публикации 06.10.2023

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF AUTONOMOUS RESIDENTIAL HEATING SYSTEMS ON AIR POLLUTION IN MUNICIPALITIES (CASE STUDY OF THE BAIKAL REGION)

V.R. Bityukova[1], V.S. Dekhnich[2], A.I. Kravchik[3], N.S. Kasimov[4]

[1, 3, 4] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,*
[2] *Lomonosov Moscow State University, Kazakhstan branch, Department of Ecology and Nature Management*

[1] *Department of Economic and Social Geography of Russia, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: v.r.bityukova@geogr.msu.ru*
[2] *Senior Lecturer, Ph.D. in Geography; e-mail: vodo.ast@gmail.com*
[3] *Department of Economic and Social Geography of Russia, Master student; e-mail: nastya.kravchik@gmail.com*
[4] *Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Academician, D.Sc. in Geography; e-mail: nskasimov@geogr.msu.ru*

The article suggests a method for calculating emissions from the autonomous heating systems (AHS) of individual residential buildings based on the assessment of the number and area of farmsteads using remote sensing data, the volume and type of fuel and the type of combustion according to population surveys data and data provided by the administrations of municipal districts and settlements. The importance of AHS as a source of atmospheric pollution was evaluated at three spatial levels: the regions of Russia, where the AHS are of the greatest importance, were identified according to the structure of fuel consumption; the emissions from the combustion of residential heating fuel were calculated for the municipalities of the Baikal natural territory (BNT) and the types of territories were identified according to the structure of emission sources; and the role of AHS in air pollution of the residential areas was assessed for settlements. AHS are the dominant air pollution source (over 90%) for most of the BNT territory. Unlike CHPPs and boiler facilities, emissions from individual residential buildings using coal and firewood in most cases significantly affect air quality (up to 4,9 MPC of particulate matter and sulfur dioxide), and the areas of such impact are limited to the residential area of settlements. Strategies to reduce pollution depend on the location of a territory, type of settlement, income levels, the current structure of fuel consumption, the presence of exploited coal deposits and other factors.

Keywords: residential heating fuel, Baikal, thermal power plant, boiler facilities, emission dispersion areas

Acknowledgements. The work was carried out under the framework of project no. 8 / D-2021 "Development of an integrated (integral) assessment of the anthropogenic impact and the state of the environment of Lake Baikal". Research work of the state assignment of the Department of Economic and Social Geography of Russia No. 121051100161-9 "Modern dynamics and factors of socio-economic development of regions and cities of Russia and the Near Abroad".

REFERENCES

Antonov E.V., Belyaev Yu.R., Bityukova V.R., Bredikhin A.V., Dekhnich V.S., Eremenko E.A., Koldobskaya N.A., Prusikhin O.E., Safronov S.G. Integralnaya otsenka antropogennogo vozdeistviya na Baikalskoj prirodnoj territorii: metodicheslie podhody i tipologiya munitsipalnyh rajonov [Integral assessment of anthropogenic impact on the Baikal natural territory: methodological approaches and typology of municipal districts], *Izv. RAN, Ser. geogr.,* 2023, no. 3, p. 1–18. (In Russian)

Bityukova V.R., Dehnich V.S., Petuhova N.V. Vliyanie GRES na zagryaznenie vozduha gorodov Rossii [Impact of regional power plants on air pollution in Russian cities], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr*., 2021, no. 4, p. 38–51. (In Russian)

Cheng Y., Engling G., He K.-B. et al. Biomass burning contribution to Beijing aerosol, *Atmos. Chem. Phys*., 2013, vol. 13, no. 15, p. 7765–7781, DOI: 10.5194/acp-13-7765-2013.

Drabkina E.V., Elsukov A.V. Otsenka energoeffektivnosti avtonomnyh istochnikov teplosnabzheniya [Assessment of the energy efficiency of autonomous heat supply sources], *Nauka i tehnologiya transporta*, 2019, no. 3, p. 88–92. (In Russian)

Fadel M., Ledoux F., Seigneur M. et al. Chemical Profiles of Pm2.5 Emitted from Various Anthropogenic Sources of the Eastern Mediterranean: Cooking, Wood Burning, and Diesel Generators, *Environmental Research*, 2022, vol. 211, 113032.

Garland R., Yang H., Schmi O. et al. Aerosol optical properties in a rural environment near the mega-city Guangzhou, China: Implications for regional air pollution, radiative forcing, and remote sensing, *Atmos. Chem. Phys*., 2008, vol. 8, no. 3, p. 5161–5186, DOI: 10.5194/acpd-8-6845-2008.

Gosudarstvennyj doklad "O sostoyanii ozera Baikal i merah po ego ohrane v 2022 godu" [State report "On the state of Lake Baikal and measures for its protection in 2022"], Irkutsk, Institute of Geography V.B. Sochavy SO RAN Publ., 2021, 360 p. (In Russian)

Household use of solid fuels and high temperature frying, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010, vol. 95, p. 1–424.

Ivanov V.A. [Study of the feasibility of using autonomous heat supply systems in the North], *Aktualnye voprosy tehnicheskih nauk: materialy Mezhdunar. nauch. konf.* (Perm, iyul 2011) [Actual questions of technical sciences: materials of the Intern. scientific conf. (Perm, July 2011)], Perm, Mercury Publ., 2011, p. 57–58. (In Russian)

Karelin A.O., Lomtev A.Yu., Fridman K.B., Eremin G.B., Pankin A.V. Vyyavlenie istochnikov vybrosov zagryaznyayuschih veschestv vyzyvayuschih zhaloby naseleniya na nepriyatnye zapahi [Identification of emission sources of pollutants causing complaints of unpleasant odors],

Gigiena i sanitariya, 2019, vol. 98, no. 6, p. 601–607, DOI 10.18821/0016-9900-2019-98-6-601-607.

Kosheleva N.Y., Kasimov N.S., Sorokina O.I., Gunin P.D., Bazha S.N., Enkh-Amgalan S. Zagryaznenie pochv tyazhelymi metallami v promyshlennyh gorodah Mongolii [Contamination of soils with heavy metals in the industrial centers of Mongolia], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.,* 2010, no. 3, p. 20–27. (In Russian)

Kostyleva N.V., Dyakov M.S., Kvartskhava K.R. Sravnitelnyj analiz podhodov k raschetu vybrosov v atmosfernyj vozduh ot individualnyh teploagregatov [Comparative analysis of the approaches to calculating atmospheric emissions from individual heat generators], *Problemy regionalnoj ecologii*, 2021, no. 6, p. 108–112. (In Russian)

Lyubov V.K., Popov A.N., Popova E.I., Malygin P.V., Solnyshkova L.M. Issledovanie effektivnosti szhiganiya drevesnogo biotopliva v teplogeneriruyuschej ustanovke [Wood-based biofuel efficiency in the heat producing installation], *Lesnoj zhurnal,* 2017, no. 4, p. 149–161. (In Russian)

Metodika opredeleniya vybrosov zagryaznyayuschih veschestv v atmosferu pri czhiganii topliva v kotlah proizvoditelnostyu menee 20 Gkal v chas [Methodology for determining emissions of pollutants into the atmosphere during fuel combustion in boilers with a capacity of less than 20 Gcal per hour], Moscow, Goskomekologiya RF Publ., 1999, 76 p. (In Russian)

Mikhailyuta S.V., Lezhenin A.A. Vliyanie vybrosov avtonomnyh istochnikov teplosnabzheniya na zagryaznenie atmosfernogo vozduha [The impact of emissions from autonomous heat supply sources on atmospheric air pollution], *Interexpo GeoSiberia*, 2022, vol. 4, p. 116–123. (In Russian)

Padoan S., Zappi A., Adam T. et al. Organic Molecular Markers and Source Contributions in a Polluted Municipality of North-East Italy: Extended Pca-Pmf Statistical Approach, *Environmental Research*, 2020, vol. 186, 109587, DOI: 10.1016/j.envres.2020.109587.

Perera F. Pollution from fossil-fuel combustion is the leading environmental threat to global pediatric health and equity: Solutions exist, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2018, vol. 15(1), 16, DOI: 10.3390/ijerph15010016.

Sokolov B.A. *Parovye i vodogrejnye kotly maloj I srednej moschnosti. Ucheb. posobie dlya stud. vyssh. ucheb. zavedenij* [Steam and hot water boilers of small and medium capacity: textbook for students of higher education institutions], 3rd ed., Moscow, Academy Pabl., 2011, 128 p. (In Russian)

Sorokina O.I., Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Golovanov D.L., Bazha S.N., Dorzhgotov D., Enkh-Amgalan S. Heavy metals in the air and snow cover of Ulan Bator, *Geography and Natural Resources*, 2013, vol. 3, p. 291–301.

Tikunov V.S., Chereshnya O.Yu., Gribok M.V., Yablokov V.M. Metodika otsenki regionov Rossii po urovnyu zagryazneniya vozduha [Assesment of Russian regions in terms of the air pollution level], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr*., 2017, no. 5, p. 43–48. (In Russian)

Tolstova Yu.I., Ovchinnikov A.A. [Pollution of the air basin of cities with emissions from heat supply sources], *Problemy bezopasnosti stroitelnyh kritichnyh infrastruktur. Sbornik statej VI Mezhdunarodnoj konferentsii SAFETY2020* [Security Issues of Building Critical Infrastructures Collection of articles of the VI International Conference: SAFETY2020], Yekaterinburg, 2020, p. 188–192. (In Russian)

Volkodaeva M.V., Karelin A.O., Lomtev A.Yu., Kanchan Y.S., Levkin A.V., Timin S.D. Uchet vybrosov zagryaznyayuschih veschestv ot avtonomnyh istochnikov teplosnabzheniya individualnyh zhilyh domov pri provedenii svodnyh raschetov zagryazneniya atmosfernogo vozduha dlya naselennyh punktov [On accounting for emissions of pollutants from autonomous heat supply sources of individual residential buildings when conducting summary calculations of atmospheric air pollution for settlements], *Gigiena i sanitariya*, 2023, no. 102(2), p 141–147.

Vologzhina S.Zh. *Otsenka prostranstvenno-vremennogo raspredeleniya antropogennyh primesej v atmosphere Pribaikal'ya* [Estimation of spatio-temporal distribution of anthropogenic impurities in the atmosphere of the Baikal region], Abstract diss. for the degree of Cand. geogr. Sciences, Ulan-Ude, 2012. (In Russian)

Web sources

Blagoustrojstvo zhilischnogo fonda po sub'ektam Rossijskoj Feeratsii [Improvement of the housing stock in the constituent entities of the Russian Federation], Rosstat, URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Jil_bl.xls; https://gks.ru/dbscripts/munst/munst25/DBInet.cgi#1 (access date 08.07.2022).

Ekologicheskij monitoring ozera Baikal [Environmental monitoring of Lake Baikal], Information resource, URL: http://www.baikalake.ru/about/uvpn/ (data accessed 26.12.2022).

Energy access and Air pollution, International Energy Agency, 2016, URL: https://www.iea.org/reports/energy-access-and-air-pollution (access date 26.12.2022).

Informatsiya o vybrosah zagryaznyayuschih veschestv v atmosfernyj vozduh ot statsionarnyh istochnikov (2TP (vozduh)) za 2018–2022 [Information on emissions of pollutants into the atmospheric air from stationary sources (2TP (air)) for 2018–2022], Rosprirodnadzor database (Federal Service for Supervision of Natural Resources), URL: http://rpn.gov.ru/opendata (access date 08.07.2022).

Metody rascheta rasseivaniya vybrosov vrednyh (zagryaznyayuschih) veschestv v atmosfernom vozduhe [Methods for calculating the dispersion of emissions of harmful (pollutant) substances in the atmospheric air] (approved by Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation no. 273 dated 06.06.2017 "On approval of methods for calculating the dispersion of emissions of harmful (pollutant) substances in the atmospheric air"), URL: https://minjust.consultant.ru/documents/36322?items=1 (access date 22.05.2022).

Pokazateli munitsipal'nyh obrazovanij [Indicators of municipalities], Federal State Statistics Service (Rosstat), 2022, URL: http://www.gks.ru (access date 08.07.2022).

Residential Heating with Wood and Coal: Human Health Impacts and Policy Options in Europe and North America – Report of the Joint Task Force on the Health Aspects of Air Pollution, UN, Economic Commission for Europe Executive Body for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution Thirty-third session Geneva, 8–12 December 2014, URL: https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2014/ (access date 08.02.2023).

Svedeniya ob ispolzovanii toplivno-energeticheskih resursov [Information about the use of fuel and energy resources], Federal State Statistics Service (Rosstat), EMISS, 2022, URL: https://www.fedstat.ru/indicator/58486 (access date 08.07.2022).

Received 24.07.2023
Revised 10.09.2023
Accepted 06.10.2023

УДК 504.062:379.8

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ УЧАСТКА «ОГЛАХТЫ» ХАКАССКОГО ЗАПОВЕДНИКА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ 2022 ГОДА

А.О. Афанасьева[1], **С.А. Лебедева**[2]

[1, 2] *Государственный природный биосферный заповедник «Хакасский», г. Абакан, Республика Хакасия*

[1] *Мл. науч. сотр.; e-mail: anna.o.afanaseva@ya.ru*
[2] *Мл. науч. сотр.; e-mail: lebedeva-1411@yandex.ru*

В статье приводятся результаты выполняемых работ по экологическому блоку комплексного рекреационного мониторинга на особо охраняемых природных территориях федерального значения согласно методическим рекомендациям, разработанным в 2021 г. коллективом авторов: В.В. Непомнящим, А.В. Завадской, В.П. Чижовой.

Мониторинг состояния природных комплексов под воздействием туристско-рекреационной деятельности осуществлялся в зоне площадных и линейных воздействий на участке «Оглахты» заповедника «Хакасский». Основные результаты представлены за туристский сезон 2022 г. В настоящее время вся территория заповедного участка «Оглахты» занята преимущественно естественными природными комплексами. Линейное воздействие сконцентрировано в основном на дорогах патрулирования и проявляется в зоне пешего передвижения, площадное воздействие – в местах остановок у информационных баннеров и объектов показа на маршрутах, а также в местах хозяйственного использования территории. Рекомендации по эффективному развитию экологического туризма на участке «Оглахты» включают в себя обустройство наиболее популярного маршрута дополнительным настилом, а также перераспределение туристского потока на маршруты с достаточной емкостью, но меньшей посещаемостью, повысив их привлекательность для различных целевых аудиторий.

Ключевые слова: рекреационный мониторинг, туризм, природные комплексы, площадные и линейные воздействия, состояние растительного покрова

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.3

ВВЕДЕНИЕ

В связи с возрастающей в России популярностью экологического туризма особо охраняемые природные территории (ООПТ) столкнулись с проблемой определения рекреационной емкости в условиях природоохранного режима. Определить, какое максимальное количество посетителей может принять ООПТ без деградации в первую очередь природной среды, а также социокультурной среды при обеспечении высокого качества туристского опыта и с учетом имеющихся возможностей по обслуживанию посетителей и вместимости инфраструктуры, – главная задача при планировании и развитии туризма на ООПТ.

По поручению Министерства природы и экологии Российской Федерации (Минприроды РФ) в 2021 г. коллектив авторов (В.В. Непомнящий, А.В. Завадская, В.П. Чижова) разработали методические рекомендации по определению рекреационной емкости и организации системы комплексного рекреационного мониторинга на ООПТ федерального значения (Рекомендации) [Непомнящий и др., 2021]. Преимущество настоящих методических рекомендаций состоит в том, что они учитывают замечания и предложения природоохранных организаций, имеющих экспертное знание и опыт в области охраны природы и рекреационного природопользования, таких как ФГБУ «Национальный парк “Красноярские Столбы”», ФГБУ «Национальный парк “Куршская коса”», ФГБУ «Заповедное Подлеморье», ФГБУ «Заповедная Мордовия», ФГБУ «Заповедники Оренбуржья». Кроме того, в основу рекомендаций легли признанные в мировой практике концепции управления туризмом на ООПТ: пределы допустимых изменений [Stankey et al., 1985], спектр рекреационных возможностей [Clark, Stankey, 1990], опыт посетителей и сохранение ресурсов [Visitor experience…, 1995], управление рекреационными воздействиями [Graefe et al., 1990], туристская емкость (пропускная способность) [Canestrelli, Costa, 1991], управление посетителями [Cahill et al., 2018], где ключевым моментом для сохранения природной среды в условиях развития туризма является осуществление системы контроля (рекреационного мониторинга), на основе которой должны приниматься конкретные управленческие решения.

В российской практике рекреационного природопользования долгое время использовался количественный подход и концепция предельно допустимых рекреационных нагрузок, которые нашли отраже-

ние в официальной методике расчета норм нагрузок «Временная методика определения рекреационных нагрузок на природные комплексы при организации туризма, экскурсий, массового повседневного отдыха и временные нормы этих нагрузок» [Временная методика…, 1987]. Но эта методика не отвечает современным условиям и не учитывает принципиальные отличия экологического туризма на ООПТ от туризма, экскурсий, массового повседневного отдыха, например такие, как природоохранный режим ООПТ (пропускной режим, строгое соблюдение правил поведения, перемещение посетителей только по установленным траекториям и преимущественно в сопровождении экскурсовода), или возможность управления туристским потоком и повышения устойчивости ландшафтов к рекреационному воздействию с помощью инфраструктурного обустройства.

Изложенный в Рекомендациях алгоритм действий при комплексном планировании туристско-рекреационного освоения ООПТ и определении рекреационной емкости был в полной мере апробирован на территории Кроноцкого заповедника, а также примерами успешного развития туризма на своей территории и использования управленческого подхода служат такие заповедники, как Кавказский, Алтайский и другие ООПТ [Чижова, 2011; Завадская и др., 2021; Майорова, Жуковская, 2021; Мядзелец, Лужкова, 2022].

Важнейшей и неотъемлемой частью определения рекреационной емкости ООПТ является комплексный рекреационный мониторинг, позволяющий получать актуальную информацию о состоянии объектов охраны, вовлеченных в туристско-рекреационную деятельность, о состоянии социокультурной среды, социально-экономическом воздействии, а также о качестве туристских впечатлений и обеспеченности ресурсами для организации посещения территории. Состав системы мониторинга (количество и тематика блоков, или подсистем), а также наблюдений внутри каждого блока определяется текущими потребностями в информации для принятия управленческих решений и зависит от категории и статуса ООПТ, приоритетов, природных особенностей и природоохранной ценности территории.

Экологический (ресурсный) блок комплексного рекреационного мониторинга является основным, поскольку оценивается состояние природных комплексов и / или их отдельных компонентов, объектов животного и растительного мира, составляющих биологическое и ландшафтное разнообразие территории и находящихся в зоне туристско-рекреационного воздействия.

Цель настоящей работы – определить состояние охраняемых природных комплексов и их компонентов, находящихся в сфере воздействия рекреационных нагрузок на участке «Оглахты» заповедника «Хакасский». Для ее выполнения были собраны данные об оцениваемых параметрах при линейных и площадных воздействиях на ключевых объектах наблюдения в рамках экологического блока комплексного рекреационного мониторинга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Заповедник «Хакасский» состоит из девяти участков общей площадью 267,9 тыс. га. В туристском отношении наиболее изученным и освоенным является участок «Оглахты». Расположен он на левом берегу Красноярского водохранилища в горном массиве Оглахты. Это уникальное место, где сохранилось самое крупное в Хакасии местонахождение петроглифов всех эпох и стилей, известных на территории республики. Горный массив Оглахты номинирован в предварительный Список всемирного наследия ЮНЕСКО от Российской Федерации и является объектом научного и туристского интереса.

Благодаря географическому положению, участок отличается хорошей транспортной доступностью (50 км от г. Абакана, 1 ч в пути).

Флористическое разнообразие участка «Оглахты» представлено 447 видами высших растений (235 родов, 61 семейство) [Природный комплекс…, 2019]. Из видов, занесенных в Красную книгу РФ, на участке произрастают *Hedysarum minussinense* B. Fedtsch. (копеечник минусинский), *Stipa zalesskii* Wilensky (ковыль Залесского), *S. pennata* L. (ковыль перистый), *Oxytropis includens* Basil. (остролодочник заключающий), *Cypripedium macranthos* Sw. (венерин башмачок крупноцветковый).

Благоприятны условия для гнездования и охоты хищных птиц. Из видов, занесенных в Красную книгу РФ, на участке обитают степной орел, могильник, кречет, балобан, сапсан, степная пустельга [Природный комплекс…, 2019]. Отмечаются оптимальные условия для барсука азиатского, селится он на крутых склонах, покрытых зарослями кустарников. Наиболее часто встречаемыми видами на территории являются косуля сибирская, заяц-русак, лисица обыкновенная [Природный комплекс…, 2019].

Первые туристские объекты на участке «Оглахты» созданы в рамках государственной программы развития познавательной инфраструктуры на ООПТ федерального значения. В 2014 г. состоялась презентация визит-центра и экскурсионной лестницы. На сегодняшний день доступ туристов к основным объектам показа обеспечивают четыре экскурсионные программы (маршрута) (рис. 1). Все они однодневные, средств размещения для туристов на территории не предусмотрено. Продолжительность пребывания экскурсантов на территории оценивается средним временем экскурсий (от 3 до 5 ч).

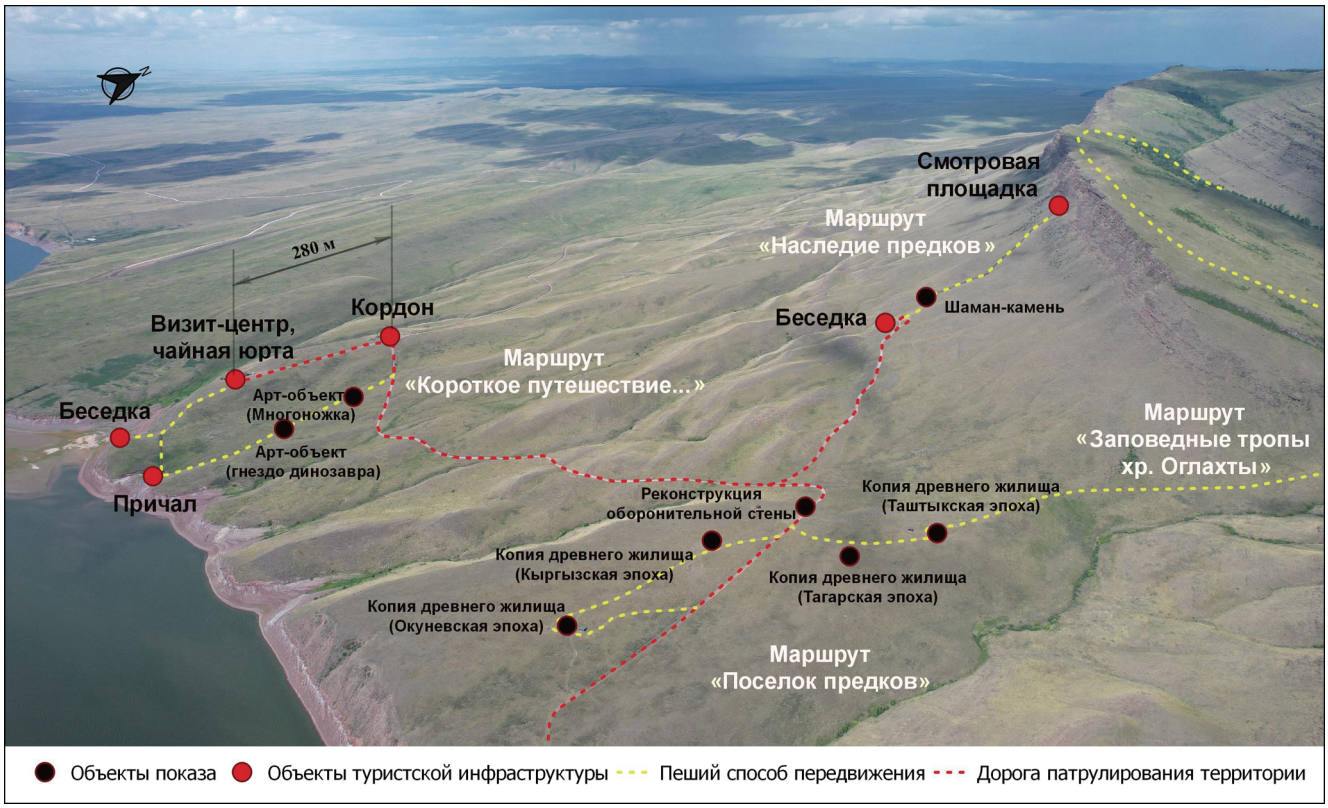


Рис. 1. Схема объектов показа и туристской инфраструктуры на участке «Оглахты».
Примечание: от визит-центра происходит доставка туристов на автомобиле по дороге патрулирования территории к основным объектам показа, где передвижение осуществляется пешим способом

Fig. 1. Scheme of display facilities and tourist infrastructure of the Oglakhty site.
Note: from the visitor center tourists are delivered by car along the patrol road to the main objects of display, where the movement is on foot

Полевой сбор данных осуществляется преимущественно три раза за туристский сезон (до начала, во время пиковых нагрузок и в конце сезона). Контроль состояния природных комплексов под воздействием туристско-рекреационной деятельности осуществляется в постоянных точках наблюдений, приуроченных к основным объектам туристской инфраструктуры эколого-экскурсионного комплекса «Оглахты» в зоне площадных и линейных воздействий. *Объекты наблюдения в зоне площадного воздействия:* визит-центр и чайная юрта, кордон, смотровая площадка на берегу водохранилища, места остановок у информационных баннеров на маршрутах, комплекс исторических реконструкций «Поселок предков» (четыре экспозиции, входная группа), смотровая площадка у Шаман-камня и разворот автотранспорта, плита «Шаман-камень». Смотровая площадка в конце деревянной лестницы к скальным выступам Оглахты является частью общей конструкции. *Объекты наблюдения в зоне линейного воздействия:* пешая тропа на маршруте «Заповедные тропы хребта Оглахты»; тропа, ведущая к смотровой площадке на берегу водохранилища; тропа от смотровой площадки у подножия горы Оглахты до лестницы к петроглифам (см. рис. 1).

Так как все маршруты исключают места концентрации типичных видов животных и гнездования редких видов птиц, а также постоянные пробные площади для наблюдения за редкими видами растений, состояние природных комплексов оценивается в сфере воздействия главного фактора – вытаптывания, приводящего к рекреационной дигрессии природных комплексов, сокращению площади ненарушенных экосистем и их фрагментации вследствие развития тропиночной сети. Фактор беспокойства животных минимален и не нарушает ритм их жизнедеятельности, в том числе в период размножения. Наблюдения за состоянием популяций редких растительных сообществ выполняется в рамках темы летописи природы заповедника «Хакасский»: «Флора и растительность. Редкие виды». Особое внимание уделяется территориям единичных встреч редких видов растений в местах прохождения через них туристских маршрутов.

Параметры экологического блока комплексного рекреационного мониторинга представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Оцениваемые параметры при линейных воздействиях

Индикаторы	Состояние			
	условно ненарушенное	слабонарушенное	средненарушенное	сильнонарушенное
Ширина тропы, м	Отсутствуют	Менее 0,5	0,5–1	Более 1
Наличие эрозионных форм на тропе	Отсутствуют	Присутствуют единичные формы	Присутствует более двух форм	Присутствуют многочисленные/развитые формы
Количество неутвержденных троп	Отсутствуют	Несколько слабовыраженных троп	Несколько выраженных троп	Разветвленная тропиночная сеть
Трансформация растительного покрова	Тропа с естественным растительным покровом, минеральный слой почвы не обнажен	Минеральный слой почвы обнажен до 5%, растения слегка примяты, повреждения листьев и стебля составляет не более 10%	Минеральный слой почвы обнажен до 15%, растения примяты к земле, повреждения листьев и стебля не более 40%	Тропа полностью лишена растительного покрова, или присутствуют фрагменты растительности, остальные растения сломаны у основания или с погибшей корневой системой

Таблица 2

Оцениваемые параметры при площадных воздействиях

Индикаторы	Состояние			
	условно ненарушенное	слабонарушенное	средненарушенное	сильнонарушенное
Площадь вытоптанных участков вокруг объектов, %	Отсутствуют	Менее 5%	До 15%	Более 15%
Наличие эрозионных форм на объекте	Отсутствуют	Присутствуют единичные формы	Присутствует более двух форм	Присутствуют многочисленные/развитые формы
Видовой состав	Фоновые виды	Близкое к фоновому составу	Распространение синантропных видов	Преобладание синантропных видов

Основной метод получения данных – это описательное обследование объектов мониторинга. В точках наблюдений выполняется геоботаническое описание сообществ с выявлением флористического состава, определением общего проективного покрытия и высоты травяно-кустарничкового яруса; измеряется ширина пешеходных троп; фиксируются площади участков с вытоптанной до минерального горизонта поверхностью почвы; ведутся наблюдения за развитием эрозионных процессов на тропах и площадных объектах. Наиболее подробное геоботаническое описание проводится в конце июля, когда можно максимально отразить особенности растительных сообществ – наиболее полно выявить видовой состав растений, определить их обилие, состояние жизненности, а так же некоторые особенности биологии и экологии отдельных видов растений. Накопленная нами информация со временем даст возможность выявления закономерностей динамических процессов естественного и рекреационно-дигрессионного характера в растительном покрове, а также позволит провести научно обоснованное прогнозирование таких процессов для принятия в дальнейшем эффективных мер охраны и управления туристско-рекреационной деятельностью.

Работы включают использование квадрокоптера DJI Mavic Air 2S. Аэрофотоснимки исследуемой территории позволяют выявлять новые тропы или участки разрастания тропиночной сети, не утвержденные научно-техническим советом заповедника, а также проводить визуальную оценку состояния стоянок и других участков площадного воздействия.

Количественный учет посетителей эколого-экскурсионного комплекса «Оглахты» и их пространственное распределение ведется по пропускам на территорию заповедника, где фиксируются объекты (экскурсионные программы), даты посещения и количественные характеристики каждой группы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Туристский сезон 2022 г. на участке «Оглахты» длился с 1 мая по 19 октября. За этот период участок посетили 6883 человека (5030 взрослых и 1853 ребенка) или 388 групп. Туристский поток увеличился по сравнению с предыдущими годами (рис. 2). Ежегодные наблюдения показали, что наиболее посещаемым является маршрут «Наследие предков» (рис. 3).

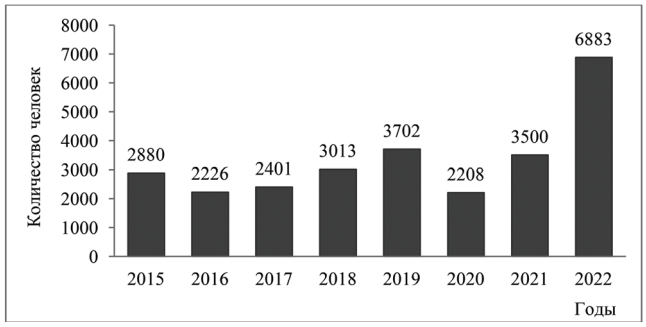


Рис. 2. Общая посещаемость участка «Оглахты» за период 2015–2022 гг.

Fig. 2. Total visitation of the Oglakhty site for the period from 2015 to 2022

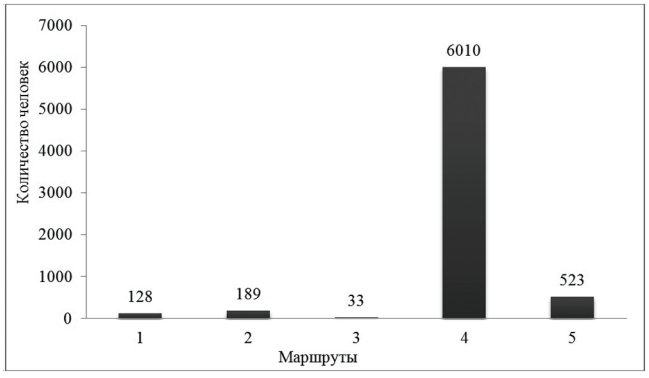


Рис. 3. Распределение туристского потока по территории участка «Оглахты» за туристский сезон 2022 г.
Цифрами обозначены маршруты: 1 – «Поселок предков»; 2 – «Заповедные тропы хребта Оглахты»; 3 – «Короткое путешествие длиной в 400 млн лет»; 4 – «Наследие предков»; 5 – другие посетители (гости заповедника в рамках специальных мероприятий)

Fig. 3. Distribution of tourist flow over the territory of the Oglakhty site for the 2022 tourist season
The numbers indicate the routes: 1 – Ancestral Village; 2 – Protected trails of the Oglakhty ridge; 3 – A short journey 400 million years long; 4 – Ancestral Heritage; 5 – other visitors (guests of the reserve as a part of special events)

В результате проведенных флористических и геоботанических исследований в туристском сезоне 2022 г. нами было осуществлено три полевых выезда (май, июль, сентябрь) и определен состав синантропной флоры эколого-экскурсионного комплекса. Наши исследования показали, что синантропная флора экскурсионных маршрутов представлена 241 видом высших сосудистых растений, принадлежащих к 46 семействам и 166 родам, что составляет 53,9% от общего числа флоры участка «Оглахты». Большое количество видов синантропной флоры объясняется уничтожением и антропогенной трансформацией природных экосистем во времена освоения земель (1960-е гг.) с целью увеличения посевных площадей сельскохозяйственных культур. Позже реформы полностью изменили систему ведения агропромышленного комплекса, площадь пашни уменьшилась в 2–3 раза и была переведена в залежь. Там, где сохранялись относительно большие площади и высокое разнообразие полуприродных экосистем, восстановление залежей происходило достаточно быстро за счет естественной сукцессии, обеспеченной потоком семян. Растения синантропной фракции можно разделить на два основных компонента: аборигенный (виды местной флоры или апофиты) и адвентивный (виды, появившиеся на данной территории в результате хозяйственной деятельности человека) [Ульянова, 1998; Пяк, Мерзлякова, 2000]. Доля апофитов во флоре исследуемой территории составляет 88,4% (213 видов) от общего числа синантропных видов и 47,7% от флоры участка в целом. Доля адвентивной фракции составляет 11,6 (28 видов) и 6,3% соответственно. Преобладание в синантропной флоре участка «Оглахты» апофитных видов над адвентивными свидетельствует о значительном многообразии флоры и подчеркивает сохранность аборигенной флоры.

Места произрастания редких видов *Artemisia martjanovii* Krasch. ex Poljakov (полынь Мартьянова), *Hedysarum minussinense*, *Oxytropis includens*, *O. nuda Basil*. (остролодочник нагой) ежегодно фиксируются в районе беседки на берегу водохранилища, у входной группы в комплекс «Поселок предков». В основном ценопопуляции этих растений на данном участке незначительны, состояние их стабильное и угрозы для исчезновения вида нет.

В целом вся территория заповедного участка «Оглахты» занята преимущественно естественными природными комплексами. Линейное воздействие сконцентрировано в основном на дорогах патрулирования и проявляется в зоне пешего передвижения, площадное воздействие – в местах остановок у информационных баннеров и объектов показа на маршрутах. Площадь зон, специально выделенных для развития туризма на территории участка «Оглахты», где разрешается организация и устройство экскурсионных экологических троп и маршрутов, размещение музеев и информацион-

но-просветительских центров составляет 1292 га. Реальная площадь, занятая туристской инфраструктурой (измененная территория) – 2,1 га, или 0,1% от площади участка. Это означает, что на данный момент развитие туризма на этом участке является умеренным и не приводит к существенным изменениям в природной среде.

При существующей посещаемости (189 чел. за сезон) состояние пешей части (протяженностью 5000 м и шириной 0,4 м) маршрута «Заповедные тропы хребта Оглахты» оценивается как слабонарушенное. Для нее характерна незначительная трансформация растительного покрова, который восстанавливается до своего ненарушенного (близкого к фоновому) состояния за периоды отсутствия рекреационного использования. В пик сезона (июль) нами зафиксировано, что травостой на маршруте равномерный и густой. Проективное покрытие на самой тропе варьирует от 40 до 70%. Видовая насыщенность достаточно высокая – 44–46 видов на 100 м^2. Растения примяты к земле, повреждение вегетативных органов не более 10%. Ярус один, подъярусы выражены слабо. В верхнем подъярусе доминируют мелкодерновинные злаки *Koeleria cristata* (L.) Pers. (тонконог гребенчатый), *Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng (змеёвка растопыренная) и разнотравье *Galium verum* L. (подмаренник настоящий), *Schizonepeta multifida* (L.) Briq. (схизонепета многонадрезанная). В нижнем преобладают *Potentilla acaulis* L. (лапчатка бесстебельная), *Artemisia frigida* Willd. (полынь холодная), *Carex pediformis* C.A. Mey. (осока стоповидная). Растительность обочины более сомкнутая, ее слагают растения, обычные для травяного покрова зонального типа луговой степи. Общее проективное покрытие на обочине достигает 100%. Ярусов один или два. Кустарниковый ярус представлен *Cotoneaster melanocarpus* Fisch. ex Blytt (кизильник черноплодный). В травяном ярусе выделяется два подъяруса. Высота верхнего подъяруса достигает 70 см, среднего – 40 см, нижнего, основного – 15–20 см. Доминируют *Elytrigia repens* (L.) Nevski (пырей ползучий), *Festuca valesiaca* Gaudin (овсяница валлисская), *Helictotrichon schellianum* (Hack.) Kitag. (овсец Шелля), *Phleum phleoides* (L.) H. Karst. (тимофеевка степная). Много высокого разнотравья: *Phlomoides tuberosa* (L.) Moench (зопник клубненосный). В нижнем подъярусе отмечаются и преобладают виды разнотравья, ксеромезофиты – *Fragaria viridis* Weston (земляника зеленая), *Iris ruthenica* Ker Gawl. (ирис русский) и др. Реже встречаются мезофиты *Hieracium umbellatum* L. (ястребинка зонтичная) и мезоксерофиты *Galium verum*, *Onobrychis arenaria* (Kit.) DC. (эспарцет песчаный).

Пешая часть маршрута «Наследие предков» (участок тропы от автопарковки до лестницы, ведущей к петроглифам) протяженностью всего 40 м и шириной 1,1 м оценивается как сильнонарушенная при существующей посещаемости маршрута в 6010 чел. за сезон. Тропа полностью лишена растительного покрова. Вдоль тропы ежегодно отмечаются устойчивые к механическому воздействию виды (злаковые травы, другие растения). В июле травяной покров состоит из *Elytrigia geniculata* (Trin.) Nevski (пырей коленчатый), *Stipa krylovii* Roshev. (Roshev.) (ковыль Крылова). В нижнем подъярусе преобладают петрофиты *Alyssum obovatum* C.A. Mey. (бурачок обратнояйцевидный), *Thymus minussinensis* Serg. (тимьян минусинский), *Eritrichium jenisseense* Turcz. ex A. DC. (незабудочник енисейский). Кустарниковый ярус состоит из *Caragana pygmaea* (L.) DC. (карагана карликовая). Общее проективное покрытие составляет 50%. Средняя высота травостоя 40–45 см. Ширина тропы в течение сезона и в сравнении с предыдущим годом не изменилась, также отсутствуют эрозионные формы на тропе, новых параллельных троп не выявлено.

В месте автопарковки значительная часть площади лишена растительности, сохраняются лишь пятна, фрагменты сорняков и однолетников. Кустарниковый ярус не выражен, единично присутствует *Caragana pygmaea*. В июле общее проективное покрытие составляет 30–40%. Среди злаков преобладают *Elytrigia geniculata* и *Stipa krylovii*. В нижнем подъярусе отмечены петрофиты *Alyssum obovatum*, *Thymus minussinensis*, *Eritrichium jenisseense*, *Orostachys spinosa* (L.) C.A. Mey. (горноколосник колючий), *Potentilla acaulis*. Средняя высота травостоя не превышает 40 см, большая часть растений имеет механические повреждения. В контрольной точке без видимых следов воздействия на расстоянии нескольких метров от автопарковки травостой густой, проективное покрытие составляет 80%. Видовая насыщенность составляет 19 видов на 100 м^2. Ярус один. В верхнем подъярусе доминируют генеративные побеги злаков – *Helictotrichon desertorum* (Less.) Nevski (овсец пустынный), *Stipa krylovii*. Средний подъярус, образованный злаками второй величины и разнотравьем, имеет высоту 40–50 см. В нижнем подъярусе высотой до 15–20 см доминирует *Festuca valesiaca* и *Carex pediformis*. Немногочисленное разнотравье представлено луговостепными видами, среди которых постоянны *Artemisia glauca* Pall. ex Willd. (полынь сизая)*, Galium verum, Medicago falcata* L. (люцерна серповидная).

У начала экскурсионной лестницы расположен один из главных объектов показа на маршруте – плита «Шаман-камень» из красного девонского песчаника с нанесенными древними символами. Размер плиты 7,6 м^2. В конце туристского сезона 2022 г. была измерена вытоптанная площадь вокруг

объекта, она составила 32,4 м^2. Сравнивая аэрофотоснимки предыдущих лет, визуально вытоптанная площадь вокруг объекта увеличилась. Дальнейшие наблюдения за вытоптанной площадью в будущих сезонах могут помочь определить управленческие решения по данному объекту. На участках, лишенных растительности, в середине сезона (июль) единично встречаются виды петрофитного разнотравья – *Potentilla acaulis*, *Thymus minussinensis*, *Artemisia frigida*, *Vincetoxicum sibiricum* (L.) Decne. (ластовень сибирский). Все сохранившиеся растения с механическими повреждениями, у большинства корни выступают на поверхность почвы. На участках, где нет рекреационной нагрузки (на расстоянии 3 м от камня), кустарниковый ярус не выражен, единично присутствует *Caragana pygmaea*. Травостой достаточно густой, общее проективное покрытие не превышает 70%. Средняя видовая насыщенность фитоценозов – 21 вид на 100 м^2. В верхнем подъярусе доминируют злаки *Stipa krylovii*, *Helictotrichon schellianum* (70–90 см высотой). Второй подъярус (25–40 см высотой) сложен разнотравьем *Pulsatilla patens* (L.) Mill. (прострел раскрытый), *Artemisia commutate* Besser (полынь замещающая), *Kitagawia baicalensis* (I. Redowsky ex Willd.) Pimenov (китагавия байкальская) и *Carex pediformis*. В большом количестве отмечается петрофитное разнотравье *Orostachys spinosa*, *Potentilla acaulis*, *Thymus minussinensis* и др.

На маршруте «Короткое путешествие длиной в 400 млн лет» при текущей посещаемости 33 чел. за сезон самым «напряженным» участком является пешая тропа к беседке на берегу водохранилища протяженностью 30 м и шириной 2,3 м. Ширина тропы в течение сезона и в сравнении с предыдущим годом не изменилась. На склонах возвышенности, где установлена смотровая площадка (беседка), а также вдоль тропы наблюдаются следы поверхностной дождевой эрозии, на самой тропе отсутствуют эрозионные формы. Тропа практически лишена растительного покрова, присутствуют фрагменты растительности. Общее проективное покрытие на обочине тропы при описании в июле составляет 40%, средняя высота травостоя достигает 45–50 см (на расстоянии до 1 м). Вдоль тропы встречаются *Artemisia frigida, Artemisia scoparia* Waldst. & Kit. (полынь веничная), *Elytrigia geniculata, Potentilla acaulis*, *Oxytropis includes.* На обочине тропы отмечены редкие и исчезающие, занесенные в Красную книгу РФ *Oxytropis includens, Hedysarum minussinense.* Изученная онтогенетическая структура ценопопуляций характеризуется высокой долей генеративных растений, что свидетельствует о достаточно благополучном состоянии редких видов. В мае 2022 г. выявлена одна новая формирующаяся тропа от беседки вдоль обрывистого склона в направлении причала шириной 0,4 м и протяженностью 0,5 м. В пик сезона ее ширина и протяженность не изменились. Это тропа с естественным растительным покровом, минеральный слой почвы не обнажен. Растения примяты к земле, повреждение вегетативных органов не более 10%. В растительном покрове отмечены *Atraphaxis frutescens* (L.) K. Koch (курчавка кустарниковая), *Artemisia frigida, Artemisia scoparia, Elytrigia geniculata, Potentilla acaulis*. На расстоянии 1 м и более встречаются те же виды, но с увеличением средней высоты травостоя до 50 см.

Непосредственно возле самой беседки и вокруг нее участок испытывает постоянную умеренную нагрузку, растительность изреженная, угнетенная. Проективное покрытие в пик сезона составляет 20–30%, растения с признаками механических повреждений, стебли их смяты. Видовой состав обеднен. Произрастают на площадке описания в основном те же виды, что и в исходных сообществах: *Artemisia scoparia*, *Poa botryoides* (Trin. ex Griseb.) Kom. (мятлик кистевидный), *Potentilla acaulis*. На расстоянии нескольких метров проективное покрытие достигает 80–90%. Видовая насыщенность составляет 35 видов на 100 м^2. Травяной ярус подразделяется на два подъяруса, верхний высотой 70 см, в нем доминируют *Agropyron cristatum* (L.) Gaertn. (житняк гребенчатый), *Krascheninnikovia ceratoides* (L.) Gueldenst. (крашенинниковия терескеновая), *Poa botryoides, Stipa krylovii*. В нижнем преобладают мелкодерновинные злаки: *Koeleria cristata, Cleistogenes squarrosa* и разнотравье: *Artemisia scoparia, A. frigida, Potentilla acaulis, Kochia prostrata* (L.) Schrad. (кохия стелющаяся).

Растительность вдоль основной части маршрута «Короткое путешествие длиной в 400 млн лет» с установленными информационными баннерами представлена луговыми степями. В июле травостой достаточно густой, проективное покрытие достигает 90–100%. Видовая насыщенность в среднем составляет 29 видов на 100 м^2. Отмечается кустарниковый ярус из Caragana pygmaea и составляет 10–20%. В травяном ярусе выделяются два подъяруса. В верхнем подъярусе высотой 110–130 см доминируют степные злаки *Stipa capillata* L. (ковыль волосатик) и *Poa botryoides*, *Agropyron cristatum*. В нижнем отмечены *Cleistogenes squarrosa, Koeleria cristata,* а также *Artemisia frigida*. В травостое отмечена значительная роль луговостепных видов *Pulsatilla patens*, *Artemisia commutata*, *Phleum phleoides* (L.) H. Karst. (тимофеевка степная)*, Artemisia martjanovii.* Важную часть видового разнообразия составляют степные виды *Potentilla acaulis, Stipa capillata, Allium ramosum* L. (лук ветвистый)*, Artemisia frigida*. На

маршруте отмечены виды, занесенные в Красную книгу Республики Хакасия, – *Artemisia martjanovii* и *Oxytropis nuda*, которые характеризуются благополучным состоянием. При современной нагрузке на маршрут вытоптанные участки в местах остановок отсутствуют.

Маршрут «Поселок предков» за туристский сезон 2022 г. посетили всего 128 чел. Вытоптанные участки в местах остановок у реконструкций древних жилищ отсутствуют, эрозионные формы не выявлены. Растительный покров представлен сухими настоящими степями, которые являются фоновым типом растительности, занимая выровненные участки, а также пологие склоны холмов и их подножья.

Видимые следы рекреационного воздействия на маршруте наблюдаются у входной группы, где расположена копия крепостной стены, информационный щит, туалет, парковка автотранспорта. В пик сезона на данном участке проективное покрытие оценивается до 70%, в среднем составляя 60%. Ярус обычно один с двумя подъярусами, редко в сообществах выражен кустарниковый ярус из *Caragana pygmaea*. Верхний подъярус высотой 70 см, в нем доминируют сухостепные злаки *Stipa krylovii, Poa botryoides* и *Agropyron cristatum*. В нижнем широко распространены *Cleistogenes squarrosa, Koeleria cristata, Carex duriuscula* С.А. Меу. (осока твердоватая)*, Potentilla acaulis, Artemisia frigida, Oxytropis nuda.* На участке без видимых следов воздействия проективное покрытие составляет 80%. Ярусов два: кустарниковый, с преобладанием Caragana pygmaea, и травяной. В травяном ярусе выделяется два подъяруса: верхний – высотой 60–80 см, состоит из *Stipa krylovii* и *Artemisia martjanovii*. В нижнем подъярусе преобладают мелкодерновинные злаки *Koeleria cristata* и *Cleistogenes squarrosa*, составляющие до 20% покрытия. Здесь же расположено засухоустойчивое степное разнотравье: *Potentilla acaulis, Scorzonera austriaca* Willd. (козелец австрийский), *Kochia prostrata* и др.

Наблюдения на локальных нарушенных участках, полностью лишенных растительного покрова, вокруг кордона, визит-центра, чайной юрты, а также за используемыми дорогами, ведутся с целью контроля их состояния и выявления возможных эрозионных процессов, ограничивающих возможности дальнейшего хозяйственного использования территории. По результатам туристского сезона 2022 г. эрозионных форм на перечисленных объектах не выявлено. Вытоптанные площади вокруг кордона, визит-центра, чайной юрты не изменились в сравнении с предыдущим годом.

Как известно, инфраструктурное обустройство территории повышает устойчивость природных комплексов к фактору вытаптывания, поскольку позволяет регулировать рекреационные нагрузки и направлять посетителей по установленной траектории с остановками в определенных местах с доступом к объектам показа. Так, на самом посещаемом маршруте «Наследие предков» использование экскурсионной тропы в виде лестницы позволяет сохранять в естественном состоянии ландшафты на склонах средней крутизны, предоставляя посетителям возможность перемещаться по маршруту, не нарушая при этом структуру почвенно-растительного покрова. В отличие от этого, на другом объекте (Шаман-камень) на этом же маршруте, где нет специального укрепления, наблюдаются процессы рекреационной дигрессии и существует риск разрушения объекта показа (рис. 4). Таким образом, использование инфраструктуры на территории способствует сохранению природных комплексов и повышению их устойчивости к фактору вытаптывания.

Рис. 4. Вытоптанная площадь вокруг Шаман-камня

Fig. 4. The trampled area around the Shaman stone

ВЫВОДЫ

Экологический туризм на территории участка «Оглахты» ориентирован на минимизацию негативных воздействий туризма. Через сеть экскурсионных маршрутов заповедник выполняет функцию экологического природоохранного воспитания и способствует сохранению типичных и уникальных природных ландшафтов, разнообразия животного и растительного мира, а также объектов природного и культурного наследия. Познавательные экскурсии, экскурсионные программы о развитии жизни на Земле, треккинг, фототуризм и научный туризм являются основными направлениями экологического туризма на данной территории, которые не оказывают значительного вреда экосистемам.

Результаты экологического мониторинга на участке «Оглахты» заповедника «Хакасский» за туристский сезон 2022 г. показали, что наибольшее рекреационное воздействие испытывает маршрут «Наследие предков», заметная трансформация почвенно-растительного покрова характерна для участка вокруг Шаман-камня. Обустройство Шаман-камня деревянным настилом позволит увеличить емкость данного объекта и восстановить уже нарушенные участки, а также снизить риск разрушения самой плиты. Также рекомендуется перенаправить туристский поток на другие имеющиеся маршруты с достаточной емкостью, но наименее посещаемые, путем повышения их привлекательности для различных целевых аудиторий. Это позволит «разгрузить» экологическую тропу к петроглифам на маршруте «Наследие предков». С этой целью маршрут «Короткое путешествие…» был дополнен тематическими арт-объектами, позволяющими различным группам туристов взаимодействовать с реквизитами, которые создают дополнительную атмосферу и подчеркивают особенности данного маршрута, привлекая больше посетителей. Кроме этого, экскурсионная программа адаптирована для туристов с ограниченными возможностями. На сегодня это первый инклюзивный экомаршрут в Республике Хакасия. Отсутствие актуализации экспозиций комплекса исторических реконструкций «Поселок предков», а также новых событий или программ, привело к потере интереса посетителей к данному маршруту. Для привлечения большего количества посетителей необходимо разработать соответствующую маркетинговую стратегию и обеспечить высокий уровень качества предлагаемого опыта. Для пешего маршрута «Заповедные тропы хребта Оглахты» управление направлено на поддержание естественного состояния тропы за счет малой рекреационной нагрузки. Рекомендуется провести на данный момент маркировку тропы в целях управления турпотоком и безопасности туристов. При этом важно сохранить естественный вид тропы и не нарушать ее природный ландшафт. Именно ощущение уединенности и гармонии с дикой природой привлекает на этот маршрут посетителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Завадская А.В., Лебедева Е.В., Чижова В.П. Механизмы регулирования туристских потоков в Долине гейзеров (Камчатка) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 5. С. 63–77.

Майорова Ю.А., Жуковская И.П. Опыт использования результатов рекреационного мониторинга в управлении туристско-рекреационной деятельностью в национальном парке «Куршская коса» // Труды Мордовского гос. природного заповедника им. П.Г. Смидовича. 2021. № 28. С. 342–349.

Мядзелец А.В., Лужкова Н.М. Геоинформационное обеспечение и планирование познавательного экотуризма для организации рекреационной деятельности на особо охраняемых природных территориях озера Байкал // Известия Иркутского гос. ун-та. Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 39. С. 81–98.

Непомнящий В.В., Завадская А.В., Чижова В.П. Методические рекомендации по определению рекреационной емкости особо охраняемых природных территорий. Новосибирск: Наука, 2021. 96 с.

Непомнящий В.В., Завадская А.В., Чижова В.П. Методические рекомендации по организации системы комплексного рекреационного мониторинга на особо охраняемых природных территориях. Новосибирск: Наука, 2021. 136 с.

Пяк А.И., Мерзлякова И.Е. Сосудистые растения города Томска: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2000. 80 с.

Природный комплекс и биоразнообразие участка «Оглахты» заповедника «Хакасский» / под ред. В.В. Непомнящего. Абакан: Хакасское книжное изд-во им. В.М. Торосова, 2019. 288 с.

Ульянова Т.Н. Сорные растения во флоре России и других стран СНГ. СПб.: ВИР, 1998. 233 с.

Чижова В.П. Рекреационные ландшафты: устойчивость, нормирование, управление. Смоленск: Ойкумена, 2011. 176 с.

Clark R.N., Stankey S. The recreation opportunity spectrum: a framework for planning, management and research, *Towards serving visitors and managing our resources,* R. Graham, R. Lawrence (eds.), Proceedings of a North American workshop on visitor management in parks and protected areas, Waterloo, ON, University of Waterloo, 1990, p. 127–156.

Canestrelli E., Costa P. Tourism carrying capacity: A fuzzy approach, *Ann. Tourism Res*., 1991, no. 18(2), p. 295–311.

Cahill K., Collins R., McPartland S., Pitt A., Verbos R. Overview of the Interagency Visitor Use Management Framework and the Uses of Social Science in its Implementa-

tion in the National Park Service, *The George Wright Forum*, 2018, no. 35(1), p. 32–41.
Graefe A., Kuss F.R., Vaske J.J. Visitor impact management: the planning framework, Washington, DC, National Parks and Conservation Association, 1990, 105 p.
Stankey G.H., Cole D.N., Lucas R.C. et al. The Limits of Acceptable Change (LAC) System for Wilderness Planning. Gen. Tech. Rep. INT-176. Ogden, UT, U.S., Department of Agriculture, Forest Service, 1985, 39 p.
Visitor experience and resource protection implementation plan: Arches Utah National Park, Denver, U.S., Department of the Interior, National Park Service, Denver Service Centre, 1995, 72 p.

Электронный ресурс
Временная методика определения рекреационных нагрузок на природные комплексы при организации туризма, экскурсий, массового повседневного отдыха и временные нормы этих нагрузок. М.: Гос. комитет СССР по лесному хозяйству, 1987. URL: https://docs.cntd.ru/document/9033131 (дата обращения 13.07.2023).

Поступила в редакцию 22.05.2023
После доработки 16.09.2023
Принята к публикации 06.10.2023

ECOLOGICAL CONDITION OF THE OGLAKHTY SITE OF THE KHAKASS NATURE RESERVE BASED ON THE RESULTS OF 2022 OBSERVATIONS

A.O. Afanaseva[1], S.A. Lebedeva[2]

[1, 2] *Khakass State Nature Biosphere Reserve, Abakan, Republic of Khakassia*

[1] *Junior Scientific Researcher; e-mail: anna.o.afanaseva@ya.ru*
[2] *Junior Scientific Researcher; e-mail: lebedeva-1411@yandex.ru*

The article presents the results of the ecological module of complex recreational monitoring in specially protected natural territories of federal importance. The work was carried out according to the methodological recommendations elaborated in 2021 by a team of authors (V.V. Nepomnyaschy, A.V. Zavadskaya, V.P. Chizhova).

Monitoring of the state of natural complexes under the influence of tourist and recreational activities was carried out in the zone of areal and linear impacts at the Oglakhty site of the Khakass reserve. The main results are presented for the 2022 tourist season. Currently, the entire territory of the Oglakhty site is mainly occupied by quasi-natural complexes. The linear impact is concentrated mainly on patrol roads and manifests itself in the pedestrian movement zone. The areal impact is on the stopover places near information banners and display objects on the routes, as well as in places of the economic activities. Recommendations for the effective development of eco-tourism on the Oglakhty site include the construction of additional flooring on the most popular route, as well as the redistribution of tourist flow to the less attended routes with sufficient capacity, increasing their attractiveness for various target audiences.

Keywords: recreational monitoring, tourism, natural complexes, areal and linear impacts, state of vegetation cover

REFERENCES

Clark R.N., Stankey S. The recreation opportunity spectrum: a framework for planning, management and research, R. Graham, R. Lawrence (eds.), *Towards serving visitors and managing our resources,* Proceedings of a North American workshop on visitor management in parks and protected areas, Waterloo, ON, University of Waterloo, 1990, p. 127–156.
Canestrelli E., Costa P. Tourism carrying capacity: A fuzzy approach, *Ann. Tourism Res*, 1991, no. 18(2), p. 295–311.
Cahill K., Collins R., McPartland S., Pitt A., Verbos R. Overview of the Interagency Visitor Use Management Framework and the Uses of Social Science in its Implementation in the National Park Service, *The George Wright Forum*, 2018, no. 35(1), p. 32–41.
Chizhova V.P. *Rekreacionnye landshafty: ustojchivost', normirovanie, upravlenie* [Recreational landscapes: sustainability, regulation, management], Smolensk, Oikumena Pabl., 2011, 176 p. (in Russian)
Graefe A., Kuss F.R., Vaske J.J. *Visitor impact management: the planning framework*, Washington, DC, National Parks and Conservation Association, 1990, 105 p.
Mayorova Yu.A., Zhukovskaya I.P. [Experience of using the results of recreation monitoring in the management of tourist and recreation activities in the Kurshskaya kosa national park], *Trudy Mordovskogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika im. P.G. Smidovicha*, 2021, no. 28, p. 342–349. (In Russian)
Mjadzelec A.V., Luzhkova N.M. Geoinformacionnoe obespechenie i planirovanie poznavatel'nogo jekoturizma dlja organizacii rekreacionnoj dejatel'nosti na osobo ohranjaemyh prirodnyh territorijah ozera Bajkal [Geo-

information Support and Planning of Educational Ecotourism as a Basis for Organizing Environmental Recreational Activities on Specially Protected Nature Areas of Lake Baikal], *Izvestija Irkutskogo gos. Un-ta, Ser. Earth Sciences*, 2022, vol. 3, p. 81–98. (In Russian)

Nepomnyaschy V.V., Zavadskaya A.V., Chizhova V.P. *Metodicheskie rekomendacii po opredeleniju rekreacionnoj jomkosti osobo ohranjaemyh prirodnyh territorij* [Methodological recommendations for determining the recreational capacity of specially protected natural areas], Novosibirsk, Nauka Pabl., 2021, 96 p. (In Russian)

Nepomnyaschy V.V., Zavadskaya A.V., Chizhova V.P. *Metodicheskie rekomendacii po organizacii sistemy kompleksnogo rekreacionnogo monitoringa na osobo ohranjaemyh prirodnyh territorijah* [Methodological recommendations on the organization of a system of complex recreational monitoring in specially protected natural areas], Novosibirsk, Nauka Publ., 2021, 136 p. (In Russian)

Pjak A.I., Merzljakova I.E. *Sosudistye rastenija goroda Tomska: uchebnoe posobie* [Vascular plants of the city of Tomsk: textbook], Tomsk, Tomsk St. Un-ty Publ., 2000, 80 p. (In Russian)

Prirodnyj kompleks i bioraznoobrazie uchastka "Oglahty" zapovednika "Hakasskij" [Natural complex and biodiversity of the Oglakhty site of the Khakass nature reserve], V.V. Nepomnyaschy (ed.), Abakan, Khakass Book Publ. House named aft. V.M. Torosov, 2019, 288 p. (In Russian)

Stankey G.H., Cole D.N., Lucas R.C. et al. *The Limits of Acceptable Change (LAC) System for Wilderness Planning,* Gen. Tech. Rep. INT-176, Ogden, UT, U.S., Department of Agriculture, Forest Service, 1985, 39 p.

Uljanova T.N. *Sornye rastenija vo flore Rossii i drugih stran SNG* [Weeds in the flora of Russia and other CIS countries], St. Petersburg, All-Russian Institute of Plant Growing Publ., 1998, 233 p. (In Russian)

Zavadskaya A.V., Lebedeva E.V., Chizhova V.P. Mehanizmy regulirovanija turistskih potokov v Doline gejzerov (Kamchatka) [Mechanisms of tourist flows regulation in the Valley of Geysers (Kamchatka)], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 5, p. 63–77. (In Russian)

Web source

Vremennaja metodika opredelenija rekreacionnyh nagruzok na prirodnye kompleksy pri organizacii turizma, jekskursij, massovogo povsednevnogo otdyha i vremennye normy jetih nagruzok [Temporary methodology for determining recreational loads on natural complexes in the organization of tourism, excursions, mass everyday recreation and time norms of these loads], Moskva, Gosudarstvennyj komitet SSSR po lesnomu hozjajstvu, 1987, URL: https://docs.cntd.ru/document/9033131 (access date 13.07.2023). (In Russian)

Received 22.05.2023
Revised 16.09.2023
Accepted 06.10.2023

Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2024. Т. 79. № 1. С. 48–60

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 902.672: 56.074.6

СУБРЕЦЕНТНЫЕ СПОРОВО-ПЫЛЬЦЕВЫЕ СПЕКТРЫ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕК ДОН И КУБАНЬ И ИХ ЗНАЧЕНИЕ ПРИ ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЯХ

К.В. Дюжова

Федеральный исследовательский центр «Южный научный центр» РАН, отдел океанологии и географии, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: kristi_kras007@mail.ru

Представлены результаты исследования современных аллювиальных отложений рек Дон и Кубань методом спорово-пыльцевого анализа, проведенного для уточнения методологических вопросов, в том числе перемещения пыльцы и спор текучими водами. Выяснено, что субрецентные спорово-пыльцевые спектры аллювиальных отложений, сформированные в результате сноса и перемешивания пыльцы водным и воздушным путем отражают не состав локальных группировок растений, расположенных по берегам рек, а дают характеристику регионального растительного покрова на зональном уровне. Согласно результатам анализа отложений реки Дон, дальность массового переноса пыльцы и спор водным путем незначительна, что хорошо прослеживается на границе лесостепной и степной зон. Обнаружено, что в спектрах лесостепной зоны содержание пыльцы древесных пород находится на уровне 50%, в степной зоне, в том числе в северной ее части, древесные породы составляют не более 30–35%. Представители лесных сообществ, такие как пыльца ели, споры плаунов и сфагновых мхов, в аллювиальных отложениях Дона, протекающего в степной зоне, а также в субрецентных осадках Азовского моря представлены единично и могут не учитываться при палеореконструкциях. Состав современных спектров отложений реки Кубани менее изменчив при продвижении от среднего течения к устью, наблюдается относительная стабильность содержания компонентов. При анализе распространения пыльцы элементов кавказской флоры на примере *Fagus orientalis* Lipsky и *Carpinus caucasica* Grossh. установлено, что пыльца представителей этих таксонов почти не переносится от высокогорных и среднегорных ландшафтов верховий Кубани водным путем. Проведенное сравнение содержания пыльцы и спор субрецентных спектров из аллювиальных осадков и донных отложений Азовского моря показало, что искажение состава фоссильных спектров за счет заноса материала водным путем минимально.

Ключевые слова: спорово-пыльцевой анализ, перенос пыльцы и спор, Азовское море

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.4

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающие требования, предъявляемые к результатам спорово-пыльцевого анализа при палеогеографических исследованиях, вызывают необходимость совершенствования аспектов методического обоснования реконструкции палеорастительности. Основным инструментом в решении этого вопроса является изучение поверхностных или субрецентных спорово-пыльцевых спектров, которые представляют многолетний «пыльцевой дождь», аккумулирующийся в поверхностном слое почвы, в верхнем слое аллювия рек или донных отложений [Гричук, Заклинская, 1948; Мальгина, 1950; Федорова, 1952]. В данном направлении ведутся регулярные исследования, но до настоящего времени остаются открытыми вопросы о достоверности отражения в спектрах состава окружающих растительных сообществ, количестве заносного материала, а также сохранности пыльцы и спор отдельных таксонов и потерях при выделении пыльцы из вмещающих отложений [Кожин и др., 2015; Лопатина, Занина, 2016; Новенко и др., 2016; Новенко и др., 2017; Рашке, Савельева, 2017]. Механизмы накопления пыльцевых зерен и спор в субаэральных (почвы) и субаквальных (аллювиальных, озерных и морских) осадках различны. На основании данных, полученных при изучении поверхностных проб почвы, еще В.П. Гричуком [1950] было установлено, что каждая ботаническая зона характеризуется определенными спорово-пыльцевыми спектрами. Особое значение уделялось анализу смешанных спектров и выделению из них

явно привнесенных элементов. В многочисленных работах последних лет по поверхностным пробам лесостепной зоны отмечается значительное искажение содержания пыльцы древесных пород по отношению к реальному участию древесной растительности на прилегающих территориях [Мальгина, 1950; Рябогина, Якимов, 2010]. Спорово-пыльцевые спектры степной зоны достоверней отражают состав окружающего растительного покрова [Гричук, 1950].

Для юга европейской части России уникальным объектом палеогеографических исследований, сохранившим историю всего голоцена, является Азовское море, по материалам которого существуют многочисленные реконструкции изменения природной среды в Приазовье [Вронский, 1976; Исагулова, 1978; Матишов и др., 2018]. Спорово-пыльцевые спектры морских отложений имеют свои особенности и формируются за счет трех источников поступления: пыльцы растений, входящих в состав растительных сообществ побережья, заносной пыльцы и спор, а также переотложенных форм [Матишов, Новенко, 2008]. При формировании спектров в водной среде необходимо обращать внимание на такой фактор, как перенос пыльцевых зерен и спор текучими водами. В связи с этим возникает вопрос, отражается ли зональный тип растительности в спектрах донных отложений и дают ли они представление о составе окружающих растительных сообществ. В литературе отмечается возможность перемещения пыльцевых зерен и спор на сотни километров водным путем [Губонина, 1965; Федорова, 1952], однако важно не переоценить их влияние на формирование спектров.

На основании современных пойменных отложений Оби, Енисея и других рек М.П. Гричук [1959] установлена тесная взаимосвязь количества пыльцы, спор и состава растительности, при которой содержание пыльцы и спор современных речных отложений условно постоянно для каждой зоны и подзоны. Состав спорово-пыльцевых спектров аллювиальных отложений в целом адекватно отражает характер растительного покрова территории. При этом роль заносной пыльцы и спор отмечена как незначительная, что не может повлиять на интерпретацию зонального типа растительности по результатам спорово-пыльцевого анализа [Гричук, 1959]. Для оценки водного заноса пыльцы и спор в Азовское море возникла задача анализа поверхностных проб из аллювиальных отложений рек Дон и Кубань, а также проведение сравнения состава спорово-пыльцевых спектров этих отложений с субрецентными спектрами донных осадков акватории.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Река Дон, бассейн которой находится в пределах лесостепной и степной зон, берет свое начало на севере Среднерусской возвышенности в Тульской области. Перенос пыльцы и спор происходит в течение всего года. Основная масса пыльцы древесных пород поступает с талыми водами в весенний период. Пыльца трав попадает в реку главным образом в весенне-летний сезон с поверхностным стоком или ветровым заносом [Федорова, 1952]. Постепенно в процессе накопления аллювиальных отложений происходит осаждение пыльцы и спор.

Образцы аллювиальных отложений реки Дон были отобраны на всем протяжении от истока до устья. Всего изучено 14 образцов. Для анализа использовался верхний (несколько сантиметров) илистый слой осадка из прибрежной части, отлагающийся при уменьшении скорости течения воды и образовавшийся на протяжении нескольких последних лет. Исследованные образцы можно условно разделить на несколько групп.

К первой группе можно отнести участки, расположенные в лесостепной зоне (рис. 1, точки 1–6; табл.), где для растительного покрова характерно чередование лесов и луговых (разнотравно-луговых) степей. В пределах лесостепной зоны Европейской России распространены дубовые (*Quercus robur* L.) с примесью *Fraxinus excelsior* L., *Tilia cordata* Mill., *Acer platanoides* L., *Ulmus glabra* Huds. леса с подлеском из *Corylus avellana* L. и *Euonymus verrucosus* Scop. [Растительность…, 1980]. В настоящее время сохранились лишь фрагменты широколиственных лесов, а древесно-кустарниковая растительность лесостепи в верховьях Дона представлена преимущественно пойменными и байрачными лесами (лесистость составляет от 2 до 8%). Особенно хорошо это прослеживается к южным границам лесостепи, где древесные массивы спускаются с водоразделов в долины рек и балки. Сосновые леса (*Pinus sylvestris* L.), приуроченные к полосе лесостепей, встречаются в виде небольших разрозненных массивов и характеризуются значительным участием в травяном покрове степных и лугово-степных растений (*Festuca ovina* L., *Koeleria macrantha* (Ledeb.) Schult., *Helichrysum arenarium* (L.) Moench и др.).

Вторую группу составляют участки, расположенные на севере степной зоны в пределах среднего течения реки Дон между местом впадения рек Битюг и Хопер (см. рис. 1, точки 7–9). Естественная растительность существует как разновидность богаторазнотравно-типчаково-ковыльных степей с доминированием ковылей (*Stipa* spp.) и высоким разнообразием лугово-степного разнотравья (*Filipendula vulgaris* Moench, *Potentilla humifusa* Willd. ex Schltdl., *Salvia stepposa* Des.-Shost. и др.) и разнотравно-тип-

чаково-ковыльных степей (*Stipa* spp., *Festuca* spp.). Лесная растительность распределена неравномерно. Она приурочена к долинам рек и элементам эрозионно-балочной сети (лесистость до 8%). Дубравы занимают чуть больше 50% от всей покрытой лесом площади, где основной лесообразующей породой выступает *Quercus robur*. Совместно с ним произрастают *Tilia cordata, Acer platanoides, Ulmus glabra, Corylus avellana, Betula pendula* Roth. Кустарниковый подлесок формируют *Acer tataricum* L., *Euonymus verrucosus*, *Prunus spinosa* L. и др. В полосе луговых степей и в северной части полосы разнотравно-ковыльных степей находятся сосновые леса в виде небольших разрозненных массивов, которые в долине Дона приурочены к террасам, сложенным главным образом палеогеновыми песками и песчаниками. Осокоревые леса, состоящие из *Populus nigra* L. и *Populus alba* L., встречаются в поймах рек.

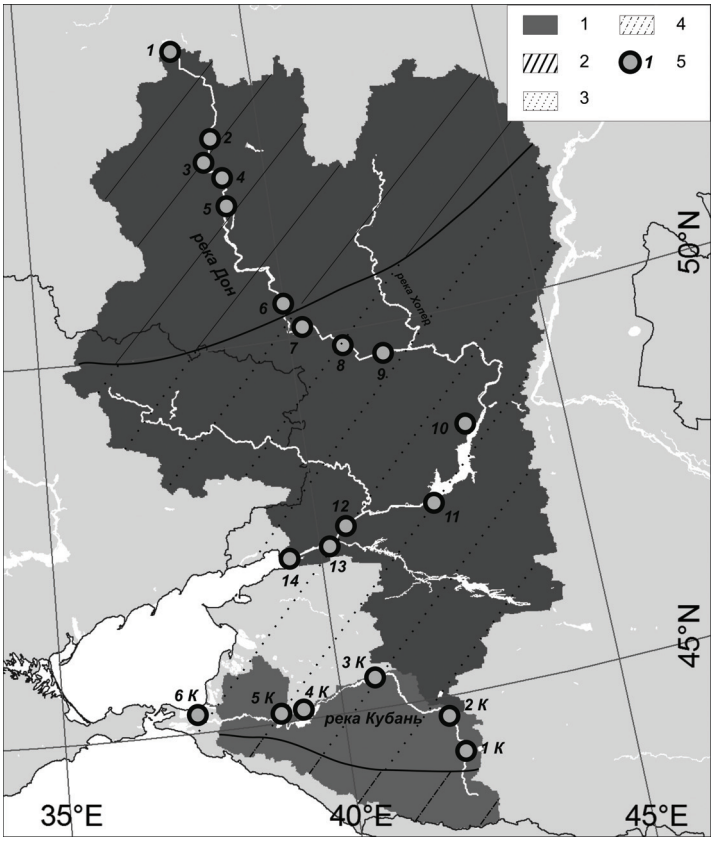


Рис. 1. Карта-схема отбора субрецентных спорово-пыльцевых спектров донных отложений (Зональные подразделения растительного покрова указаны по [Растительность…, 1980; Сафронова, Юрковская, 2015]): 1 – границы водосборного бассейна; 2 – зона лесостепи; 3 – зона степи; 4 – северокавказские широколиственные леса; 5 – точки отбора образцов

Fig. 1. The schematic map of alluvial subrecent pollen spectra points (Vegetation Zones are presented according to [Vegetation…, 1980; Safronova, Yurkovskaya, 2015]): 1 – drainage area boundaries; 2 – forest-steppe zone; 3 – steppe zone; 4 – North Caucasus broad-leaved forests; 5 – sampling points

Третья группа станций отбора расположена в пределах Цимлянского водохранилища (см. рис. 1, точки 10, 11), где зональная растительность относится к сухим степям. Для естественных сообществ прилегающих территорий характерны типчаково-ковыльные степи (*Stipa* spp. + *Festuca valesiaca*) с участием бедного разнотравья и полыней (*Artemisia* spp.) и комплексная степная растительность с участием видов, устойчивых к засолению почв (*Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Glycyrrhiza echinate* L., *Hierochloe odorata* (L.) P. Beauv. и др.) [Новикова, Волкова, 2016].

Четвертая группа – образцы, отобранные в нижнем течении Дона на участке от впадения реки Северский Донец до дельты (см. рис. 1, точки 12–14), расположенном в зоне разнотравно-типчаково-ковыльных степей [Растительность…, 1980].

Современный растительный покров лесостепной и степной зон значительно трансформирован под воздействием антропогенных факторов. Территории в большинстве своем распаханы, и участки естественной древесной и травянистой растительности разрознены и сохранились только в заповедниках.

Таблица

Точки отбора субрецентных проб

№ образца	Координаты	Расположение
Река Дон		
1	53°58′05,7″; 38°26′05,9″	Тульская обл., восточнее г. Донского
2	52°34′50,8″; 38°54′37,9″	Липецкая обл., вблизи д. Галичья Гора
3	52°23′37,4″; 38°54′16,2″	Липецкая обл., район г. Задонска
4	52°07′22,6″; 39°09′22,8″	Липецкая обл., окрестности с. Конь-Колодезь
5	51°53′45,4″; 39°09′57,9″	Воронежская обл., к северо-западу от с. Новоживотинное
6	50°32′04,6″; 40°00′37,7″	Воронежская обл., к северу от с. Белогорье
7	50°10′11,8″; 40°25′58,4″	Воронежская обл., окрестности с. Верхний Мамон
8	49°47′20,8″; 41°08′03,4″	Ростовская обл., ст. Казанская
9	49°37′33,4″; 41°43′02,0″	Ростовская обл., окрестности ст. Вешенской
10	48°22′58,5″; 43°06′06,7″	Волгоградская обл., Цимлянское водохранилище, вблизи ст. Нижний Чир
11	47°37′46,3″; 42°25′26,7″	Ростовская обл., к северо-востоку от г. Волгодонска
12	47°33′11,0″; 40°40′10,1″	Ростовская обл., окрестности ст. Раздорская
13	47°14′13,0″; 40°14′31,7″	Ростовская обл., район ст. Манычская
14	47°05′48,3″; 39°18′14,6″	Ростовская область, дельта р. Дон
Река Кубань		
1к	44°13′14,2″; 42°01′47,3″	Карачаево-Черкесская Республика, район г. Черкесска
2к	44°43′00,7″; 41°49′36,2″	Ставропольский край, к северо-западу от г. Невинномысска
3к	44°46′09,2″; 41°47′23,9″	Краснодарский край, южнее г. Кропоткина
4к	45°01′41,3″; 39°17′45,1″	Краснодарский край, Краснодарское водохранилище, окрестности ст. Старокорсунской
5к	45°2′33,174″; 8°52′52,776″	Краснодарский край, западнее г. Краснодара
6к	45°15′14,5″; 37°21′59,2″	Краснодарский край, близ г. Темрюка

Река Кубань является самой длинной и многоводной рекой Северного Кавказа. Зарождаясь на склонах Эльбруса, она несет свои воды в Азовское море и впадает в него вблизи г. Темрюк. Аллювиальные отложения реки Кубань представлены шестью образцами, отобранными в предгорной и равнинной зонах (см. рис. 1; см. табл.). Исследуемая часть реки протекает в зоне приазовско-причерноморских богаторазнотравно-типчаково-ковыльных степей и прикубанских остепненных лугов и луговых степей. Основная часть лесной растительности Кубани, которая составляет 2 млн га (лесистость 22%) [Белюченко, 2010], сосредоточена в предгорных и горных районах. Территориально можно выделить три участка отбора образцов, отличающихся особенностями состава растительного покрова.

Первый участок (см. рис. 1, точка 1к недалеко от г. Черкесска) расположен в Кавказской флористической провинции Западного Предкавказья [Иванов, 1998] в Черкесском районе, который охватывает равнинно-холмистую территорию и отличается развитием степной растительности [Шильников, 2010]. В настоящее время территории активно используются под сельскохозяйственные нужды. Естественные лесные участки занимают понижения и долины и представлены главным образом широколиственными лесами. Это преимущественно дубово-ясенево-грабовые леса с примесью *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., *Ulmus minor* Mill., *Cornus mas* L. и др. В верховьях балок и на плато имеются реликтовые участки букового леса из *Fagus orientalis* Lipsky. Остатки лесных массивов сохранились по надпойменным террасам долины Кубани, где высокоствольные леса большей частью заменены кустарниковой порослью и мелколесьем [Гвоздецкий, 1963]. Травянистая растительность представлена луговыми, богаторазнотравными и разнотравно-типчаково-ковыльными степями.

Второй участок (см. рис. 1, точки 2к–5к), расположенный в пределах течения реки от г. Невинномысска до Краснодарского водохранилища, окружен степными формациями с преобладанием злаков родов *Stipa* spp., *Festuca* spp. и др., в настоящее время большей части распаханными и под-

верженными антропогенной нагрузке. В поймах сохранилась древесная растительность, состоящая преимущественно из *Salix alba* L., *Populus alba, P. nigra*, *Ulmus minor*, *Fraxinus excelsior, Alnus glutinosa*.

Третий участок расположен в дельте р. Кубани (см. рис. 1, точка 6), которая занята специфическими интразональными лиманно-плавневыми и плавнево-литоральными флороценотическими комплексами. В гигро- и гидрофильных сообществах отмечены такие виды, как *Stachys palustris* L., *Carex pseudocyperus* L., *Nymphaea alba* L. и др. [Литвинская, 2015].

Образцы для спорово-пыльцевого анализа обрабатывались согласно стандартной методике [Гричук, 1940]. Для определения пыльцевых зерен и спор использовались специальные атласы и определители [Куприянова, Алешина, 1978; Reille, 1992 и др.], а также материалы Информационной системы по анатомии и морфологии растений [Северова и др., 2016]. Обработка данных и построение спорово-пыльцевых диаграмм проводилась с помощью программы Tilia [Grimm, 1990]. За 100% принята сумма пыльцы древесных и кустарниковых (AP – arboreal pollen), травянистых и кустарничковых растений (NAP – non-arboreal pollen) и спор. Во всех образцах было подсчитано от 300 до 500 пыльцевых зерен и спор.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На сводной спорово-пыльцевой диаграмме поверхностных спектров аллювия р. Дон (рис. 2) образцы расположены в порядке продвижения от истока к устью. Спорово-пыльцевой анализ спектров лесостепной зоны (см. рис. 2, образцы 1–6) показал, что около 50% от общей суммы пыльцы и спор приходится на долю древесных пород. Большая часть территории в непосредственной близости от точек отбора аллювиальных отложений покрыта лугами со значительным участием представителей семейства злаковых (*Bromopsis riparia* (Rehmann) Holub, *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Poa pratensis* L. и др.). Древесная растительность понижений поймы представляет собой участки осокоревого леса (*Populus alba, P. nigra*) с примесью *Populus tremula* L. Вдоль русла реки распространены заросли ивняков (*Salix acutifolia* Willd., *S. alba* и др.). В группе древесных преобладает пыльца сосны (*Pinus sylvestris*) (около 25%) и березы (*Betula*) (в среднем 20%), заметно участие в формировании спектров пыльцы ольхи (*Alnus*), дуба (*Quercus*) и ивы (*Salix*) (до 10%). Пыльца ели (*Picea*) встречается во всех спектрах лесостепной зоны, однако представлена единично. Пыльца тополя (*Populus*), которая практически не сохраняется в ископаемом состоянии, встречается единично. Группа травянистых растений отличается высоким таксономическим разнообразием без четко выраженных доминантов. В незначительном количестве (до 15%) присутствует пыльца семейств Asteraceae, Chenopodiaceae, Poaceae и Brassicaeae. Пыльца водных и прибрежно-водных растений регулярно встречается и составляет в образцах 2 и 4 (Липецкая обл.) до 10%. Основная доля (до 8%) – это пыльца семейств Sparganiaceae и Potamogetonaceae, кроме того, встречаются представители Cyperaceae, Typhaceae и Nymphaeaceae. Спектры лесостепной зоны характеризуются большим разнообразием спор. Здесь были обнаружены представители хвощей, плаунов, сфагновых мхов, папоротников семейств Polypodiaceae, Ophioglossaceae, Aspidiaceae и др. Несмотря на широкое таксономическое разнообразие, содержание спор не превышает 3–5%. Все это отражает картину распространения мозаичного экотона, в котором пространства лугов и луговых степей чередуются с массивами леса.

В спектрах образцов, отобранных в среднем течении Дона, по мере продвижения на юг снижается количество пыльцы древесных пород до 30% (образцы 7–9, расположенные в Воронежской и на севере Ростовской областей, см. рис. 2). Участки, расположенные рядом с точками отбора, представляют собой практически безлесные пространства, покрытые костров-разнотравной луговой растительностью. Древесная и кустарниковая растительность представлена сообществами *Populus nigra*, зарослями *Prunus spinosa*, различными видами ив. В полученных спектрах высоким остается содержание пыльцы *Pinus* (до 20%), что может быть следствием ее заноса из сосновых массивов, произрастающих на песчаных речных террасах. По сравнению с лесостепной зоной здесь сокращается количество пыльцы *Betula,* содержание пыльцы *Quercus* остается примерно на том же уровне. Необходимо отметить заметное количество пыльцы *Salix*, которая в ископаемых осадках в большинстве своем разрушается [Сладков, 1967], однако в современных аллювиальных отложениях составляет около 5%, отражая наличие ивняков, растущих на понижениях и на влажных участках прирусловой поймы. Состав травянистых компонентов спектра схож с лесостепной зоной. В группе водных и прибрежно-водных растений преобладает пыльца Sparganiaceae и Cyperaceae. Таксономическое разнообразие спор снижается по сравнению с лесостепной зоной, они представлены в основном папоротниками семейства Polypodiaceae.

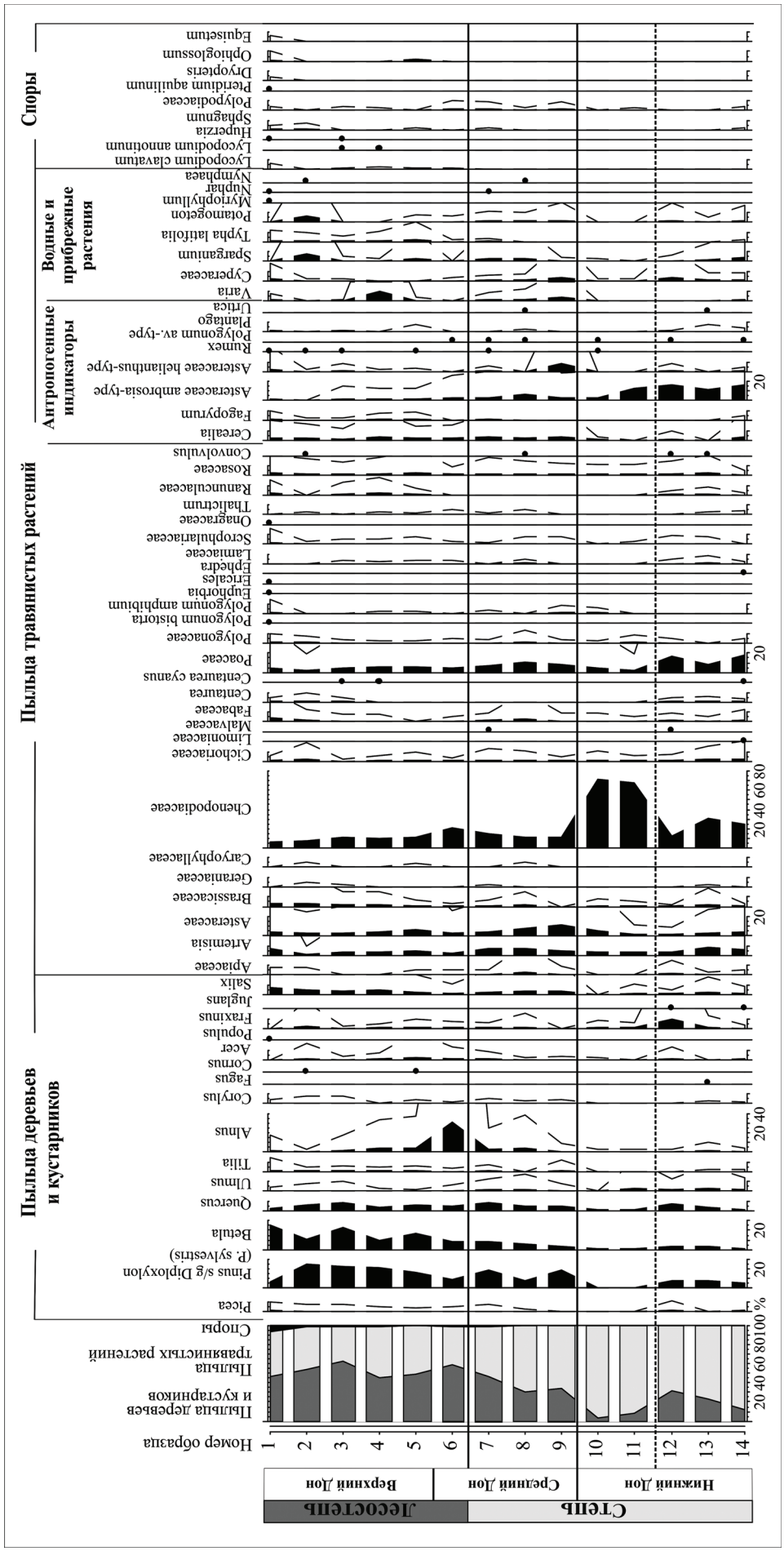


Рис. 2. Спорово-пыльцевая диаграмма субрецентных спектров отложений р. Дона. За 100% принята сумма AP, NAP и спор

Fig. 2. Pollen diagram of subrecent spectra from the Don River deposits. AP + NAP + Spores = 100%

Образцы, отобранные в Цимлянском водохранилище (см. рис. 2, образцы 10, 11), резко отличаются по соотношению компонентов, что выражается в минимальном содержании пыльцы древесных пород в спорово-пыльцевых спектрах (до 10%). Падение скорости течения в водохранилище вызывает увеличение осаждения пыльцы локальных компонентов растительного покрова, которые составляют большую часть суммы всех пыльцевых зерен. В образцах присутствует главным образом пыльца травянистых растений (до 90%), из которых 75% принадлежит представителям семейства Chenopodiaceae. Маревые входят в число пяти ведущих семейств таксономической структуры флоры побережья водохранилища, однако уступают представителям таких семейств, как Asteraceae, Poaceae и Fabaceae [Новикова, Волкова, 2016], что указывает на значительное завышение показателей в спектрах аллювиальных отложений. В группе трав заметную долю приобретает пыльца амброзии полыннолистной (*Ambrosia artemisiifolia* L.), содержание которой достигает 20%, и далее по течению она становится неотъемлемым участником спектров. Количество пыльцы водных растений и спор в спектрах Цимлянского водохранилища минимально.

В осадках близ ст. Раздорская (см. рис. 2, образец 12) обнаружено достаточно высокое, по сравнению с другими образцами, отобранными на территории нижнего Дона, содержание пыльцы древесных растений – 35%. Точка отбора расположена недалеко от ООПТ «Раздорские склоны» – природно-исторического ландшафта с ковыльными степями, наиболее южными байрачными и нагорными лесами. Степная растительность здесь представлена главным образом сухими, обедненными вариантами разнотравно-дерновиннозлаковых степей. Во фрагментах формаций байрачных дубрав из *Quercus robur* спутниками являются *Fraxinus excelsior* и *Acer campestre* L. Встречаются берестняки и небольшие массивы пойменного леса с доминированием вяза (*Ulmus glabra*, *U. minor*) [Ермолаева и др., 2021]. Спорово-пыльцевые спектры помимо пыльцы *Pinus*, в заметном количестве (до 10%) содержат пыльцу представителей родов *Quercus и Fraxinus.* В группе трав заметна доля пыльцы Poaceae. Среди водных и прибрежно-водных растений преобладают представители семейства Cyperaceae. Споры практически отсутствуют.

В спорово-пыльцевых спектрах образцов 13–14 (см. рис. 2), расположенных ниже по течению Дона, содержание древесных пород не превышает 20%. В травянистой части спектров повышается доля Chenopodiaceae, сохраняется роль Poaceae и *Ambrosia artemisiifolia*.

На спорово-пыльцевой диаграмме поверхностных проб из отложений р. Кубани наблюдается относительная стабильность состава компонентов спектров в разных точках отбора по сравнению с результатами, полученными для Дона (рис. 3). Наибольшее содержание пыльцы древесных пород отмечается в отложениях, отобранных на территории Карачаево-Черкесской Республики, где она составляет до 60% (образец 1к). Наименьшее – в образцах ниже по течению от Краснодара – 27% (образец 5к). Обнаружена заметная роль пыльцы сосны, причем помимо *Pinus sylvestris* в большом количестве встречается пыльца *Pinus kochiana* Klotzsch ex K. Koch, отличающаяся утолщенными стенками ячеек воздушных мешков, содержание которой в образце 2к достигает 20%. Количество пыльцы сосны в районе г. Краснодара снижается до минимальных значений в 2% (образец 5к), а в отложениях дельты (образец 6к) снова наблюдается рост до 10%. На территории среднего и нижнего течения Кубани в непосредственной близости к месту отбора образцов сосновые леса отсутствуют. Однако сообщества *Pinus kochiana* распространены по всей территории Главного Кавказского хребта и встречаются на высотах 200–2600 м над уровнем моря, образуя как чистые сосновые, так и смешанные леса в районах Восточного, Центрального и Западного Кавказа.

В изученной области предгорной и равнинной частей бассейна Кубани встречаются преимущественно байрачные с преобладанием дубрав из *Quercus petraea* (Matt.) Liebl., и пойменные с доминированием *Salix alba* леса. В спектре образца 1к (см. рис. 3) присутствует, помимо пыльцы *Quercus, Salix* и *Alnus*, довольно высокое содержание пыльцы *Fraxinus*, также заметно участие пыльцы кустарника облепихи крушиновидной (*Hippophae rhamnoides* L.), произрастающей на речных галечниках [Шильников, 2010]. Встречающиеся на территории Карачаево-Черкесской Республики дубово-грабовые леса с преобладанием *Carpinus caucasica* Grossh.*, Quercus petraea, Q. robur, Acer campestre, Fagus orientalis* и *Fraxinus excelsior* [Шильников, 2010] представлены единичными пыльцевыми зернами граба (*Carpinus*, до 2%) и бука (*Fagus*, до 1%). Содержание в спектрах среднего течения р. Кубань пыльцы *Quercus, Salix* и *Alnus* отражает распространение пойменных лесов (*Salix alba, Populus alba, Ulmus minor, Fraxinus excelsior, Alnus glutinosa*) [Иванов, 1998]. На территории Таманского полуострова в древесной части спектра аллювиальных отложений преобладает пыльца *Salix* и *Pinus kochiana*.

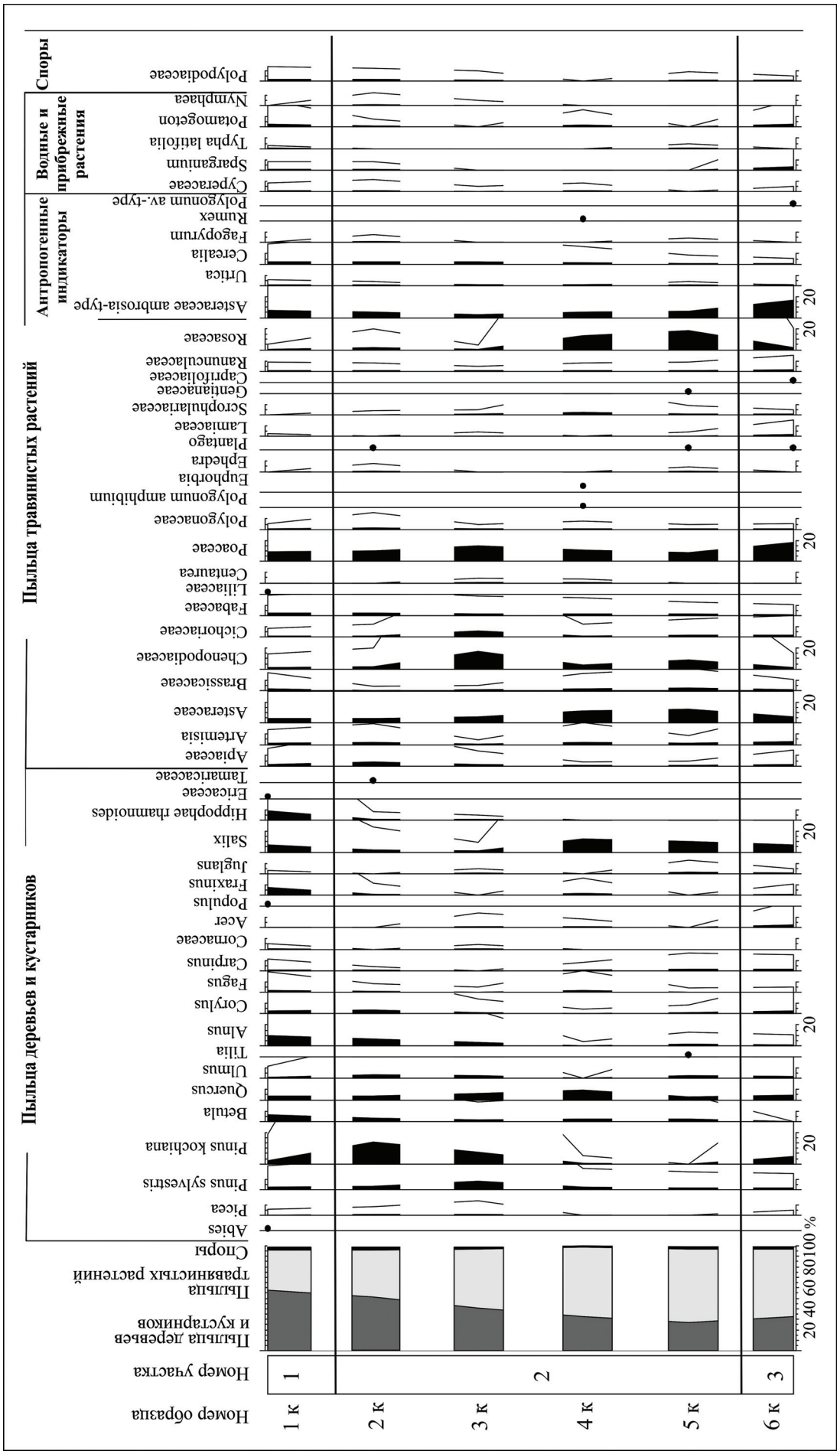


Рис. 3. Спорово-пыльцевая диаграмма субрецентных спектров отложений р. Кубани. За 100% принята сумма AP, NAP и спор

Fig. 3. Pollen diagram of subrecent spectra from the Kuban River deposits. AP + NAP + Spores = 100%

В группе пыльцы травянистых растений спорово-пыльцевых спектров Кубани доминирует пыльца семейств Asteraceae, Poaceae и Chenopodiaceae. Это хорошо отражает систематический анализ флоры Предкавказья, согласно которому среди крупнейших семейств выделяют сложноцветные и маревые с максимальным процентом участия 13,4 и 8,2% соответственно [Иванов, 1998]. Таксономический состав пыльцы разнотравья разнообразен во всех изученных образцах, в аллювиальных отложениях близ Краснодара (образец 5к) и Краснодарского водохранилища (образец 4к) наблюдается ее максимальное количество. В качестве постоянных компонентов спектров присутствует пыльца рудеральных растений, в том числе *Ambrosia artemisiifolia.* Отличительной особенностью состава аллювиальных отложений Кубани по сравнению с Доном является незначительная доля пыльцы водных, прибрежно-водных растений и спор.

Переходя к анализу полученных результатов, можно отметить, что спорово-пыльцевые спектры аллювиальных отложений являются часто смешанными, одновременно содержащими пыльцу типичных степных и лесных форм [Гричук, 1950] из разных экологических групп. Учитывая это, необходимо выделять в спектрах такие компоненты, которые могут давать искажение при проведении палеореконструкций. По данным, полученным для Волги [Федорова, 1952], спорово-пыльцевые спектры аллювиальных отложений не всегда соответствуют спектрам тех ботанико-географических зон, в которых они отобраны, что происходит из-за переноса водным путем пыльцы и спор растений других зон. В качестве основных заносных элементов выделяют лесные компоненты, которые можно разделить на две группы. В первую группу входит пыльца ели, при этом отмечается ее перенос водой на 1400 км в количестве свыше 10%. Ко второй группе заносных элементов относят споры плаунов и сфагновых мхов, которые воздушным путем недалеко переносятся от места произрастания, поэтому нахождение их в наилках объясняется переносом водным путем. В аллювиальных осадках Дона споры плаунов и сфагновых мхов являются аллохтонными компонентами и занимают очень малую долю спектра, встречаясь главным образом в лесостепной зоне. Находки заносной пыльцы *Picea* так же единичны, пыльцевые зерна практически не встречаются в осадках степной зоны. Исследования поверхностного слоя донных отложений Азовского моря [Матишов и др., 2018] также не подтверждают присутствие большого количества пыльцы *Picea* и спор; эти компоненты представлены единично по всей акватории. Расположение верховий Дона в полосе лесостепи, где отсутствуют лесные сообщества, содержащие данные таксоны, не позволяет сделать вывод о значительном переносе их водным путем.

Пыльцевые зерна сосны обладают способностью транспортировки по воздуху на значительные расстояния, поэтому в спектрах аллювиальных отложений не представляется возможным разделить материал, принесенный воздушным путем, и материал, перенесенный водным путем. Пыльца *Pinus* является постоянным компонентом спорово-пыльцевых спектров донных осадков Дона, Кубани и Азовского моря. По данным Р.В. Федоровой [Федорова, Вронский, 1980], в случае, если в группе древесных пород встречаемость ее на 1000 зерен не выше 100, есть основания отнести спектры к безлесному ландшафту. Соответственно, при наличии ее в пробе 800–900 зерен на 1000 можно предположить, что проба отобрана в сосновом бору. В аллювиальных отложениях лесостепной зоны (образцы 1–6, см. рис. 2), а также в среднем течении реки Кубани (точки 1к и 2к, см. рис. 3) число пыльцевых зерен сосны колеблется в пределах 300–400 на 1000, что отражает участие сосны в региональной растительности. Присутствие в растительном покрове изученной территории естественных и искусственных сосновых массивов отражается на составе спорово-пыльцевых спектров. Пыльца сосны при этом выступает не только в качестве заносной, но может являться и автохтонным компонентом спектров.

Пыльца широколиственных пород, главным образом *Quercus*, в спорово-пыльцевых спектрах аллювиальных отложений рек Дон и Кубань встречена повсеместно. На границе лесостепной и степной зон содержание ее достигает 10%. Так, присутствие пойменных и байрачных лесов, образованных в основном дубравами, находит отражение в аллювиальных осадках в северных районах степной зоны.

Изученная часть реки Кубань, располагаясь в зоне степей и остепненных лугов, дает осредненное описание спорово-пыльцевых спектров и отражает состав регионального растительного покрова. Важной задачей в исследовании отложений Кубани может стать анализ переноса водным путем представителей кавказской флоры. В качестве таких элементов рассмотрим содержание пыльцы *Carpinus* и *Fagus.*

В донных осадках Азовского моря пыльца граба и бука является постоянным компонентом спектров [Матишов и др., 2018]. Пыльцу *Carpinus* можно обнаружить как в субрецентных донных осадках в количестве 1–2%, так и в колонках морских отложений, где в некоторых горизонтах ее содержание повышается до 10–12%. Доля пыльцы *Fagus* в субрецентных спорово-пыльцевых спектрах Азовского моря значительно меньше пыльцы *Carpinus*

[Матишов и др., 2018] и встречается единично. В отложениях отдельных периодов голоцена ее значение может повышаться до 3–4%. В аллювиальных отложениях Кубани в среднем ее течении пыльца *Carpinus* практически исчезает, а в отложениях дельты повышается почти до 2%. В распространении пыльцы *Fagus* закономерность выявить не удалось, она встречается на протяжении всего маршрута исследования. Можно сделать вывод, что пыльца кавказских лесных видов не переносится в большом количестве далеко от высокогорных и среднегорных ландшафтов верховий Кубани водным путем. Существует большая вероятность ветрового заноса пыльцы древесных растений (*Carpinus, Fagus*) с территорий Крыма и Северо-Западного Кавказа. И повышение роли пыльцы этих видов в ископаемых спорово-пыльцевых спектрах можно интерпретировать как сигнал изменения границ их произрастания.

Состав группы трав играет большую роль при анализе спектров донных осадков, так как их пыльца обычно осаждается в непосредственной близости от места произрастания и отражает зональную растительность. В группе травянистых растений для спектров аллювиальных отложений Дона наблюдаются некоторые изменения при продвижении с севера на юг. Здесь стоит обратить внимание на содержание пыльцы семейства Chenopodiaceae. Если на верхнем и среднем Дону в осадках содержится небольшое количество пыльцы маревых (в среднем 15%), то на нижнем Дону их содержание резко возрастает (максимально до 75%). В случае с Цимлянским водохранилищем особенностью рассматриваемой флоры побережий искусственных водоемов является видовое богатство семейства Chenopodiaceae, что объясняется засолением почв и общей ксерофитизацией флор в результате антропогенного воздействия [Новикова, Волкова, 2016].

ВЫВОДЫ

Аллювиальные отложения содержат спорово-пыльцевые спектры осредненного состава, которые формируются в результате сноса и перемешивания пыльцы путем водного и ветрового заноса и отражают не состав локальных группировок растений, расположенных по берегам рек, а дают характеристику регионального растительного покрова на зональном уровне.

Анализ спорово-пыльцевых спектров отложений реки Дон из различных ботанико-географических зон показал, что изменение соотношения древесных и травянистых компонентов спектра при переходе от лесостепных к степным условиям, происходит вполне закономерно. Перенос пыльцы и спор водным путем из северных районов в Азовское море незначителен, что позволяет сделать вывод о преобладающем влиянии на спектры растительного покрова близлежащих территорий. Отдельные компоненты могут переноситься на значительные расстояния, как, например, пыльца ели или споры сфагновых мхов и папоротников, однако процентное содержание их в спектрах до 1% позволяет не учитывать эти компоненты при палеореконструкциях. Полученные данные отличаются от исследований, проводимых для Волги [Федорова, 1952], где в спектрах степной зоны отмечается значительное количество северных элементов, что может объясняться наибольшей протяженностью Волги и охватом большего числа растительных зон.

Таксономический состав компонентов в спорово-пыльцевых спектрах предгорной и равнинной частей Кубани также адекватно отображает состояние окружающего растительного покрова. Спорово-пыльцевой анализ субрецентных спектров донных отложений реки Кубань позволил установить закономерности распространения элементов кавказской флоры водным путем и определить их влияние на формирование спектров Азовского моря.

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации гос. задания ЮНЦ РАН № 122011900166-9. Автор благодарит Е.В. Дюжова за помощь в сборе материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белюченко И.С. Экология Краснодарского края (Региональная экология): учеб. пособие. Краснодар: КубГАУ, 2010. 356 с.

Вронский В.А. Маринопалинология южных морей. Ростов-н/Д: Изд-во Ростовского ун-та, 1976. 200 с.

Гвоздецкий Н.А. Кавказ. М.: Гос. изд-во географической литературы, 1963. 260 с.

Гричук В.П. Методика обработки осадочных пород, бедных органическими остатками, для целей пыльцевого анализа // Проблемы физической географии. 1940. Вып. 8. С. 53–58.

Гричук В.П. Растительность Русской равнины в нижне- и среднечетвертичное время // Тр. Ин-та географии АН СССР. 1950. Т. 46. С. 5–202.

Гричук В.П., Заклинская Е.Д. Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии / под ред. проф. К.К. Маркова. М.: Географгиз, 1948. 224 с.

Гричук М.П. К применению метода спорово-пыльцевого анализа в Сибири // Научн. докл. высш. шк. Сер. геол.-геогр. наук. 1959. Вып. 1. С. 122–133.

Губонина З.П. Палеоботанические исследования аллювиальных отложений средней Волги с целью установ-

ления их возраста: автореф. дис. … канд. геогр. наук. М., 1965. 20 с.

Ермолаева О.Ю., Федяева В.В., Шмараева А.Н., Горовцов А.В. Биологическое разнообразие растений на территории охраняемого ландшафта «Раздорские склоны» // Изв. высш. учеб. заведений. Северо-Кавказский регион. Сер.: Естественные науки. 2021. № 2(210). С. 106–112.

Иванов А.Л. Флора Предкавказья и ее генезис. Ставрополь: Изд-во СГУ, 1998. 204 с.

Исагулова Е.З. Палинология Азовского моря. Киев: Наукова думка, 1978. 88 с.

Кожин М.Н., Ершова Е.Г., Смышляева О.М., Попова К.Б. Современные спорово-пыльцевые спектры островов Белого моря (Порья губа) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2015. № 3. С. 58–69.

Куприянова Л.А., Алешина Л.А. Пыльца двудольных флоры европейской части СССР. Л.: Наука, 1978. 184 с.

Литвинская С.А. Флора западного Предкавказья и северо-западной части Большого Кавказа и ее специфика // Ботанический вестник Северного Кавказа. 2015. № 1. С. 56–67.

Лопатина Д.А., Занина О.Г. Субрецентные спорово-пыльцевые спектры низовьев р. Колыма и их значение для реконструкции четвертичной палеогеографии региона // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2016. Т. 24(2). С. 203–211. DOI: 10.7868/S0869592X16020034.

Мальгина Е.А. Опыт сопоставления распространения пыльцы некоторых древесных пород с их ареалами в пределах европейской части СССР // Тр. ИГ АН СССР. 1950. Т. 46(3). С. 256–270.

Матишов Г.Г., Дюжова К.В., Новенко Е.Ю. Изменение ландшафтно-климатических условий Приазовья в среднем и позднем голоцене // Известия РАН. Серия географическая. 2018. № 3. С. 67–78. DOI: 10.7868/S2587556618030081.

Матишов Г.Г., Новенко Е.Ю. Палинологические исследования донных отложений // Азовское море в конце XX – начале XXI веков: геоморфология, осадконакопление, пелагические сообщества. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2008. С. 112–133.

Новенко Е.Ю., Мазей Н.Г., Зерницкая В.П. Рецентные спорово-пыльцевые спектры заповедных территорий европейской части России как ключ к интерпретации результатов палеоэкологических исследований // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2017. № 2. С. 55–65. DOI: 10.24189/ncr.2017.012.

Новенко Е.Ю., Мироненко И.В., Волкова Е.М., Куприянов Д.А., Батанова А.К. Динамика ландшафтов юго-восточной Мещеры в голоцене // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 2. С. 91–101.

Новикова Н.М., Волкова Н.А. Структура флоры побережий в зоне влияния водохранилищ на юге европейской части России // Аридные экосистемы. 2016. Т. 22. № 4(69). С. 52–63.

Растительность европейской части СССР / под ред. С.А. Грибовой, Т.И. Исаченко, Е.М. Лавренко. Л.: Наука, 1980. 429 с.

Рашке Е.А., Савельева Л.А. Субрецентные спорово-пыльцевые спектры и современная растительность дельты реки Лена, Российская Арктика // Сибирский экологический журнал. 2017. № 4. С. 456–472.

Рябогина Н.Е., Якимов А.С. Палинологические и палеопочвенные исследования на археологических памятниках: анализ возможностей и методика работ // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2010. № 2. С. 186–200.

Сафронова И.Н., Юрковская Т.К. Зональные закономерности растительного покрова равнин Европейской России и их отображение на карте // Ботанический журнал. 2015. Т. 100. № 11. С. 1121–1142.

Северова Е.Э., Нилова М.В., Девятов А.Г., Волкова О.А., Майоров С.Р., Полевова С.В., Платонова А.Г., Рудько А.И., Филин В.Р., Фырнин Д.М. Botany-collection.bio.msu.ru: информационная система по анатомии и морфологии растений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 16. Биология. 2016. № 3. С. 19–21.

Сладков А.Н. Введение в спорово-пыльцевой анализ. М.: Наука, 1967. 275 с.

Федорова Р.В. Распространение пыльцы и спор текучими водами // Тр. ИГ АН СССР. 1952. Вып. 52(7). С. 46–72.

Федорова Р.В., Вронский В.А. О закономерностях рассеивания пыльцы и спор в воздухе (для целей палеогеографических реконструкций) // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 1980. № 50. С. 153–165.

Шильников Д.С. Конспект флоры Карачаево-Черкесии. Ставрополь: АГРУС, 2010. 384 с.

Grimm E.C. TILIA and TILIA GRAPH.PC spreadsheet and graphics software for pollen data, *INQUA, Working Group on Data-Handling Methods*, Newsletter, 1990, no. 4, p. 5–7.

Reille M. Pollen et Spores D`Europe et D`Afrigue du Nord. Laboretoire de Botanique Historique et Palynologie, Marseille, 1992, 520 p.

Поступила в редакцию 04.04.2023
После доработки 14.08.2023
Принята к публикации 06.10.2023

SUBRECENT POLLEN ASSEMBLAGES IN ALLUVIAL DEPOSITS OF THE DON AND KUBAN RIVERS AND THEIR SIGNIFICANCE FOR PALAEOGEOGRAPHIC RECONSTRUCTIONS

K.V. Dyuzhova

Federal Research Centre "Southern Scientific Centre" of the Russian Academy of Sciences, Department of Oceanology and Geography, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: kristi_kras007@mail.ru

The paper presents the results of studying modern alluvial deposits of the Don and Kuban rivers by the pollen analysis method. The study was carried out to clarify methodological issue, including the movement of pollen and spores by flowing waters. The obtained data show that pollen assemblages of river sediments formed in the process of pollen mixing by water and air characterize the composition of the regional vegetation cover rather than local near-river plant groups. According to the results for the subrecent sediments of the Don River the transfer of pollen grains and spores by water was insignificant, which can be clearly seen at the border of the forest-steppe and steppe zones. Pollen assemblages of the forest-steppe zone contain 50% of tree species pollen, while in the steppe zone, including its northern part, tree species make up less than 30–35%. Sporadic forest elements such as *Picea* pollen, *Lycopodium* species spores and *Sphagnum* mosses in alluvial deposits of the steppe section of the Don River, as well as in the subrecent sediments of the Sea of Azov, could be neglected in the palaeoreconstructions. The composition of subrecent pollen assemblages of the Kuban River sediments is less variable from the middle course to the mouth with rather stable ratio of components. Pollen of the Caucasian flora elements (*Fagus orientalis*, *Carpinus caucasica*) is poorly dispersed by water from high and mid-mountain landscapes of the upper reaches of the river. The comparison of pollen assemblages from alluvial and marine (the Sea of Azov) sediments have shown that the distortion of fossil assemblages' composition due to material input by water is minimal.

Keywords: pollen analysis, transport of pollen and spores, the Sea of Azov

Acknowledgements. The work was carried out under the state task of the SSC RAS no. 122011900166-9. The author is grateful to E.V. Dyuzhov for assistance in collecting material.

REFERENCES

Belyuchenko I.S. *Ekologiya Krasnodarskogo kraya (Regional'naya ekologiya)* [Ecology of the Krasnodar Territory (Regional ecology)], Krasnodar, KubGAU Publ., 2010, 356 p. (In Russian)

Ermolaeva O.Yu., Fedyaeva V.V., Shmaraeva A.N., Gorovtsov A.V. Biologicheskoe raznoobrazie rastenii na territorii okhranyaemogo landshafta "Razdorskie sklony" [Biological diversity of plants on the territory of the protected landscape "Razdor slopes"], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region, Ser.: Estestvennye nauki*, 2021, no. 2(210), p. 106–112. (In Russian)

Fedorova R.V. Rasprostranenie pyl'tsy i spor tekuchimi vodami [Dispersal of pollen and spores by flowing waters], *Trudy In-ta geografii AN SSSR*, 1952, iss. 52(7), p. 46–72. (In Russian)

Fedorova R.V., Vronskii V.A. O zakonomernostyakh rasseivaniya pyl'tsy i spor v vozdukhe (dlya tselei paleogeograficheskikh rekonstruktsii) [On the patterns of dispersion of pollen and spores in the air (for the purposes of palaeogeographic reconstructions)], *Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*, 1980, no. 50, p. 153–165. (In Russian)

Grichuk M.P. K primeneniyu metoda sporovo-pyl'tsevogo analiza v Sibiri [On the application of the method of pollen analysis in Siberia], *Nauchn. doklad vyssh. Shk, Ser. geolog.-geogr. nauk*, 1959, iss. 1, p. 122–133. (In Russian)

Grichuk V.P. Metodika obrabotki osadochnykh porod, bednykh organicheskimi ostatkami, dlya tselei pyl'tsevogo analiza [Method of treatment of the sediments poor in organic remains for the pollen analysis], *Problemy fizicheskoi geografii*, 1940, vol. 8, p. 53–58. (In Russian)

Grichuk V.P. Rastitel'nost' Russkoi ravniny v nizhne- i srednechetvertichnoe vremya [Vegetation of the Russian Plain in the Lower and Middle Quaternary], *Trudy In-ta geografii AN SSSR*, 1950, vol. 46, p. 5–202. (In Russian)

Grichuk V.P., Zaklinskaya E.D. *Analiz iskopaemykh pyl'tsy i spor i ego primenenie v paleogeografii* [Fossil pollen and spore analysis and its application in paleogeography], K.K. Markov (ed.), Moscow, Geografgiz Publ., 1948, 224 p. (In Russian)

Grimm E.C. TILIA and TILIA GRAPH.PC spreadsheet and graphics software for pollen data, *INQUA, Working Group on Data-Handling Methods, Newsletter*, 1990, no. 4, p. 5–7.

Gubonina Z.P. *Paleobotanicheskie issledovaniya allyuvial'nykh otlozhenii srednei Volgi s tsel'yu ustanovleniya ikh vozrasta* [Palaeobotanical studies of the alluvial deposits of the middle Volga in order to establish their age], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, 1965, 20 p. (In Russian)

Gvozdetskii N.A. *Kavkaz* [The Caucasus], Moscow, Geographical literature State Publ., 1963, 260 p. (In Russian)

Isagulova E.Z. *Palinologiya Azovskogo moray* [Palynology of the Sea of Azov], Kiev, Naukova dumka Publ., 1978, 88 p. (In Russian)

Ivanov A.L. *Flora Predkavkaz'ya i ee genesis* [Flora of the Pre-Caucasus and its genesis], Stavropol, Stavropol State University Publ, 1998, 204 p. (In Russian)

Kozhin M.N., Ershova E.G., Smyshlyaeva O.M., Popova K.B. Sovremennye sporovo-pyl'tsevye spektry ostrovov Belogo morya (Por'ya guba) [Modern pollen spectra of the White Sea Islands (case study of the Poriya guba Bay)], *Vestn. Mosk. Un-ta*, *Ser. 5, Geogr.,* 2015, no. 3, p. 58–69. (In Russian)

Kupriyanova L.A., Aleshina L.A. *Pyl'tsa dvudol'nykh flory Evropeiskoi chasti SSSR* [Pollen of the dicotyledonous flora of the European part of the USSR], Leningrad, Nauka Publ., 1978, 184 p. (In Russian)

Litvinskaya S.A. Flora zapadnogo Predkavkaz'ya i severozapadnoi chasti Bol'shogo Kavkaza i ee spetsifika [Flora of the Western Ciscaucasia and the northwestern part of the Greater Caucasus and its specificity], *Botanicheskii vestnik severnogo Kavkaza*, 2015, no. 1, p. 56–67. (In Russian)

Lopatina D.A., Zanina O.G. Subrecent spore–pollen spectra from the lower Kolyma River basin and their importance for the reconstruction of the Quaternary paleogeography of the region, *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2016, vol. 24, no. 2, p. 203–211, DOI: 10.1134/S0869593816020039.

Mal'gina E.A. Opyt sopostavleniya rasprostraneniya pyl'tsy nekotorykh drevesnykh porod s ikh arealami v predelakh Evropeiskoi chasti SSSR [Experience in comparing the pollen distribution of some tree species with their ranges within the European part of the USSR], *Trudy Instituta geografii AN SSSR*, 1950, vol. 46(3), p. 256–270. (In Russian)

Matishov G.G., Dyuzhova K.V., Novenko E.Yu. Izmenenie landshaftno-klimaticheskikh uslovii Priazov'ya v srednem i pozdnem golotsene [Changing of landscape-climatic condition of the near Azov Sea territory in the Middle and Late Holocene], *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk, Ser. geograficheskaya*, 2018, no. 3, p. 67–78, DOI: 10.7868/S2587556618030081. (In Russian)

Matishov G.G., Novenko E.Yu. [Palinological investigation of bottom sediments], *Azovskoe more v kontse XX – nachale XXI vekov: geomorfologiya, osadkonakoplenie, pelagicheskie soobshchestva* [The Sea of Azov at the end of the 20th – beginning of the 21st centuries: geomorphology, sedimentation, pelagic communities], Apatity, Kola Science Centre RAS Publ., 2008, p. 112–134. (In Russian)

Nenasheva G.I. *Rastitel'nost' i klimat golotsena mezhgornykh kotlovin Tsentral'nogo Altaya* [The Holocene vegetation and climate of intermountain basins of the Central Altai], Barnaul, Altai Un-ty Publ., 2013, 164 p. (In Russian)

Novenko E.Yu., Mazei N.G., Zernitskaya V.P. Retsentnye sporovo-pyl'tsevye spektry zapovednykh territorii Evropeiskoi chasti Rossii kak klyuch k interpretatsii rezul'tatov paleoekologicheskikh issledovanii [Recent pollen assemblages from protected areas of European Russia as a key to interpreting the results of paleoecological studies], *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka,* 2017, no. 2, p. 55–65, DOI: 10.24189/ncr.2017.012. (In Russian)

Novenko E.Yu., Mironenko I.V., Volkova E.M., Kupriyanov D.A., Batanova A.K. Dinamika landshaftov yugovostochnoi Meshchery v golotsene [Dynamics of landscapes of the South-Eastern Meshchyora during the Holocene], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 2, p. 91–101. (In Russian)

Novikova N.M., Volkova N.A. Struktura flory poberezhii v zone vliyaniya vodokhranilisch na yuge evropeiskoi chasti Rossii [Structure of the coastal flora in the area influenced by the reservoirs in the south of the European part of Russia], *Aridnye ekosistemy*, 2016, vol. 22, no. 4(69), p. 52–63. (In Russian)

Rashke E.A., Savel'eva L.A. Subretsentnye sporovo-pyl'tsevye spektry i sovremennaya rastitel'nost' del'ty reki Lena, Rossiiskaya Arktika [Subrecent Spore-Pollen Spectra and modern vegetation of the Lena River Delta, Russian Arctic], *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2017, no. 4, p. 456–472. (In Russian)

Rastitel'nost' evropeiskoi chasti SSSR [Vegetation of the European part of the USSR], S.A. Gribovoi, T.I. Isachenko, E.M. Lavrenko (eds.), Leningrad, Nauka Publ., 1980, 429 p. (In Russian)

Reille M. *Pollen et Spores D`Europe et D`Afrigue du Nord,* Laboretoire de Botanique Historique et Palynologie, Marseille, 1992, 520 p.

Ryabogina N.E., Yakimov A.S. Palinologicheskie i paleopochvennye issledovaniya na arkheologicheskikh pamyatnikakh: analiz vozmozhnostei i metodika rabot [Palynological and paleosoil studies of archaeological sites: analysis of opportunities and methods of work], *Vestn. arkheologii, antropologii i etnografii*, 2010, no. 2, p. 186–200. (In Russian)

Safronova I.N., Yurkovskaya T.K. Zonal'nye zakonomernosti rastitel'nogo pokrova ravnin Evropeiskoi Rossii i ikh otobrazhenie na karte [Zonal regularities of vegetation cover on plains of the European Russia and their cartographic representation], *Botanicheskii zhurnal*, 2015, vol. 100, no. 11, p. 1121–1142. (In Russian)

Severova E.E., Nilova M.V., Devyatov A.G., Volkova O.A., Maiorov S.R., Polevova S.V., Platonova A.G., Rud'ko A.I., Filin V.R., Fyrnin D.M. Botany-collection.bio.msu.ru: informatsionnaya sistema po anatomii i morfologii rastenii [Botany-collection.bio.msu.ru: information system on the anatomy and morphology of plants], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 16, Biologiya*, 2016, no. 3, p. 19–21. (In Russian)

Shil'nikov D.S. *Konspekt flory Karachaevo-Cherkesii* [Flora abstract of the Karachay-Cherkess Republic], Stavropol, AGRUS Publ., 2010, 384 p. (In Russian)

Sladkov A.N. *Vvedenie v sporovo-pyl'tsevoi analiz* [Introduction to pollen analysis], Moscow, Nauka Publ., 1967, 275 p. (In Russian)

Vronskiy V.A. *Marinopalinologiya yuzhnykh morey* [Marine-palynology of the southern seas], Rostov-on-Don, Rostov University Publ., 1976, 200 p. (In Russian)

Received 04.04.2023
Revised 14.08.2023
Accepted 06.10.2023

ЭВОЛЮЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

УДК 551.79

ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В ПРЕДДЕЛЬТОВОМ РАЙОНЕ СЕВЕРНОГО КАСПИЯ В ГОЛОЦЕНЕ

Е.И. Лысенко[1], А.А. Ткач[2], Р.Р. Макшаев[3], Т.А. Янина[4], М.А. Зенина[5]

[1, 4] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии*
[2–4] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена*
[4] *Санкт-Петербургский государственный университет, лаборатория макроэкологии и биогеографии беспозвоночных*
[5] *Институт океанологии РАН, лаборатория палеоокеанологии*

[1] *Аспирант; e-mail: lenobl1996@gmail.com*
[2] *Мл. науч. сотр.; e-mail: alinaberdnikowa@yandex.ru*
[3] *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: radikm1986@mail.ru*
[4] *Проф., зав. лабораторией, д-р геогр. наук; e-mail: paleo@inbox.ru*
[5] *Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: maria_zenina@mail.ru*

Палеоэкологические условия в преддельтовом районе Северного Каспия реконструированы на основе результатов комплексного изучения керна скважины на структуре Рыбачья, вскрывшей голоценовые осадки. Выполнены геохимический, гранулометрический, малакофаунистический, диатомовый и микрофаунистический (остракоды) анализы, проведено радиоуглеродное датирование. В строении осадочной толщи отражены разномасштабные палеогеографические события, включающие заложение палеовреза в нижнехвалынских отложениях, сопровождаемое размывом верхнехвалынских отложений, его развитие в условиях мангышлакской регрессии и последовательное заполнение в ходе голоценовой новокаспийской трансгрессии, протекавшей стадиально. Голоценовый возраст отложений, заполняющих палеопонижение, подтвержден радиоуглеродными датами – 8070 ± 110 и 7020 ± 140 кал. л. н. Палеонтологические данные свидетельствуют о чередовании спокойного и динамичного водного режимов и квазицикличность смены условий в бассейне от солоноватоводных к пресноводным до морских на этапе осадконакопления, соответствующем современным условиям на шельфе Северного Каспия.

Ключевые слова: новокаспийские отложения, мангышлакская регрессия, биостратиграфия, диатомеи, малакофауна, остракоды, геохимия

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.5

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена исследованию Северного Каспия – наиболее мелководной области Каспийского моря с средней глубиной около 5–6 м (рис. 1).

Дельта Волги – крупнейшая дельта в его акватории. Соленость современного Северного Каспия изменяется от 1–3‰ вблизи устья Волги до 11‰ в центральной части бассейна. Современный уровень моря расположен на отметке –28,7 м [КАСПКОМ, 2023]. Шельф Северного Каспия представляет собой пологонаклонную равнину, обращенную к юго-востоку, осложненную аккумулятивными формами (островами, банками) и участками палеодолин, которые формировались во время регрессивных этапов за счет эрозионной деятельности водотоков [Kostianoy, Kosarev, 2005].

Основной причиной изменений уровня Каспийского моря в позднем плейстоцене и голоцене считаются климатические колебания, однако данные о степени этих изменений противоречивы [Варущенко и др., 1987; Рычагов, 2011; Янина, 2013; Kislov et al., 2014]. Быстрые изменения глубины и площади водной поверхности моря особенно отражались на ходе эволюции природной среды мелководного Северного Каспия и прилегающего преддельтового пространства Волги. Высокие скорости осадконакопления и чуткая реакция дельты на перемещение береговой линии Каспия обусловили интерес к этой территории с палеогеографической точки зрения.

Поздний плейстоцен и голоцен в Прикаспийском регионе представлены хвалынским и новока-

спийским ярусами соответственно [Свиточ, Янина, 1997]. Хвалынский трансгрессивный этап включает в себя нижний и верхний горизонты. Среди голоценовых событий Северного Каспия выделяют мангышлакскую регрессивную и новокаспийскую трансгрессивную эпохи. Во время мангышлакской регрессии уровень моря опускался до отметки –80 м, отложения этого времени заполняют речные врезы в толще хвалынских отложений и замкнутые палеопонижения – реликты рельефа палеодельт [Безроздных и др., 2014, 2018].

Голоценовые осадки дельты и шельфа Северного Каспия изучены с использованием разнообразных геолого-геоморфологических и палеогеографических методов [Свиточ, Янина, 1997; Болиховская, 2011; Чеховская и др., 2018]. В то же время некоторые палеогеографические аспекты развития природной среды северокаспийского региона остаются дискуссионными, что связано с разными оценками возраста [Варущенко и др., 1987; Рычагов, 1997; Bezrodnykh, Sorokin, 2016] и амплитуды колебаний уровня Каспия в голоцене.

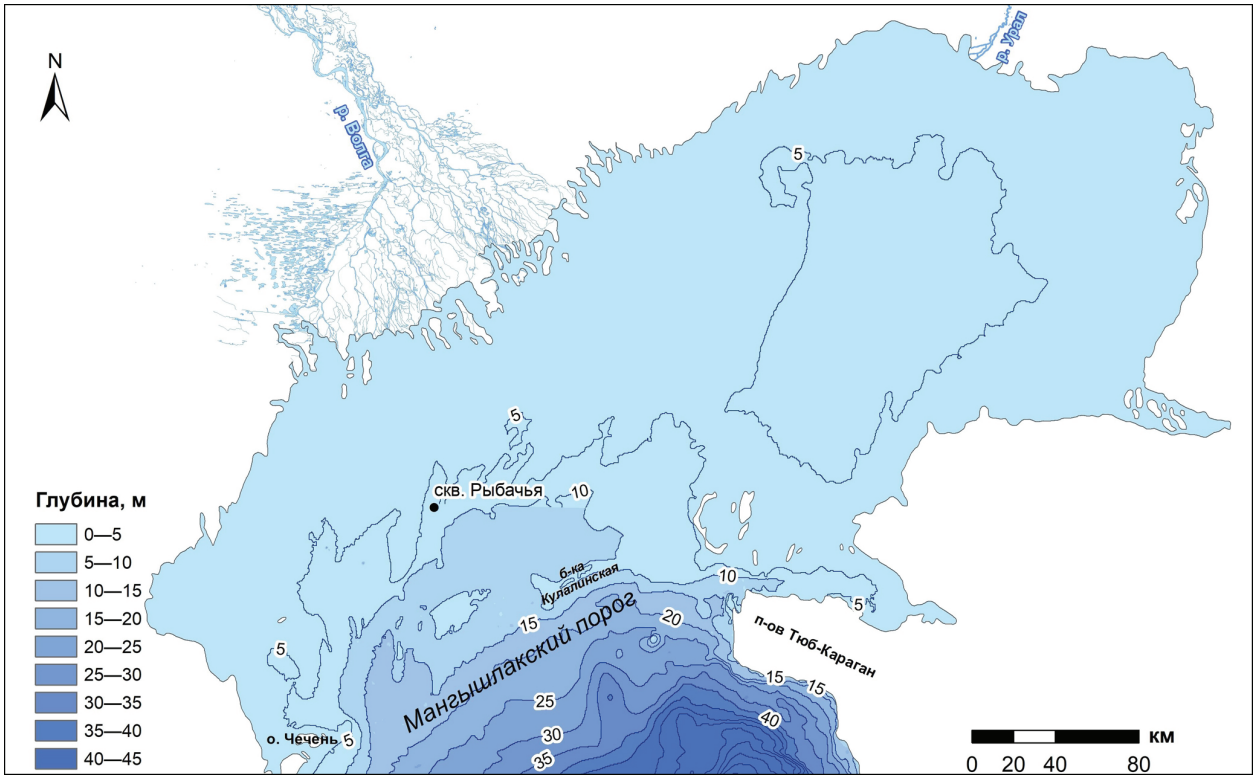


Рис. 1. Северный Каспий и местоположение скважины Рыбачья

Fig. 1. The North Caspian and the location of the Rybachya core

Для изучения нами выбран участок предельтового пространства Волги на шельфе Северного Каспия, так как в его отложениях могут быть детально запечатлены голоценовые трансгрессивно-регрессивные события Каспия. Такие палеонтологические группы, как фауна моллюсков, остракод и диатомовые водоросли, являются надежными индикаторами изменения гидрологических условий, отражающих глобальные и региональные события, поэтапно прослеживаемые в этой работе. Геохимический анализ, совмещенный с гранулометрическим, также позволяет реконструировать динамику водной среды и изменения источников сноса в ходе формирования отложений.

Цель работы – реконструкции палеоэкологических условий в преддельтовом районе Северного Каспия на основе комплексного анализа керна скважины, пробуренной на нефтеносной структуре Рыбачья (см. рис. 1). Структура Рыбачья в тектоническом отношении является частью Южно-Ракушечного вала [Дорофеев и др., 2015]. Основной интерес для исследователей представляют меловые отложения этой структуры, с которыми связаны месторождения нефти и газа (месторождение Рыбачье). Данных о строении четвертичных отложений в пределах этой структуры в открытых источниках не обнаружено. В этой работе мы приводим информацию о позднечетвертичных отложениях в пределах структуры Рыбачья и результаты их комплексного анализа.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использован буровой материал из скважины Рыбачья, пробуренной в пределах одноименной структуры на шельфе Северного Каспия на глубине моря 8 м. Керн скважины получен в ходе инженерно-геологических исследований ООО «Моринжгеология» в пределах акватории лицензионного участка «Северо-Каспийская площадь». Выделенная по литологическим признакам часть керна, содержащая четвертичные отложения, любезно предоставлена сотрудниками ООО «Моринжгеология» и хранится в НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова с целью его комплексного изучения. Общая длина керна составляет 9,5 м.

На рисунке 2 представлено литологическое описание керна.

Изучение керна выполнено гранулометрическим, геохимическим, малакофаунистическим, микрофаунистическим (остракоды) и диатомовым методами. Образцы для анализов отобраны из каждого литологического слоя вдоль всего керна. Наше исследование сосредоточено на изучении голоценовых событий. Более частый отбор образцов проведен для интервала с пестрым литологическим составом, характеризующим изменчивую среду осадконакопления, характерную для новокаспийского бассейна и, вероятно, отвечающую голоценовому времени. Монотонные песчаные толщи в основании разреза исследованы в основном с целью установления стратиграфического положения подробно изученных вышележащих осадков. Толща в основании керна опробована реже ввиду малой литологической изменчивости и утери некоторых объемов материала при бурении (см. рис. 2).

Гранулометрический анализ проведен для девяти образцов с помощью лазерного измерителя частиц FritschAnalysette 22. Все образцы (массой по 10–15 г каждый) были высушены в сушильной печи при температуре 50°C в течение трех часов и затем последовательно обработаны 10%-ми растворами соляной кислоты (HCl) и перекиси водорода (H_2O_2) для удаления карбонатов и органических веществ. Измерение образцов проводилось в интервале размерности от 0,8 до 2000 мкм. Гранулометрическая классификация приведена на основе работы Н.А. Качинского [1965] со следующими размерностями: <1 мкм (глины); 1–5 мкм (мелкие алевриты); 5–10 мкм (средние алевриты); 10–50 мкм (крупные алевриты); 50–250 мкм (мелкозернистые пески) и 250–1000 мкм (средние и крупнозернистые пески). Более крупные фракции в изученных образцах не обнаружены. Для образца из интервала 2,99–3,54 м представлены результаты гранулометрического анализа фракции, оставшейся после растворения карбонатного матрикса.

Геохимические исследования проведены для образцов из тех же интервалов, что и гранулометрический анализ, с использованием энерго-дисперсионного анализатора Olympus Delta Professional (EDXRF) в режиме программы «геохимия». Образцы были предварительно высушены в сушильной печи при температуре 50°C в течение шести часов и после измельчены с помощью фарфоровой ступки. Содержание элементов в каждом образце рассчитано в процентах (%). Ведущими геохимическими индикаторами для выявления и корреляции каспийских морских отложений с региональной стратиграфией являются изменения доли Fe, Al, Si, Ti [Лобачева и др., 2021]. Основными источниками терригенного материала для Северного Каспия являются плейстоценовые морены, богатые Fe и Al, расположенные в верховьях Волжского бассейна [Судакова и др., 1995]. Поэтому в ходе анализа основное внимание уделялось распределению следующих элементов: Si, Ca, Sr, Fe и Ti.

Малакофаунистический анализ выполнен по 14 образцам, содержащим 960 раковин (и их обломков) моллюсков. Анализ включал таксономическую идентификацию и исследование сохранности раковин. Ископаемые раковины были исследованы на наличие признаков растворения, истирания, изменения окраски и фрагментации. Находки раковин в двух створках указывали на их нахождение in situ. Для реконструкции голоценовых условий среды в Северном Каспии использованы данные об экологии таксонов. Виды рода Didacna Eichwald являются руководящими для Каспийского моря [Янина, 2005].

Образцы для диатомового анализа отобраны из всех литологических слоев, всего проанализировано 13 образцов. Пробы были высушены на воздухе, а затем обработаны стандартными методами [Smol et al., 2001]. Из глинистых и суглинистых литологических разностей отобрано около 5 г сухого материала, из песчаных – 20 г. Для удаления органических веществ и карбонатов каждую пробу помещали в термостойкий стакан и кипятили в 400 мл 10% перекиси водорода (H_2O_2) в течение 1,5 ч. После термической обработки пробы были залиты дистиллированной водой до 900 мл и оставлены под вытяжкой на 48 ч. Далее весь песчаный материал и частицы глинистой фракции постепенно удалялись отмучиванием. Для приготовления временных препаратов использовалась пипетка объемом 1 мл: суспензия, содержащая диатомовые водоросли, с помощью пипетки помещалась на обезжиренное сухое покровное стекло и далее высушивалась при комнатной температуре на горизонтальной поверхности. Для создания постоянных препаратов покровные стекла

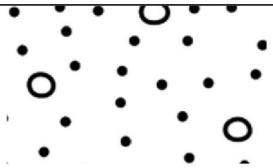
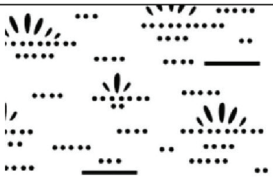
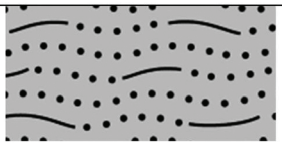
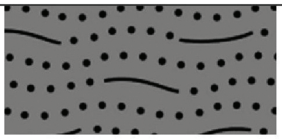
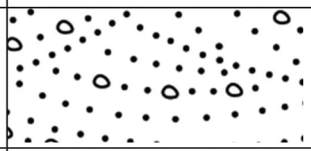
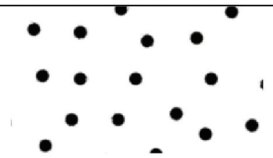
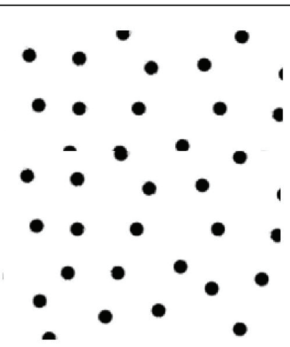
Интервал, м	Условные обозначения	№ слоя	Литологическое описание
0,30–0,0		7	Песок мелкозернистый бежевато-серый, пылеватый, с обилием раковинного детрита и включениями целых раковин моллюсков, граница с нижележащим слоем четкая, резкая
0,80–0,30		6	Алеврит красновато-коричневый, с глинистыми прослоями и пятнами ожелезнения, обогащенный растительными остатками
1,20–0,80			– (керн утерян)
2,07–1,20		5	Песок мелкозернистый, пылеватый, коричневато-серый, с включениями мелких раковин моллюсков и раковинного детрита, переход к нижележащему слою постепенный
2,57–2,07		4	Алеврит темно-коричневый, с прослоями мелкозернистого песка, с включениями мелких раковин моллюсков и раковинного детрита
2,57–3,00		3	Алеврит темно-коричневый, без видимых включений
3,13–3,00			–
3,13–3,54		2	Песок беловато-серый, карбонатный, с редкими включениями мелких обломков раковин моллюсков
3,70–3,54			–
4,10–3,70		1	Песок мелкозернистый, пылеватый, бежевый, без видимых включений
4,30–4,10			–
5,70–4,30		1	Песок мелкозернистый, пылеватый (аналогичный вышележащему слою)
6,30–5,70			–
8,00–6,30		1	Песок мелкозернистый, пылеватый (аналогичный вышележащему слою)
9,20–8,00			–
9,50–9,20		1	Песок мелкозернистый, пылеватый, бежевый, с редкими включениями мелких обломков раковин

Рис. 2. Литологическое описание керна скважины Рыбачья

Fig. 2. Lithologic description of the Rybachya core

фиксировались на предметных стеклах с помощью синтетической смолы Naphrax с показателем преломления 1,68. Таксономическое определение диатомей на основе изучения структуры их створок в постоянных препаратах произведено с помощью светового микроскопа JENAVAL (Carl Zeiss) с масляным иммерсионным объективом при увеличении в 1000 раз. Для определения видовой принадлежности диатомей использован ряд определителей [Куликовский и др., 2016; Hartley et al., 1996]. Контроль актуальности названий таксонов проводился с помощью электронной базы данных [AlgaeBase, 2020].

Для целей микрофаунистического анализа 13 образцов были подготовлены по стандартным методикам [Ivanova et al., 2015]. Образцы предварительно замачивались в течение часа, а затем промывались через сито с размером ячейки 63 мкм. Оставшаяся фракция высушивалась на воздухе, после чего материал из фракций размерностью 0,1–2 и 0,063–0,1 мм исследовался с помощью бинокулярного микроскопа. Створки остракод по возможности идентифицированы до вида. Подготовленные образцы остракод хранятся в камерах Кранца.

Биостратиграфические зоны выявлены на основе качественных и количественных изменений ископаемых фоссилий, наблюдаемых в керне. Для установления указанных зон использовалась информация о таксономическом разнообразии, доминирующих видах, концентрации створок (параметр рассчитан только для диатомей, млн створок/г сухого вещества) и экологических характеристиках видов. Установленные нами биостратиграфические зоны являются экологическими зонами или экозонами.

По двум образцам (интервалы 1,73–1,96 и 2,07–2,11 м) выполнено радиоуглеродное датирование в лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана СПбГУ (лабораторный индекс ЛУ) сцинтилляционным методом. В качестве материала для датирования использованы раковины моллюсков Monodacna caspia и Dreissena polymorpha. Для калибровки радиоуглеродных дат в календарный возраст (±2σ) использовались программа OxCal 4.4.4 и шкала IntCal20.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты гранулометрического анализа. В отложениях скважины Рыбачья на основе распределения гранулометрических показателей выделено пять групп образцов (рис. 3).

Первая группа приурочена к основанию скважины и включает образцы из интервалов 9,40–9,50, 6,3–6,40 и 4,20–4,40 м. Для этой группы характерно бимодальное распределение размерностей частиц. Преобладают мелкозернистые пески (60–70%), в то время как размерности алеврита в среднем не превышают значений 11–13%. Кумулятивные кривые и график распределения размерности частиц для указанных образцов практически совпадают. Это говорит о формировании осадков в схожих высокоэнергетических средах (например, деятельность волн) с дополнительным источником мелкого алеврита.

Вторая группа представлена образцами из интервалов 2,99–3,54 и 2,23–2,37 м. Для нее характерно бимодальное распределение с преобладанием более тонких размерностей: крупного алеврита (48%), среднего алеврита (15%) и мелкого алеврита (10%). Следовательно, осадки этой группы формировались в водоеме с более спокойным режимом, чем отложения в основании скважины. Для образца 2,99–3,54 м важно учитывать, что карбонатный матрикс, составляющий большую часть объема материала, был растворен в ходе подготовки проб.

В третью группу объединены образцы из интервалов 2,15–2,20 и 1,73–1,96 м, которые, наряду с образцами первой группы из основания скважины, содержат значительное количество мелкозернистого песка. Доля мелкозернистых песков увеличивается вверх по разрезу от 48 до 67%. Пик мелкозернистого песка на кривой распределения частиц менее симметричный по сравнению с образцами первой группы из-за примеси крупного алеврита (до 24%). Вероятнее всего, условия осадконакопления соответствуют переходной обстановке от застойного водного режима к осадконакоплению в более высокодинамичной водной среде.

К четвертой группе отнесен один образец из интервала 0,30–0,80 м, так как его график распределения частиц резко отличается от остальных образцов. Он характеризуется бимодальным распределением с двумя пиками, близкими по размерности частиц: крупный алеврит (40%) и мелкий алеврит (31%). Содержание среднего алеврита не превышает 15%. Также для этого интервала характерна наибольшая доля глинистой фракции – 10%. Таким образом, можно с уверенностью реконструировать застойную водную обстановку осадконакопления.

Пятая группа также представлена одним образцом из интервала 0,20–0,30 м и в целом сопоставима со второй группой по преобладанию мелкозернистых песков (83%), свидетельствующих о высокоэнергетической обстановке. Однако в этом интервале встречаются также средне- и крупнозернистые пески (до 16% в сумме), в то время как фракции мелкого алеврита и глин практически отсутствуют (0,6 и 0,2%) соответственно. Это говорит о лучшей сортировке осадка, которая может являться результатом более интенсивного воздействия волн, чем в обстановке первой группы, выделенной в основании скважины.

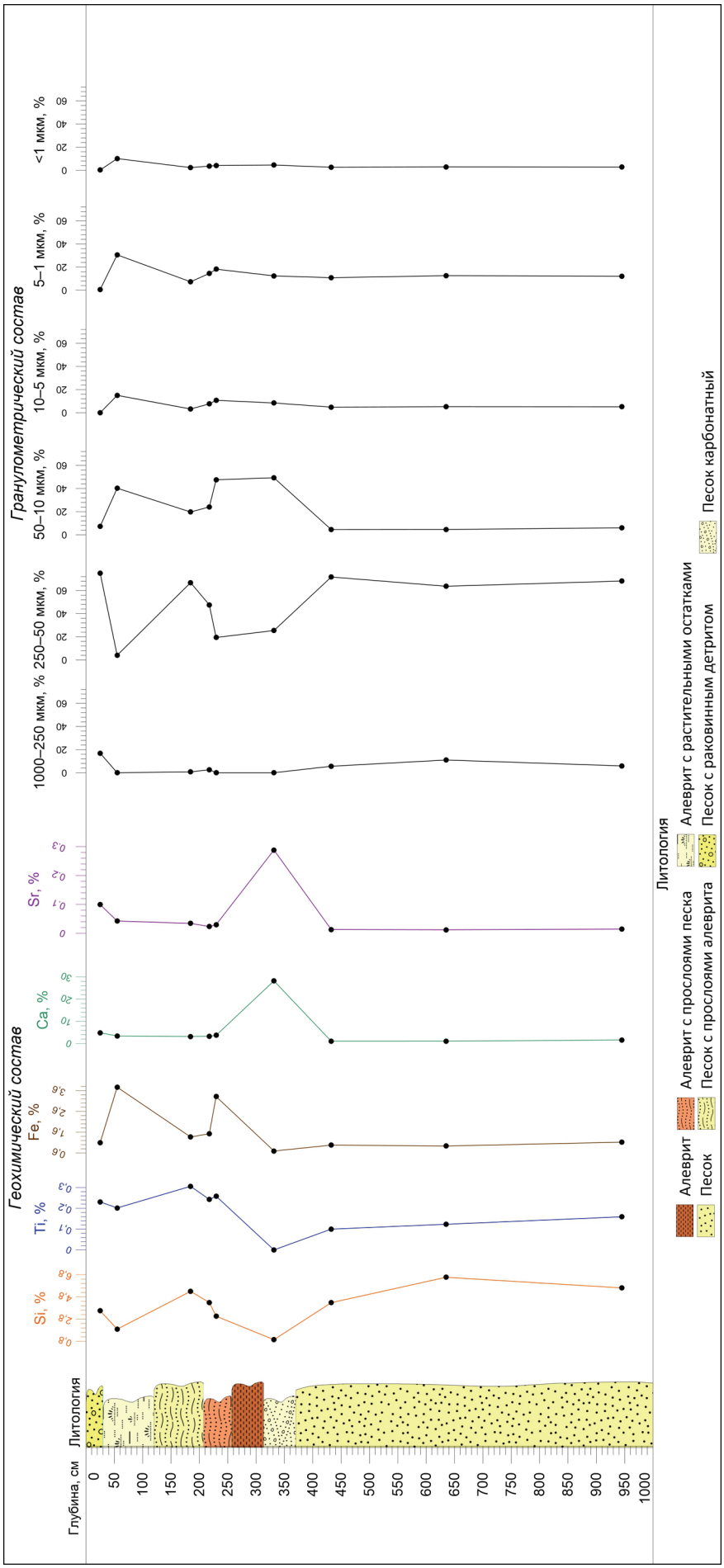


Рис. 3. Результаты геохимического и гранулометрического анализов отложений из скважины Рыбачья

Fig. 3. Results from geochemical and grain size analyses of the sediments from the Rybachya core

Результаты геохимического анализа. Полученные содержания элементов Si, Ca, Sr, Fe и Ti представлены на рисунке 2. В геохимическом составе образцов керна преобладают элементы Si, Fe и Ca. Для стратиграфии позднего плейстоцена и голоцена Прикаспийского региона также важно учитывать совместное распределение Fe, Al и Ti. Согласно ряду исследований [Лобачева и др., 2021], повышенное содержание Fe, Al и Ti характерно для нижнехвалынских отложений, особенно если оно наблюдается в глинистых и алевритовых фракциях. По обобщенным данным бурения в Дербентской и Южно-Каспийской котловинах, в голоценовых отложениях концентрация Fe варьирует в пределах 0,9–5,07% [Kozina et al., 2022]. В изученной скважине наблюдаются повышенные содержания Fe и Ti: концентрация Fe составляет от 1,1 до 3,79%; для Ti – от 0,23 до 0,31%. Кроме того, повышение концентрации Fe тяготеет к интервалам с преобладанием (более 80%) алевритовых и глинистых фракций: 2,23–2,37 и 0,30–0,80 м. Эти факты в совокупности могут свидетельствовать о раннехвалынском возрасте отложений. Для нижней части скважины, представленной преимущественно мелкозернистыми песками, характерно повышение содержания Si, что может быть связано с интенсивным терригенным стоком. Резкое повышение концентрации Ca (до ~28%) наблюдается в карбонатных песках в интервале 2,99–3,54 м.

Результаты малакофаунистического анализа. Малакофауна в осадках керна представлена немногочисленными (16) видами, предпочитающими бассейны, характеризующиеся разным гидрологическим и гидрохимическим режимом (рис. 4).

Руководящие для биостратиграфического расчленения осадков виды рода *Didacna* Eichwald (за исключением одного неопределимого обломка) отсутствуют. Образцы из нижней песчаной толщи (ниже 3,70 м) не содержат раковин моллюсков. Встречается лишь единичный неопределимый детрит. В осадках залегающего выше слоя (образец из интервала 3,50–3,13 м) преобладают *Theodoxus pallasi*, сравнительно редки *Dreissena polymorpha* и *Lymnaea stagnalis*. Малакофаунистическое сообщество включает представителей пресноводной фауны, приспособившейся к обитанию в опресненных каспийских водах (*T. pallasi* и *D. polymorpha*), и озерный вид *L. stagnalis*.

В образце из интервала 2,34–2,25 м многочисленны *Monodacna caspia* и *D. polymorpha*, встречаются *Dreissena caspia*, *Clessiniola variabil*s, *Unio* sp. (мелкие обломки), *Viviparus* sp. (обломки), *Valvata piscinalis*. Малакофаунистическое сообщество представляет собой смесь каспийских слабосолоноватоводных и пресноводных видов.

В интервале 2,27–2,23 м содержатся очень редкие раковины *Bithynia tentaculata*, *C. variabilis*, мелкие обломки раковин *Unio*. Сообщество также охарактеризовано каспийскими слабосолоноватоводными и пресноводными видами. В интервале 2,20–2,16 м раковинный материал редкий. Это представители каспийских слабосолоноватоводных и пресноводных видов *Monodacna caspia*, *Clessiniola variabilis*, *Dreissena polymorpha*, *Unio* sp. (мелкие обломки) и *Planorbis* sp. (обломок). Образец из интервала 2,22–2,14 м включает многочисленные раковины *D. polymorpha*, единичные *C. variabilis*, *Lymnaea stagnalis*, *M. caspia*, обломок *Valvata* sp. Сообщество представлено пресноводными и слабосолоноватоводными видами с преобладанием пресноводных; один вид (*L. stagnalis*) лимнофильный.

В интервале 2,11–2,07 м содержатся редкие целые и мелкие обломки раковин *Dreissena polymorpha*, *Hypanis plicata*, *Valvata piscinalis*, *Clessiniola variabilis*, *Unio* sp., *Valvata* sp., *Planorbis* sp. Преобладают пресноводные виды. Интервал 1,96–1,73 м охарактеризован *Viviparus viviparus*, *V. piscinalis*, *Planorbis planorbis*, *Unio* sp. (обломок), *D. polymorpha*, *Dreissena caspia*, *Monodacna caspia*, *C. variabilis*, *Theodoxus pallasi*, *Abescunia bruciana*. В малакофаунистическом сообществе преобладают пресноводные виды, в примеси – каспийские виды, приспособившиеся к обитанию в значительно опресненных водах. В интервале 0,80–0,30 м содержится лишь единичный неопределимый детрит. Осадки интервала 0,30–0,20 м включают *M. caspia* (раковины вида преобладают), *Monodacna angusticostata* (многочисленные), *D. caspia* (многочисленные), редкие раковины *Hypanis plicata*, *Bithynia tentaculata*, *T. pallasi*, *Adacna vitrea*, *C. variabilis*, *Didacna* sp. (мелкие обломки). В сообществе господствуют каспийские слабосолоноватоводные виды.

В составе малакофауны из изученных образцов керна по экологической принадлежности установленных сообществ выделяются четыре комплекса: 1) комплекс в интервале 3,54–3,13 м, отвечающий опресненным каспийским условиям со значительным влиянием пресных вод. Присутствие лимнофильного вида *Lymnaea stagnalis* позволяет предположить озерный, значительно опресненный дельтовый водоем в условиях снижения уровня моря; 2) комплекс в интервале 2,34–2,14 м, представленный смесью каспийских слабосолоноватоводных и пресноводных видов. Внутри выделенного интервала в составе комплекса наблюдаются незначительные колебания в сторону увеличения или уменьшения количества пресноводных видов, отражающих незначительную внутреннюю динамику бассейна; 3) комплекс в интервале 2,11–1,73 м, он отличается преобладанием пресноводных видов, в примеси каспийские виды, приспособившиеся к обитанию в значительно опресненных водах; 4) комплекс в интервале 0,30–0,20 м, характеризующийся преобладанием каспийских слабосолоноватоводных видов, является характерным для современного Северного Каспия.

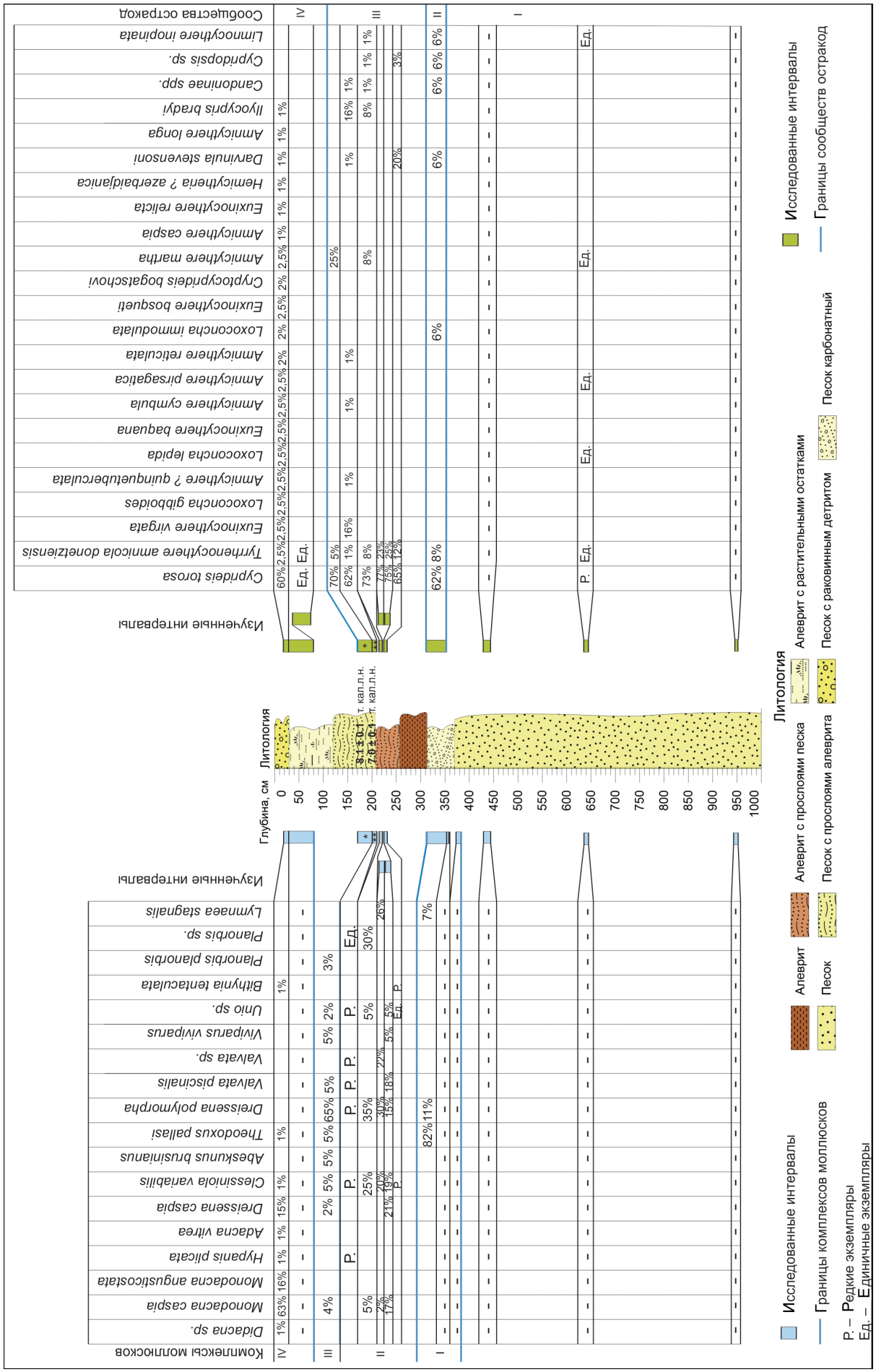


Рис. 4. Результаты малакофаунистического и микрофаунистического анализов отложений из скважины Рыбачья

Fig. 4. Results from mollusk fauna and microfauna analyses of the sediments from the Rybachya core

Результаты диатомового анализа. По результатам диатомового анализа в осадках керна выявлено 95 видов диатомей, подавляющее большинство из них относятся к пресноводным, реже – пресноводно-солоноватоводным. Типично морские виды обнаружены в верхней части керна. На основе данных о таксономическом разнообразии, преобладающих видах, концентрации створок диатомовых водорослей (млн створок/г сухого вещества) и экологических предпочтениях видов в разрезе было выявлено пять диатомовых зон (ДЗ, рис. 5). Для каждой зоны реконструированы условия осадконакопления, которые представлены как пресноводными обстановками мелких заливов и дельтовых проток, так и лагунными и морскими обстановками. Диатомовые зоны очень сильно отличаются по параметру концентрации створок диатомей, значение которого изменяется по разрезу от 0,34 до 25,2 млн ств./г. Ниже 3,90 м диатомеи в образцах не обнаружены.

ДЗ I (3,90–3,80 м) выделена в верхней части толщи песков, за исключением которой эти пески совершенно лишены диатомей. Зона выделена на основе присутствия единичных створок пресноводных видов: *Fragilaria capucina*, *Aulacoseira granulata*, *Coccconeis placentula*, *Stephanocyclus meneghinianus*, *Stephanodiscus astraea var. intermedia*, *Synedra capitata*. Количество обнаруженных экземпляров диатомей не позволяет произвести корректный расчет концентрации створок. Малое количество обнаруженных экземпляров диатомей может свидетельствовать об интенсивном осадконакоплении, препятствующем формированию тафоценозов.

ДЗ II (3,50–2,99 м) выделена в толще алевритов на основе высокой доли бентосных и перифитонных видов, которая увеличивается вверх по разрезу от 85 до 100%, и относительно высокой концентрации створок диатомей, увеличивающейся по мере осадконакопления от 1,8 до 13,2 млн ств./г. Нижняя часть интервала характеризуется наибольшим видовым разнообразием среди всех изученных образцов (40 таксонов) и преобладанием пресноводных бентосных алкалифильных видов *Amphora copulata* (16%), *F. capucina* (8%) и *Gomphonella olivacea* (8%) и присутствием планктонных диатомей *Aulacoseira granulata* (7%), *Aulacoseira italica* (2,5%). Выше по разрезу резко увеличивается доля перифитонных видов рода *Epithemia* (до 60%), среди которых нередко встречаются частично растворенные створки. Перечисленные таксоны и их процентное соотношение позволяет предположить обстановку распресненной лагуны. Начало формирования осадка диатомовой зоны по составу диатомовых ассоциаций отвечает более проточным условиям с повышенной щелочностью вод. Судя по увеличению доли бентосных видов вверх по разрезу, водоем постепенно приобретал более спокойный гидродинамический режим. Большая доля растворенных створок диатомей рода *Epithemia*, увеличение содержания алкалифилов и алкалибионтов и уменьшение видового разнообразия диатомей (с 38 до 9 в верхнем горизонте) может говорить об увеличении pH среды (до щелочных значений) и уменьшении сохранности створок. Вероятнее всего, осадок формировался в сильно опресненной мелкой лагуне, на участке, удаленном от прибойной зоны.

ДЗ III (2,37–1,73 м) выделяется в толще алевритов, постепенно переходящих в мелкозернистый песок с примесью алеврита вверх по разрезу. Зона выявлена на основе иного состава доминирующих видов и наибольшей средней концентрации створок диатомей, которая изменяется от 1,0 до 25,2 млн ств./г. Состав преобладающих пресноводных диатомей в образцах этой диатомовой зоны соответствует авандельтовым комплексам (проток, ильменей): *Amphora copulata* (5–24%), *Stephanocyclus meneghinianus* (5–17%), *Aulacoseira granulata* (5–15%), *Aulacoseira italica* (5–6%), *Cocconeis lineata* (3–20%). На глубине 2,23–2,37 м доминирует ацидофильный бентосный вид *Navicula avenacea* (19%), что может свидетельствовать о застойных условиях и активных процессах разложения органики, способствующих формированию кислой среды. В этом же интервале наблюдается максимальная концентрация створок диатомей, что говорит о наиболее благоприятных условиях для их развития. Наибольшая доля планктонных видов зафиксирована в интервале 2,07–2,11 м (38,8% при средних значениях 14–18%), характеризует более проточную стадию развития пресного водоема. Формирование осадков этой диатомовой зоны происходило при некотором выдвижении дельты в результате регрессии Северного Каспия.

ДЗ IV (0,80–0,30 м) выделяется в толще алевритов с примесью глин и характеризуется преобладанием морского бентосного вида *Lyrella lyra* (43%), массовое присутствие которого обнаруживается только в этом интервале. Концентрация створок диатомей сократилась до 0,8 млн ств./г. Субдоминантом является бентосный индифферентный алкалифильный вид *Craticula cuspidata* (14%), около 7% створок приходится на бентосный солоноватоводный эвригалинный вид *Amphora commutata*. Также встречаются частично растворенные створки диатомей родов *Epithemia* и *Eunotia*. Судя по преобладанию створок бентосных диатомей и гранулометрическому составу осадка, его формирование происходило в мелком солоноватоводном водоеме с низкой гидродинамикой. Повышенное содержание створок алкалифильных диатомей и низкая сохранность некоторых створок может свидетельствовать о щелочной реакции вод.

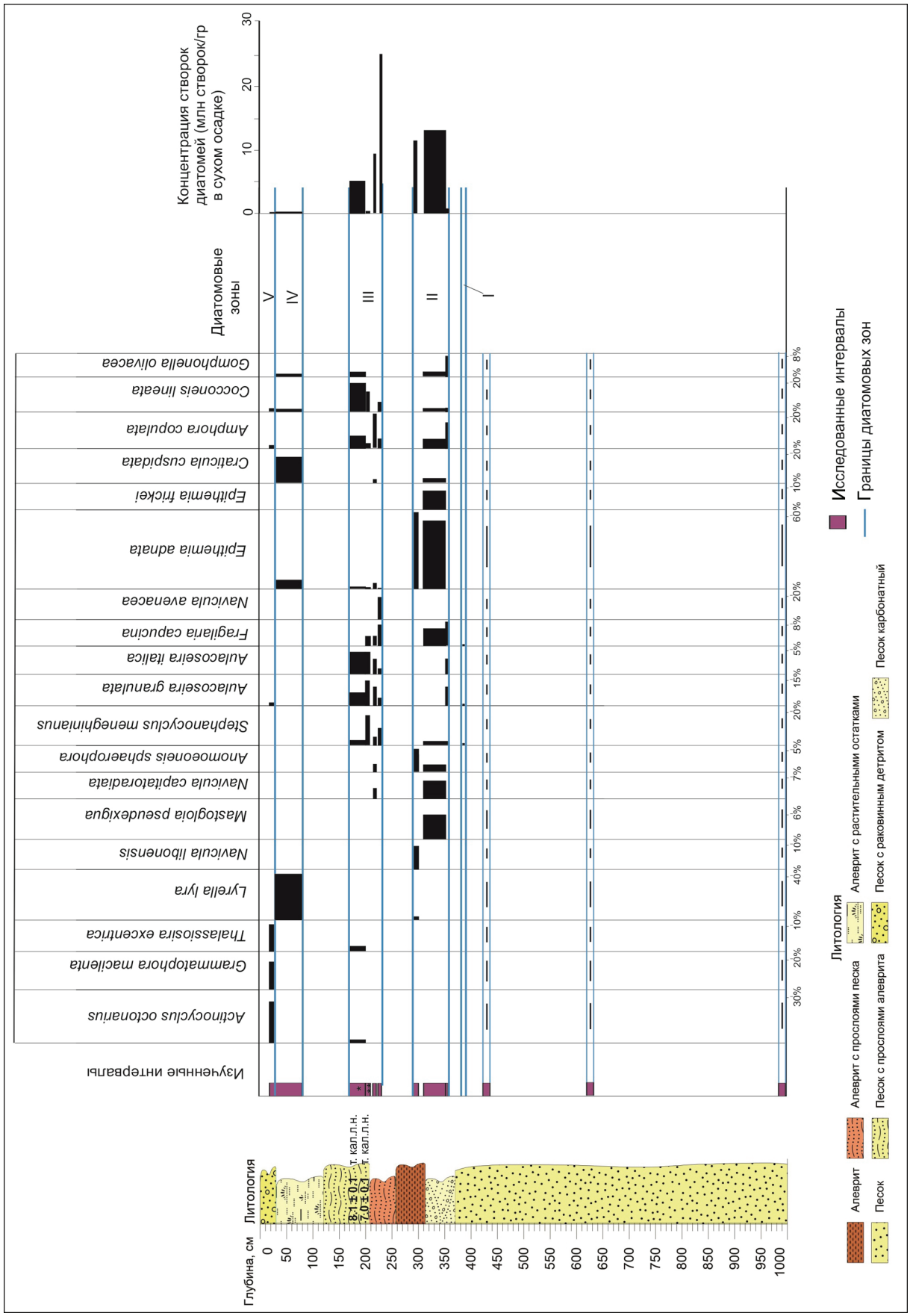


Рис. 5. Результаты диатомового анализа отложений из скважины Рыбачья. Показаны только преобладающие виды

Fig. 5. Results from diatom analysis of the sediments from the Rybachya core. Only dominant species shown

ДЗ V (0,30–0,20 м) выделяется в песке с раковинным детритом по наименьшей концентрации сворок (0,3 млн ств./г) и повышенному содержанию типичных для Каспия морских планктонных видов: *Actinocyclus octonarius* (30%, доминант) и его разновидность *Actinocyclus octonarius var. tenellus* (4%), *Thalassiosira eccentrica* (9%), *A. curvatulus* и *Coscinodiscus perforatus* (по 2%). Субдоминантом в данном интервале является морской бентосный вид Grammatophora macilenta (17%), приспособившийся к существованию в сильно опресненных водах Северного Каспия. Судя по преобладанию планктонных диатомей (56%) и экологическим предпочтениям преобладающих видов, осадконакопление происходило в солоноватоводно-морском бассейне с активной гидродинамикой.

Результаты микрофаунистического анализа. Суммарно в образцах керна скважины нами выявлено 23 вида остракод. По типу среды обитания их можно разделить на две основные группы – пресноводные (4 вида) и каспийские или солоноватоводные (19 видов). Ниже 6,4 м остракоды в образцах не обнаружены. Микрофаунистический состав остракод позволяет выделить четыре этапа смены сообществ, каждый из которых соотносится со сменой природных условий в течение голоцена.

Сообщество I описано на глубинах 6,40–6,30 м. Оно характеризуется преобладанием видов *Cyprideis torosa* и *Tyrrhenocythere amnicoladonetziensis*. В целом микрофаунистический состав напоминает современный состав Каспия, он формировался в морских условиях, однако соленость, вероятно, была ниже, чем в настоящее время. Сохранность остракод *Limnocythere inopinata* связана с высокой скоростью осадконакопления, высокой смертностью и/или хорошей сохранностью створок в условиях повышенных глубин. Следов переотложения не отмечается. Мы предполагаем, что накопление этой толщи происходило в трансгрессивную стадию Каспийского моря.

Вышележащее сообщество II описано в интервале 3,50–2,99 м и представлено комплексом с высоким содержанием пресноводных видов остракод. В указанном интервале встречается лишь два солоноватоводных вида, в целом же все обнаруженные виды остракод приспособлены к выживанию в широком температурном диапазоне и обитанию в мелководных опресненных водоемах. Такой комплекс типичен для прибрежных зарослей и небольших многолетних водоемов. *Cyprideis torosa* достигает здесь максимальной численности. Кроме того, здесь широко представлены ювенильные стадии этого вида. А. Дж. Смит и Дж. Х. Хорн [Smith, Horne, 2002] отмечают, что это может указывать на переходное состояние от морских к пресноводным условиям. Кроме того, на пресноводные условия явственно указывает присутствие многочисленных *Darvinula stevensoni*, вида толерантного к низкой солености и опреснению, а также *Candona* spp., современные формы которой являются обитателями опресненных водоемов. Мы предполагаем накопление рассмотренной толщи в условиях опресненного водоема застойного типа во время регрессивного состояния Каспийского моря.

Выше, на глубине 2,50 м, сообщество II сменяется сообществом III, которое в целом можно охарактеризовать как солоноватоводное с примесью пресноводных видов. Соленость, как и глубина бассейна, существовавшего в этом месте во время накопления толщи в интервале 1,73–2,50 м, были ниже, чем в современном Каспийском море. На фоне общего преобладания солоноватоводных видов отмечается периодическое повышение содержания раковин таких пресноводных видов остракод, как *Ilyocypris bradyi* и *D. stevensoni*. Такой состав микрофауны остракод может свидетельствовать о сложной внутренней динамике в ходе трансгрессивного этапа.

Сообщество IV описано по донным отложениям Каспийского моря в интервале глубин от 0,20 до 0,30 м. Оно представляет собой типичный для Северного Каспия современный микрофаунистический комплекс видов с преобладанием *C. torosa*, *Tyrrhenocythere amnicoladonetziensis*, более стеногалинных *Cryptocyprideis bogatschovi* (12,5–13,25‰), *Euxinocythere baquana* (11,5–13‰), *Amnicythere? quinquetuberculata* (11,5–13‰) и др. Редкие *I. bradyii*, *D. stevensoni* или *Amnicythere longa* и *Amnicythere cymbula*, в настоящее время распространенные в эстуариях Черного моря на глубинах до 5 м, указывают на значительное речное влияние и близость дельты Волги к району исследований.

Результаты радиоуглеродного датирования. Полученные даты соответствуют радиоуглеродным возрастам 7240 ± 110 л. н. в интервале глубин 1,73–1,96 м и 6140 ± 110 л. н. в интервале 2,07–2,11 м. Калиброванные с помощью кривой «IntCal 20» даты составляют 8070 ± 110 кал. л. н. и 7020 ± 140 кал. л. н. соответственно.

Как было указано выше, основные голоценовые события Северного Каспия – мангышлакская регрессия и новокаспийская трансгрессия. Относительно высокая теплообеспеченность и аридизация климата [Борисова, 2014] положили начало регрессивному тренду в Каспийском море в раннем голоцене. На осушенной территории шельфа развивалась эрозия, что привело к образованию палеодолин. Согласно сейсмоакустическим данным, мангышлакской регрессии соответствуют следующие формы рельефа дна Северного Каспия: врезанные речные долины и субширотные линейные впадины,

напоминающие ильмени современной дельты Волги [Безродных и др., 2017]. Как правило, мощность голоценовых отложений не превышает 2 м в пределах изучаемой территории [Безродных и др., 2017; Чеховская и др., 2018]. Наши данные по результатам изучения моллюсков, диатомовых водорослей и остракод позволили реконструировать условия среды, не типичные для морского шельфа. Это привело к предположению, согласно которому скважина Рыбачья была заложена в пределах палеопонижений, широко распространенных в Северном Каспии, которые описаны Ю.П. Безродных и В.М. Сорокиным [Bezrodnykh, Sorokin, 2016].

Сопоставив стратификацию керна по экозонам, гранулометрии и литологии, мы выделили пять этапов осадконакопления. Каждый этап включает экозоны со сходными условиями (рис. 6).

В отложениях начального этапа отмечается высокое содержание кремния, что может быть связано с дельтовыми и прибрежными фациями трансгрессивного этапа раннехвалынского бассейна. Геохимические маркеры (Fe и Ti) также подтверждают раннехвалынский возраст этих отложений. Гранулометрические данные свидетельствуют о высоко энергетической среде с дополнительным источником мелкого алеврита. Отсутствие раковин моллюсков подтверждает интенсивную гидродинамику среды осадконакопления. Низкая концентрация диатомей обусловлена высокой скоростью осадконакопления. Комплекс остракод указывает на существование бассейна с большими глубинами и более низкой соленостью, чем в современном Каспийском море, что соответствует характеристикам раннехвалынского бассейна. Эти выводы не оставляют сомнений в раннехвалынском возрасте отложений начального этапа осадконакопления.

Позднехвалынские отложения не выявлены нашими методами. Мы предполагаем, что отложения выше 3,7 м формировались в обстановках, нетипичных для морского бассейна. Позднехвалынские отложения могли быть размыты эрозионной деятельностью водотоков во время мангышлакской регрессии. В результате сформировалось палеопонижение, постепенно заполнявшееся осадками, обстановки которых реконструируются по биостратиграфии. Таким образом, голоценовые осадки накапливались в понижении поверх раннехвалынской толщи с размывом позднехвалынских отложений.

Выделено три голоценовых этапа заполнения палеопонижения, соответствующих трем событиям внутри новокаспийской трансгрессии, и один этап осадконакопления, схожий с современными обстановками Северного Каспия. По данным разных авторов, возраст начала новокаспийской трансгрессии оценивается в 10550 [Bezrodnykh, Sorokin, 2016] и 9500 кал. л. н. [Kakroodi et al., 2015], окончание первого этапа трансгрессии – около 5600 кал. л. н. [Безродных и др., 2018].

По нашим данным, отложения первого этапа осадконакопления древнее 8–7 кал. л. н. и формировались после мангышлакской регрессии. Наличие видов моллюсков, приспособленных к обитанию в опресненных каспийских водах, высокая численность пресноводных бентосных диатомей, а также присутствие пресноводных и эвригалинных видов остракод предполагают обстановки опресненного водоема озерного типа во время начальной стадии осадконакопления в палеопонижении. *Cyprideis torosa* достигает максимальной численности в условиях крайне изменчивой солености вод, характерной для перехода от морских условий к пресноводным. Современные формы *Candoninae* spp. считаются обитателями опресненных водоемов. Увеличение концентрации диатомовых водорослей предположительно является результатом повышения концентрации биогенных элементов при увеличении речного стока. Литологические характеристики осадка (карбонатные пески) указывают на мелководные условия. Повышенные концентрации Ca и Sr могут свидетельствовать как о повышении солености и температуры в Каспийском бассейне, так и об увеличении речного стока. По данным биостратиграфических методов, происходило увеличение стока рек, что привело к опреснению водоема.

Таким образом, за подъемом уровня моря (в рамках осцилляции) в раннем голоцене последовало его падение и изоляция палеопонижения, в результате чего на первом этапе осадконакопления реконструируются пресноводные обстановки. Иными словами, реконструированы отложения не максимума трансгрессии, а водоема, сформировавшегося при отступлении моря. Обособление палеопонижения сопровождалось процессом заполнения депрессии пресными водами. После перехода от морских условий к пресноводным спокойные обстановки небольшого многолетнего водоема способствовали накоплению карбонатов. Для участка в Северном Каспии вблизи скважины Рыбачья [Чеховская и др., 2018] были получены схожие результаты: сопоставимые отложения формировались в более мелководных и опресненных условиях, чем современные.

На втором этапе осадконакопления реконструировано повышение уровня Каспийского моря. Радиоуглеродные датировки около 8–7 кал. л. н. соответствуют ранненовокаспийскому времени. Гранулометрический состав демонстрирует смену алевритистых отложений, сформировавшихся в более застойных условиях, на мелкозернистые пески с примесью алеврита, что соответствует переходной обстановке осадконакопления от спокойного водного режима к более динамичному.

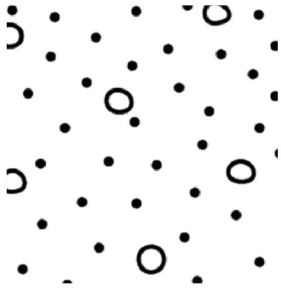
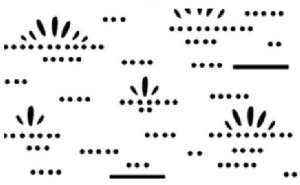
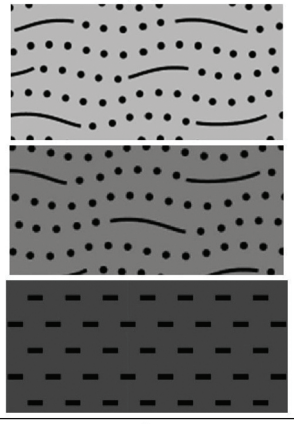
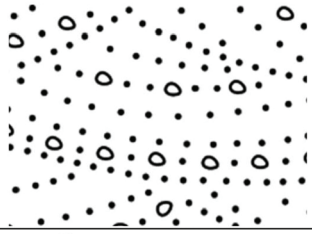
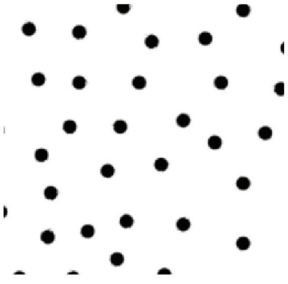
Этапы осадконакопления	№ литологического слоя, условное обозначение	Экозоны по биостратиграфии; № групп образцов по гранулометрии	Краткое описание этапа
Четвертый (0,30–0,00 м)	7 	(4) комплекс моллюсков, сообщество остракод IV, ДЗ V; 5-я группа	Заключительный этап новокаспийской трансгрессии. Условия, близкие к современным на шельфе Северного Каспия. Более глубокий и соленый бассейн, чем на третьем этапе, однако отмечается опресняющее влияние стока Волги. Высокоэнергетическая среда осадконакопления
Третий (0,80–0,30 м)	6 	ДЗ IV; 4-я группа	Относительная стабилизация уровня моря. Уровень моря и соленость ниже современного Северного Каспия. Обстановки солоноватоводной мелководной лагуны
Второй (2,99–1,20 м)	3, 4, 5 	(2) и (3) комплексы моллюсков, сообщество остракод III, ДЗ III; 2-я и 3-я группы	Повышение уровня моря, заполнение палеопонижения около 8070±110 кал. л.н. – 7020±140 кал. л.н. на фоне длительного потепления и увлажнения. Пресный или слегка солоноватоводный водоем (динамичность соленостных условий); в целом переход от более спокойных обстановок к более динамичным
Первый (3,54–2,99 м)	2 	(1) комплекс моллюсков, сообщество остракод II, ДЗ II; 2-я группа	Отступление моря во время осцилляции его уровня. Изоляция палеопонижения. Условия небольшого многолетнего пресного водоема; более мелководные и более пресные, чем условия на шельфе современного Северного Каспия
Размыв верхнехвалынских отложений во время мангышлакской регрессии, формирование палеопонижения			
Начальный (9,50–3,70 м)	1 	ДЗ I, сообщество остракод I; 1-я группа	Трансгрессионный этап раннехвалынского бассейна. Бассейн с большей глубиной и меньшей соленостью, чем современный Северный Каспий. Высокоэнергетическая среда осадконакопления, прибрежные фации

Рис. 6. Этапы осадконакопления, реконструированные в скважине Рыбачья

Fig. 6. Stages of sedimentation reconstructed in the sediments from the Rybachya core

Комплекс моллюсков содержит обилие солоноватоводных и пресноводных видов. Присутствие солоноватоводных остракод с примесью пресноводных видов и относительно высокая доля солоноватоводных диатомей свидетельствуют о сложной внутренней гидродинамике во время трансгрессивной стадии Каспия. Похожая динамика ранее реконструирована в близлежащем районе [Чеховская и др., 2018]. На основе геохимических маркеров пресноводные сообщества в алевритистых отложениях с высокими значениями Fe и Ti могут быть интерпретированы как позднехвалынские. Однако высокая концентрация Fe и Ti в отложениях второго этапа осадконакопления связана с унаследованностью геохимического состава размытых верхнехвалынских отложений.

По литературным данным, заполнение палеопонижений в Северном Каспии происходило в интервале от 11500 до 8000 кал. л. н. [Безроздных и др., 2014]. Радиоуглеродные даты, полученные нами, моложе ранее опубликованных. Мы предполагаем более длительный процесс заполнения палеопонижений, начавшийся одновременно с потеплением и увлажнением климата Каспийского региона в период с 8500 до 7600 кал. л. н., выявленным Н.С. Болиховской [2011] на основе палинологических данных.

В керне скважины нам не удалось выявить регрессивные события, разделявшие этапы новокаспийской трансгрессии. Следовательно, нам не удалось подтвердить или опровергнуть взаимосвязь активизации эрозионных процессов с регрессивными этапами Каспия в новокаспийское время. Тем не менее мы предполагаем, что наблюдаемые нами изменения комплексов фауны моллюсков, остракод и диатомей в интервале 0,00–3,54 м характеризуют колебания уровня моря в новокаспийское время, датируемые 5600–3700 и 3080–2300 кал. л. н. [Безродных и др., 2018].

Ввиду отсутствия фаунистических остатков, третий этап осадконакопления охарактеризован только диатомовым анализом. Этот этап характеризуется преобладанием бентосных видов диатомей, что в комплексе с высокой долей алкалифильных и солоноватоводных видов свидетельствует о застойной среде осадконакопления, соответствующей солоноватоводной лагуне. Резкая граница слоя с нижележащим интерпретирована как перерыв в осадконакоплении. Результаты гранулометрического анализа указывают на обстановки бассейна лагунного типа с низкой гидродинамикой. Повышенная доля Fe, тяготеющая к отложениям третьего этапа и характерная для верхнехвалынских толщ, в данном случае связана с лагунными условиями осадконакопления.

Четвертый этап осадконакопления соответствует современной обстановке на шельфе Северного Каспия. Для этого интервала также характерны сравнительно высокие содержания Fe и Ti. В комплексе моллюсков преобладают каспийские слабосолоноватоводные таксоны, характерные для современного Северного Каспия. Сообщество остракод указывает на условия мелководья и содержит многочисленные эвригалинные виды, устойчивые к пониженной солености, отражающие влияние стока реки Волги в этом районе. Появление типичных морских планктонных видов в комплексе диатомей отражает влияние подъема уровня моря и соответствует наиболее поздней трансгрессивной стадии Каспийского моря, следующей за регрессивным событием после 2300 кал. л. н. [Безродных и др., 2018]. В другой работе [Чеховская и др., 2018] условия осадконакопления во время этого этапа трансгрессии в близлежащем районе описываются как достаточно стабильные, близкие к современным по глубине моря и солености.

ВЫВОДЫ

Палеоэкологические данные, основанные на изучении малакофауны, диатомовых водорослей и остракод, геохимических и гранулометрических данных, позволяют сделать вывод о том, что керн скважины Рыбачья запечатлел изменения условий природной среды в палеопонижении в Северном Каспии, заполнение которого описано на основе комплексного анализа [Berdnikova et al., 2023].

Разнообразие изучаемых групп ископаемых способствует поэтапным палеореконструкциям условий осадконакопления отложений.

В керне содержатся отложения, начиная с нижнехвалынских. Эрозионная деятельность водотоков во время мангышлакской регрессии сформировала в них понижение и способствовала его углублению, что привело к размыву позднехвалынских отложений и врезанию в нижнехвалынские осадки.

По совокупности всех приведенных результатов в отложениях скважины выделяются три голоценовых этапа заполнения палеопонижения, соответствующие трем событиям внутри новокаспийской трансгрессии, а также один этап осадконакопления, схожий с современными обстановками Северного Каспия и, вероятно, соответствующий заключительной трансгрессивной стадии Каспийского моря.

Биостратиграфические данные указывают на квазициклическую изменчивость обстановок осадконакопления по всему керну. Условия голоценового осадконакопления изменяются от изолированного пресноводного бассейна во время регрессивного эпизода новокаспийской эпохи к пресноводным-солоноватоводным условиям динамичного бассейна во время новокаспийских подстадий. Далее следует этап осадконакопления в мелкой солоноватоводной лагуне, завершающийся этапом седиментации в высокоэнергетической среде на шельфе Северного Каспия при опресняющем влиянии стока Волги.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ № 20-35-90020 и РНФ № 21-44-04401. Авторы выражают благодарность ООО «Моринжгеология» за предоставление материала керна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Безродных Ю.П., Янина Т.А., Сорокин В.М., Романюк Б.Ф. Строение осадочной толщи голоцена Северного Каспия как отражение изменений климата и уровня моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 5. С. 52–60.

Безродных Ю.П., Романюк Б.Ф., Сорокин В.М., Янина Т.А. Первые данные о радиоуглеродном возрасте ательских отложений Северного Каспия // Доклады РАН. 2017. Т. 473. № 3. С. 327–330.

Безродных Ю.П., Делия С.В., Романюк Б.Ф., Федоров В.И., Сорокин В.М., Лукша В.Л. Мангышлакские отложения (голоцен) Северного Каспия // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2014. Т. 22. № 4. С. 88–108. DOI: 10.7868/S0869592X14040036.

Болиховская Н.С. Эволюция климата и ландшафтов Нижнего Поволжья в голоцене // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2011. Т. 5. № 2. С. 13–27.

Борисова О.К. Ландшафтно-климатические изменения в голоцене // Известия РАН. Сер. географическая. 2014. № 2. С. 5–20.

Варущенко С.И., Варущенко А.Н., Клиге Р.К. Изменение режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремени. М.: Наука, 1987. 239 с.

Дорофеев Н.В., Бочкарев А.В., Симонова Е.Б., Филиппова П.Б. Строение, нефтегазоносность и риски освоения нижнемеловых отложений западной части Ракушечно-Широтной системы поднятий // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2015. № 6. С. 18–26.

Качинский Н.А. Физика почвы. М.: Высшая школа, 1965. Ч. 1. 320 с.

Куликовский М.С., Глущенко А.М., Генкал С.И., Кузнецова И.В. Определитель диатомовых водорослей России. Ярославль: Филигрань, 2016. 804 с.

Лобачева Д.М., Бадюкова Е.Н., Макшаев Р.Р. Литофациальное строение и условия накопления отложений Бэровских бугров Северного Прикаспия // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 6. С. 99–111.

Рычагов Г.И. Колебания уровня Каспийского моря: причины, последствия, прогноз // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2011. № 2. С. 4–12.

Рычагов Г.И. Плейстоценовая история Каспийского моря. М.: Изд-во МГУ, 1997. 268 с.

Свиточ А.А., Янина Т.А. Четвертичные отложения побережий Каспийского моря. М.: Россельхозакадемия, 1997. 268 с.

Судакова Н.Г., Антонов С.И., Болиховская Н.С., Введенская А.И., Немцова Г.М. и др. Проблемы корреляции разрезов новейших отложений ледниковой и перигляциальной зон на востоке Среднерусской возвышенности. Деп. ВИНИТИ. М.: ВИНИТИ (№ 3299-В95), 1995. С. 1–46.

Чеховская М.П., Зенина М.А., Матуль А.Г., Степанова А.Ю., Раковски А.З. Реконструкция палеообстановки в голоцене на северном шельфе Каспийского моря по остракодам // Океанология. М.: Наука, 2018. Т. 58. № 1. С. 89–101.

Янина Т.А. Эволюция природной среды Понто-Каспия в условиях глобальных изменений климата в позднем плейстоцене // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2013. № 1. С. 3–16.

Янина Т.А. Дидакны Понто-Каспия. М.; Смоленск: Маджента, 2005. 300 с.

Bezrodnykh Y.P., Sorokin V.M. On the age of the Mangyshlak deposits of the northern Caspian Sea, *Quaternary Research*, 2016, vol. 85, p. 245–254, DOI: 10.1016/j.yqres.2016.01.004.

Berdnikova A.A., Lysenko E.I., Makshaev R.R., Zenina M.A., Yanina T.A. Multidisciplinary Study of the Rybachya Core in the North Caspian Sea during the Holocene, *Diversity*, 2023, vol. 15, p. 150–170, DOI: 10.3390/d15020150.

Hartley B., Barber H.G., Carter J.R., Sims P.A. An atlas of British diatoms, Bristol, Biopress, 1996, 601 p.

Ivanova E.V., Marret F., Zenina M.A. et al. The Holocene Black Sea reconnection to the Mediterranean Sea: New insights from the northeastern Caucasian shelf, *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.*, 2015, vol. 427, p. 41–61, DOI: 10.1016/j.palaeo.2015.03.027.

Kakroodi A.A., Leroy S.A.G., Kroonenberg S.B., Lahijani H.A.K., Alimohammadian H., Boomer I., Goorabi A. Late Pleistocene and Holocene sea-level change and coastal paleoenvironment evolution along the Iranian Caspian shore, *Marine Geology*, 2015, vol. 361, p. 111–125, DOI: 10.1016/j.margeo.2014.12.007.

Kostianoy A.G., Kosarev A.N. The Caspian Sea Environment, Springer, Berlin, Heidelberg, Germany. 2005, 268 p., DOI: 10.1007/b138238.

Kislov A.V., Panin A.V., Toropov P.A. Current status and palaeostages of the Caspian Sea as a potential evaluation tool for climate model simulations, *Quaternary International*, 2014, vol. 345, p. 48–55, DOI: 10.1016/j.quaint.2014.05.014.

Kozina N., Reykhard L., Dara O. Authigenic Minerals of the Derbent and South Caspian Basins (Caspian Sea): Features of Forms, Distribution and Genesis under Conditions of Hydrogen Sulfide Contamination, *Minerals*, 2022, vol. 12, no. 1, p. 87–104, DOI: https://doi.org/10.3390/min12010087.

Smith A.J., Horne J.H. Ecology of marine, marginal marine and nonmarine ostracods, *The Ostracoda: Applications in Quaternary Research*, AGU, Washington, DC, USA, 2002, p. 37–64.

Smol J.P., Birks H.J., Last W.M. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Terrestrial, Algal and Siliceous Indicators, Kluwer Academic Publishers, Alphen an den Rijn, The Netherlands, 2001, 327 p.

Электронные ресурсы

КАСПКОМ (Координационный комитет по гидрометеорологии Каспийского моря), 2023. URL: www.caspcom.com (дата обращения 30.05.2023).

AlgaeBase, National University of Ireland, Galway, 2020, URL: https://www.algaebase.org (дата обращения 10.04.2023).

Поступила в редакцию 25.04.2023
После доработки 16.08.2023
Принята к публикации 06.10.2023

PALAEOECOLOGICAL SITUATION IN PRE-DELTA AREA OF THE NORTH CASPIAN SEA DURING THE HOLOCENE

E.I. Lysenko[1], A.A. Tkach[2], R.R. Makshaev[3], T.A. Yanina[4], M.A. Zenina[5]

[1, 4] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography*
[2–4] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Paleogeography*
[4] *Saint Petersburg State University, Laboratory of Macroecology and Biogeography of Invertebrates*
[5] *P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Laboratory of Paleoceanology*

[1] *Ph.D. student; e-mail: lenobl1996@gmail.com*
[2] *Junior Scientific Researcher; e-mail: alinaberdnikowa@yandex.ru*
[3] *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: radikm1986@mail.ru*
[4] *Professor, Head of the Laboratory, D.Sc. in Geography; e-mail: paleo@inbox.ru*
[5] *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: maria_zenina@mail.ru*

Palaeoecoligical reconstructions of pre-delta area of the North Caspian Sea were based on the multidisciplinary study of the core from the Rybachya borehole containing the Holocene deposits. Geochemical, grain size, mollusk fauna, diatom and ostracod analyses were performed, and the radiocarbon dating was carried out. The structure of deposits reflects palaeogeographic events of different scales including the inception of a palaeoincision in the Lower Khvalynian deposits, accompanied by erosion of the Upper Khvalynian deposits; its development during the Mangyshlak regression and gradual filling during the multistage Holocene Neocaspian transgression. The Holocene age of the deposits filling the palaeodepression is confirmed by radiocarbon dates – 8070 ± 110 and 7020 ± 140 cal. BP. The paleontological data indicate the interchange of tranquil and dynamic water regimes and the quasi-cyclical change in the conditions of the water basin, from brackish to freshwater and to marine during the stage of sedimentation, corresponding to the present-day conditions on the North Caspian shelf.

Keywords: Neocaspian deposits, Mangyshlak regression, biostratigraphy, diatoms, mollusk fauna, ostracoda, geochemistry

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 20-35-90020) and the Russian Science Foundation (project 21-44-04401). The authors thank the Morinzhgeologiya LLC (Limited Liability Company) for the core material.

REFERENCES

Berdnikova A.A., Lysenko E.I, Makshaev R.R., Zenina M.A., Yanina T.A. Multidisciplinary Study of the Rybachya Core in the North Caspian Sea during the Holocene, *Diversity*, 2023, vol. 15, p. 150–170, DOI: 10.3390/d15020150.

Bezrodnykh Y.P., Sorokin V.M. On the age of the Mangyshlak deposits of the northern Caspian Sea, *Quaternary Research*, 2016, vol. 85, p. 245–254, DOI: 10.1016/j.yqres.2016.01.004.

Bezrodnykh Yu.P., Deliya S.V., Romanyuk B.F., Fedorov V.I., Sorokin V.M., Luksha V.L. Mangyshlakskie otlozheniya (golotsen) Severnogo Kaspiya [Mangyshlak deposits (the Holocene) of the Northern Caspian Sea], *Stratigrafiya, Geologicheskaya korrelyatsiya*, 2014, vol. 22, no. 4, p. 88–108, DOI: 10.7868/S0869592X14040036. (In Russian)

Bezrodnykh Yu.P., Romanyuk B.F., Sorokin V.M., Yanina T.A. First data on the radiocarbon age of the Atelian deposits in the North Caspian region, *Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 473, no. 1, p. 277–280.

Bezrodnykh Yu.P., Yanina T.A., Sorokin V.M., Romanyuk B.F. Stroenie osadochnoi tolshchi golotsena Severnogo Kaspiya kak otrazhenie izmenenii klimata i urovnya morya [Structure of the Holocene sedimentary series of the Northern Caspian Sea as a reflection of climate and sea level changes], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr*., 2018, no. 5, p. 52–60. (In Russian)

Bolikhovskaya N.S. Evolyutsiya klimata i landshaftov Nizhnego Povolzh'ya v golotsene [The Holocene evolution of climate and landscapes in the Lower Volga River region], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5., Geogr*., 2011, vol. 5, no. 2, p. 13–27. (In Russian)

Borisova O.K. Landshaftno-klimaticheskie izmeneniya v golotsene [Landscape-climate changes during the Holocene], *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk, Ser. geograficheskaya*, 2014, no 2, p. 5–20. (In Russian)

Chekhovskaya M.P., Zenina M.A., Matul' A.G., Stepanova A.Yu., Rakovski A.Z. Ostracod-based paleoreconstructions on the Northern Caspian Sea shelf during the Holocene, *Oceanology*, 2018, vol. 58, no. 1, p. 79–91.

Dorofeev N.V., Bochkarev A.V., Simonova E.B., Filippova P.B. Stroenie, neftegazonosnost' i riski osvoenija nizhnemelovyh otlozhenij zapadnoj chasti Rakushechno-Shirotnoj sistemy podnjatij [Structure, oil and gas occurrence and risks of the development of the Lower Cretaceous deposits in the western part of the Rakushechno-Shirotnaya Uplift Zone], *Geologija, geofizika i razrabotka neftjanyh i gazovyh mestorozhdenij*, 2015, no. 6, p. 18–26. (In Russian)

Hartley B., Barber H.G., Carter J.R., Sims P.A. *An atlas of British diatoms*, Bristol, Biopress, 1996, 601 p.

Ivanova E.V., Marret F., Zenina M.A., Murdmaa I.O., Chepalyga A.L., Bradley L.R., Schornikov E.I., Levchenko O.V.,

Zyryanova M.I. The Holocene Black Sea reconnection to the Mediterranean Sea: New insights from the northeastern Caucasian shelf, *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.*, 2015, vol. 427, p. 41–61, DOI: 10.1016/j.palaeo.2015.03.027.

Kachinskii N.A. *Fizika pochvy, chast' 1* [Soil physics, part 1], Moscow, Higher school Publ., 1965, 320 p. (In Russian)

Kakroodi A.A., Leroy S.A.G., Kroonenberg S.B., Lahijani H.A.K., Alimohammadian H., Boomer I., Goorabi A. Late Pleistocene and Holocene sea-level change and coastal paleoenvironment evolution along the Iranian Caspian shore, *Marine Geology*, 2015, vol. 361, p. 111–125, DOI: 10.1016/j.margeo.2014.12.007.

Kislov A.V., Panin A.V., Toropov P.A. Current status and palaeostages of the Caspian Sea as a potential evaluation tool for climate model simulations, *Quaternary International*, 2014, vol. 345, p. 48–55, DOI: 10.1016/j.quaint.2014.05.014

Kostianoy A.G., Kosarev A.N. *The Caspian Sea Environment*, Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, 2005, 268 p., DOI: 10.1007/b138238.

Kozina N., Reykhard L., Dara O. Authigenic Minerals of the Derbent and South Caspian Basins (Caspian Sea): Features of Forms, Distribution and Genesis under Conditions of Hydrogen Sulfide Contamination, *Minerals*, 2022, vol. 12, no. 1, p. 87–104, DOI: 10.3390/min12010087.

Kulikovskiy M.S., Gluschenko A.M., Genkal S.I., Kuznetsova I.V. *Opredelitel' diatomovykh vodorosley Rossii* [Identification guide of diatoms in Russia], Yaroslavl, Filigran, 2016, 804 p. (In Russian)

Lobacheva D.M., Badyukova E.N., Makshaev R.R. Litofatsial'noe stroenie i usloviya nakopleniya otlozhenii Berovskikh bugrov Severnogo Prikaspiya [Lithofacial structure and conditions of accumulation of Bare knoll deposits in the Northern Caspian region], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 6, p. 99–111. (In Russian)

Rychagov G.I. *Pleistotsenovaya istoriya Kaspiiskogo morya* [The Pleistocene history of the Caspian Sea], Moscow, Moscow St. Un-t Publ., 1997, 268 p. (In Russian)

Rychagov G.I. Kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya: prichiny, posledstviya, prognoz [Fluctuations of the Caspian Sea level: causes, effects, forecast], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2011, no. 2, p. 4–12. (In Russian)

Smith A.J., Horne J.H. Ecology of marine, marginal marine and nonmarine ostracods, *The Ostracoda: Applications in Quaternary Research*, AGU, Washington, DC, USA, 2002, p. 37–64.

Smol J.P., Birks H.J., Last W.M. *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Terrestrial, Algal and Siliceous Indicators*, Kluwer Academic Publishers, Alphen an den Rijn, The Netherlands, 2001, 327 p.

Sudakova N.G., Antonov S.I., Bolikhovskaya N.S., Vvedenskaya A.I., Nemtsova G.M. et al. *Problemy korrelyatsii razrezov noveishikh otlozhenii lednikovoi i periglyatsial'noi zon na vostoke Srednerusskoi vozvyshennost*i [Problems of correlation of the recent deposits outcrops in the glacial and periglacial zones of the Eastern part of the Central Russian Upland], Dep. VINITI, Moscow, All-Russian Institute for Scientific and Technical Information Publ. (no. 3299-V95), 1995, p. 1–46. (In Russian)

Svitoch A.A., Yanina T.A. *Chetvertichnye otlozheniya poberezhii Kaspiiskogo morya* [Quaternary deposits of the Caspian Sea coasts], Moscow, Russian Agricultural Sciences Academy Publ., 1997, 268 p. (In Russian)

Varushchenko S.I., Varushchenko A.N., Klige R.K. *Izmenenie rezhima Kaspiiskogo morya i besstochnykh vodoemov v paleovremeni* [Change of the Caspian Sea and endorheic reservoirs regime in Palaeotime], Moscow, Nauka Publ., 1987, 239 p. (In Russian)

Yanina T.A. Evolyutsiya prirodnoi sredy Ponto-Kaspiya v usloviyakh global'nykh izmenenii klimata v pozdnem pleistotsene [Evolution of the Pont-Caspian environment under the global climate change during the Late Pleistocene], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr*., 2013, no. 1, p. 3–16. (In Russian)

Yanina T.A. *Didakny Ponto-Kaspiya* [Didacna of the Pont-Caspian], Moscow, Smolensk, Madzhenta Publ., 2005, 300 p. (In Russian)

Web sources

AlgaeBase, National University of Ireland, Galway, 2020, URL: https://www.algaebase.org (access date 10.04.2023).

Coordinating Committee on Hydrometeorology and Pollution Monitoring of the Caspian Sea (CASPCOM), 2023, URL: www.caspcom.com (access date: 30.05.2023).

Received 25.04.2023
Revised 16.08.2023
Accepted 06.10.2023

Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2024. Т. 79. № 1. С. 78–88

УДК 551.312.2+571.1

ПИРОГЕННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ БОЛОТНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ТОРФА В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

А.А. Синюткина[1], **Л.П. Гашкова**[2], **Ю.А. Харанжевская**[3]

[1–3] *Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН*

[1] *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ankalaeva@yandex.ru*
[2] *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: gahkova-lp@ramble.ru*
[3] *Ст. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: kharan@yandex.ru*

Природные пожары являются важным экологическим фактором, определяющим интенсивность круговорота углерода на болотах. В статье представлены оценки последствий пирогенной трансформации и современного состояния выгоревших участков болот таежной и лесотундровой зон Западной Сибири через 6–8 лет после пожара с учетом их внутрифациальной неоднородности. Полевые исследования проведены в 2022 г. на трех болотах (всего 13 постпирогенных и фоновых точек) и включали тахеометрическую съемку поверхности, оценку встречаемости видов травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов, отбор образцов для лабораторного определения физико-технических свойств и ботанического состава торфа. В качестве видов-индикаторов восстановления рассматривали сфагновые мхи, *Polytrichum strictum*, лишайники и кустарнички. В результате исследования обнаружено, что интенсивность пирогенной трансформации определяется исходным состоянием болотной экосистемы и увеличивается в ряду: участок гидролесомелиорации на верховом Бакчарском болоте – плоскобугристое болото – верховое Усть-Бакчарское болото, осушенное для торфодобычи. На большинстве исследованных точек выгоранию оказались более подвержены понижения микрорельефа, в то время как положительные формы сохранились, либо выгорели частично. Трансформация свойств торфяной залежи распространяется по глубине за пределы выгоревшего слоя и проявляется в снижении влажности, увеличении зольности, плотности и степени гумификации. На первых этапах постпирогенных сукцессий выявлены схожие закономерности для болот таежной и лесотундровой зон, проявляющиеся в интенсивном зарастании *P. strictum*. По результатам исследования сделан вывод, что участок гидролесомелиорации на Бакчарском болоте имеет возможность восстановления видового состава растительного покрова и возобновления аккумуляции торфа. На Усть-Бакчарском болоте произошли необратимые изменения растительного покрова, где восстановление сфагновых мхов не происходит даже через 20 лет после пожара.

Ключевые слова: лесотундра, южная тайга, осушенное болото, верховое болото, плоскобугристое болото, микрорельеф, сфагновые мхи, природный пожар

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6

ВВЕДЕНИЕ

Природной особенностью Западной Сибири является ее высокая заболоченность, достигающая 30%, и широкое развитие сфагновых болот, что выводит их на уровень основного средообразующего фактора на данной территории. В результате климатических изменений и усиления антропогенного воздействия в последние десятилетия в бореальной зоне в целом и в Сибири в частности увеличивается частота и интенсивность природных пожаров [Московченко и др., 2020; Feurdean et al., 2020]. Особенно актуальна проблема возгораний для осушенных болот, которые, в связи с упадком торфодобывающей промышленности в конце XX в., были заброшены без необходимой противопожарной обработки – рекультивации, обводнения [Гизатулин и др., 2020]. Природные пожары являются важным экологическим фактором, определяющим структуру растительного покрова, характер микробиологических, гидротермических и биогеохимических процессов и, как следствие, интенсивность круговорота углерода [Ахметьева и др., 2014; Сизов и др., 2020]. Распределение видов, накопление торфа, гидрологические условия и биогеохимические циклы определяются микротопографическими особенностями болот [Benscoter et al., 2015]. Часто интенсивность горения выше в понижениях микрорельефа, за счет чего теряется почти в два раза больше органического вещества в сравнении с положительными формами [Benscoter, Wieder, 2003]. Это делает актуальным проведение исследований по оценке влияния пожаров и закономерностей постпирогенного восстановления с учетом исходной неоднородности и трансформации микрорельефа поверхности.

Наиболее изученным этот вопрос является для сфагновых болот Канады (Альберта) [Benscoter et al., 2005; Benscoter, Vitt, 2008, Benscoter et al., 2015; Thompson, Waddington, 2013]. На территории России исследования пирогенной нагрузки и восстановления выгоревших болот также являются актуальными и посвящены оценкам отдельных аспектов состояния и динамики постпирогенных участков. Наиболее значимыми являются исследования по оценке трансформации торфяной залежи и потерь углерода в результате пожара [Глухова, Сирин, 2018; Сирин и др., 2019], динамики растительного покрова постпирогенных болот [Копотева, Купцова, 2016], комплексная оценка последствий пожара представлена в работах [Вомперский и др., 2007; Ахметьева и др., 2014; Торфяные болота…, 2020]. На болотах Западной Сибири исследования по оценке последствий пожара немногочисленны и касаются динамики растительности на верховом осушенном болоте, выгоревшем в 1998 г. [Базанов и др., 2002].

Целью исследования является проведение оценки последствий пирогенной трансформации и современного состояния выгоревших участков болот таежной и лесотундровой зон Западной Сибири через 6–8 лет после пожара. В частности, рассмотрены характеристики растительности и верхнего горизонта торфяной залежи с учетом внутрифациальной неоднородности болота, определяющейся свойствами микрорельефа поверхности; проведен анализ последствий пожара для болот с разной степенью антропогенной нагрузки.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются три ключевых участка: 1) Бакчарское болото; 2) Усть-Бакчарское болото; 3) плоскобугристое болото на междуречье рек Пур и Надым (рис. 1, табл. 1). Все болота относятся к верховому типу. Бакчарское и Усть-Бакчарское болота расположены в подзоне южной тайги Западной Сибири в пределах Томской области. Климат рассматриваемой территории континентальный, среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции в с. Бакчар (1960–2021 гг.) составляет 0,02°С, количество осадков – 534 мм [Булыгина и др., 2022].

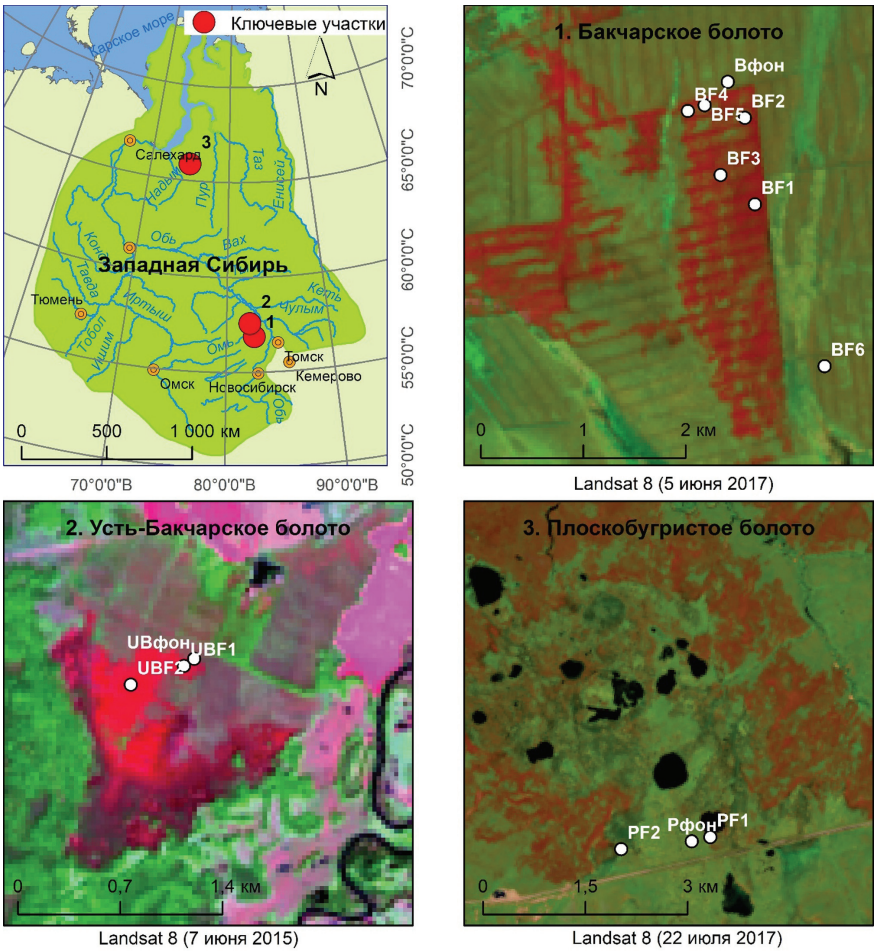


Рис. 1. Схема расположения объектов исследования

Fig. 1. Map of the study area

Таблица 1

Характеристика объектов исследования

Ключевой участок	Точка	Доля выгорания поверхности, %	Год пожара	Координаты	УБВ, см
Бакчарское верховое болото	BF1	93	2016	56°52′46,9″, 82°41′04,4″	–24
	BF2	67	2016	56°53′14,3″,82°40′59,8″	–20
	BF3	71	2016	56°52′56,4″, 82°40′44,9″	–16
	BF4	97	2016	56°53′16,8″, 82°40′ 26,4′	–26
	BF5	74	2016	56°53′18,6″, 82°40′36,7″	–26
	BF6	–	Около 1990	56°51′55,2″, 82°41′42,3″	–28
	Bфон	–	–	56°53′25,8″, 82°40′50,5″	–15
Усть-Бакчарское верховое болото	UBF1	99	2014	57°34′39,5″, 82°16′21,6″	–28
	UBF2	100	2014	57°34′35,5″, 82°15′59,6″	–29
	UBфон	–	Около 2000	57°34′41,0″, 82°16′25,9″	–40
Плоскобугристое болото на междуречье рек Пур и Надым	PF1	76	2016	65°52′20,7″, 74°58′09,2″	–30
	PF2	78	2016	65°52′11,0″, 74°56′27,9″	–13
	Pфон	–	–	65°52′17,9″, 74°57′48,1″	–34

Бакчарское болото (северо-восточный отрог Большого Васюганского болота) расположено на водораздельной равнине в бассейне р. Чая (левый приток р. Обь). Общая площадь болота составляет 2700 км^2. В 1980-х гг. было проведено осушение с целью лесомелиорации на площади 77 км^2, расстояние между каналами составляет 160–180 м. В настоящее время происходит зарастание каналов и частичное восстановление болота. В 2016 г. произошло выгорание болота на площади около 5 км^2 в пределах его осушенной части. Полевые исследования проведены на пяти точках в пределах контура пожара 2016 г., на точке, выгоревшей около 30 лет назад, и фоновом участке (см. табл. 1).

Усть-Бакчарское болото расположено на террасе р. Бакчар. Площадь болота составляет 3,5 км^2, из которых 1,6 км^2 было осушено в 1980 г. для добычи торфа, расстояние между каналами – 40 м. В разные годы после осушения болото подвергалось выгоранию, последний крупный пожар произошел в 2014 г. на площади 0,5 км^2. Полевые исследования проведены на двух точках пожара 2014 г., в качестве фоновой точки был выбран участок более старого пожара в связи с отсутствием нетронутых пожаром участков на данном болоте (см. табл. 1). До пожаров изучаемые участки Бакчарского и Усть-Бакчарского болот были представлены сосново-кустарничково-сфагновым растительным сообществом. Средняя мощность торфяной залежи 2,5–3,3 м.

Плоскобугристое болото расположено на водораздельной равнине рек Пур и Надым в зоне лесотундры в пределах Ямало-Ненецкого автономного округа. Район исследования относится к зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород. Климат умерено-континентальный, среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции в г. Надым за период 1960–2021 гг. составила –5,3°С, количество осадков – 576 мм [Булыгина и др., 2022]. В августе 2016 г. выгоранию было подвержено 7 км^2 в пределах болота, а общая площадь контура пожара превысила 300 км^2. Естественный растительный покров представлен кустарничками и лишайниками на буграх, осокой и сфагновыми мхами в понижениях. Мощность торфяной залежи не превышает 1 м. Исследования проведены на двух постпирогенных и одной фоновой точке (см. табл. 1).

Комплекс полевых исследований проведен в июле–августе 2022 г. Для обеспечения идентичности болотных экосистем фоновых и постпирогенных точек использовались спутниковые данные Landsat 8 на даты до возникновения пожаров. Для выбора постпирогенных точек с разной степенью выгорания использовались спутниковые данные на даты следующего за пожаром вегетационного периода. Геоботанические описания растительности проводились на площадках 10×10 м согласно стандартной методике [Беручашвили, Жучкова, 1997]. Для оценки пространственной неоднородности поверхности на микроуровне на этих же точках выполнена тахеометрическая съемка на площади 25 м^2 (5×5 м) с шагом 50 см (121 точка на каждой площадке). Для каждой точки съемки определены высота поверхности, присутствие видов травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов, присутствие и толщина горелого слоя. Амплитуда колебаний высот микрорельефа (высота зоны разви-

тия микрорельефа) определялась, как $A = H_{max} - H_{min}$, где H_{max} и H_{min} – высоты верхней и нижней поверхностей зоны развития микрорельефа [Наставления…, 1990]. Доля выгорания площадки определялась, как отношение количества точек с горелым торфом к общему количеству точек (121) и выражалась в %. Встречаемость видов (в долях от 1) определялась по методу Раункиера по формуле: $R = a/n$, где a – число точек, на которых присутствует данный вид, n – общее количество точек (121). В качестве индикаторов восстановления рассматривались четыре группы растений: сфагновые мхи, *Polytrichum strictum*, лишайники и кустарнички (*Ledum. palustre*, *Chamaedaphne calyculata*, *Andromeda polifolia*, *Vaccinium uliginosum*, *Betula nana*), для которых определялась общая встречаемость. Для оценки свойств торфяной залежи проведен отбор образцов торфа на наиболее типичных формах микрорельефа (по две скважины на каждой модельной площадке – на повышении и в понижении микрорельефа) для лабораторного определения физико-технических свойств и ботанического состава. Проведено лабораторное определение влажности (ГОСТ 11306-2013), зольности (ГОСТ 11306-2013), степени гумификации и насыпной плотности торфа [Chambers, 2011]. Даты пожаров определялись с использованием базы данных FIRMS [FIRMS, 2022].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пирогенная трансформация поверхности болота. Для сосново-кустарничково-сфагновых болот характерен кочковатый микрорельеф, образованный слившимися моховыми подушками. Среднеквадратическое отклонение колебаний высот в среднем составляет 8,61, а амплитуда – около 37 см [Синюткина и др., 2018]. На осушенных болотах в зависимости от интенсивности осушения происходит либо увеличение расчлененности поверхности, как это отмечено на участке гидролесомелиорации Бакчарского болота (табл. 2), либо выравнивание поверхности в результате активизации процессов разложения в условиях низких уровней болотных вод на участках, осушенных для добычи торфа (Усть-Бакчарское болото).

Исходные различия в свойствах микрорельефа определяют различия в трансформации поверхности на пирогенных участках. На всех постпирогенных точках Бакчарского болота через шесть лет после пожара отмечено выравнивание поверхности. Горение происходило с разной интенсивностью в зависимости от высоты поверхности. На частично выгоревших точках доля выгорания на положительных формах ниже в сравнении с понижениями и высотами около средней поверхности (см. табл. 2).

Постпирогенные участки на Усть-Бакчарском болоте характеризуются практически полным выгоранием поверхности, а показатели микрорельефа не отличаются от фоновой точки (см. табл. 2). Сходства показателей микрорельефа объясняются отсутствием восстановления растительности, определяющей формирование микрорельефа болот – сфагновых мхов, даже более чем через 20 лет после пожара, что связано с низким уровнем болотных вод.

Особенности выгорания поверхности на плоскобугристом болоте различаются на двух постпирогенных точках. Точка PF1 характеризуется уменьшением доли выгорания от мочажин к буграм, в то время как на точке PF2 в большей степени выгоранию оказались подвержены склоны и понижения бугров, а мочажины и бугры имеют примерно равную долю выгорания (см. табл. 2). В связи с более интенсивным выгоранием мочажин на точке PF1, где толщина горелого слоя достигла 10 см, произошло увеличение стандартного отклонения высот и амплитуды в сравнении с фоновой точкой, а относительно однородное выгорание поверхности на точке PF2 способствовало сохранению значений, характерных для фоновой точки (см. табл. 2).

Пирогенная трансформация растительности. Растительный покров сосново-кустарничково-сфагновых верховых болот характеризуется доминированием сфагновых мхов (*Sphagnum fuscum, S. divinum, S. balticum*), широким распространением кустарничкового яруса из багульника (*L. palustre*), хамедафны (*C. calyculata*), андромеды (*A. polifolia*) и, на осушенных болотах, голубики (*V. uliginosum*), преобладанием сосны (*Pinus sylvestris*) высотой до 2–3 м в составе древесного яруса. При осушении увеличивается доля *S. fuscum* в видовом составе сфагновых мхов при снижении их общей встречаемости, появление зеленых мхов и лишайников [Синюткина и др., 2018; Sinyutkina, 2021]. Растительный покров плоскобугристого болота представлен кустарничками (*B. nana*, *L. palustre* и др.), *Rubus chamaemorus* и лишайниками на буграх, осоками и сфагновыми мхами в понижениях.

В результате пожара на Бакчарском и Усть-Бакчарском болотах произошло полное выгорание древесного и кустарничкового ярусов и частичное или полное выгорание мохово-лишайникового яруса [Sinyutkina et al., 2020]. Через шесть лет после пожара на Бакчарском болоте типичным видом на горелых поверхностях является *P. strictum* (встречаемость 0,44–0,95). На большинстве точек большая встречаемость характерна для понижений, где она достигает 0,97, а на выгоревших поверхностях положительных форм изменяется от 0,11 до 0,82. *P. strictum* продолжает сохраняться в видовом составе на точке BF6 (встречаемость 0,35). Отме-

чено частичное восстановление сфагновых мхов, главным образом *S. fuscum,* реже *S. divinum*. Общая встречаемость сфагновых мхов на выгоревших поверхностях изменяется в пределах 0,09–0,37. На трех точках из пяти, изученных более интенсивно, зарастают понижения, где встречаемость сфагновых мхов достигает 0,52 (BF1), а на выгоревших поверхностях положительных форм они могут совсем отсутствовать (BF2). На точке BF6 встречаемость сфагновых мхов оказалась даже выше в сравнении с фоновой точкой и составляет 0,88, достигая на повышениях 1. Лишайники встречаются только в понижениях как на фоновой, так и на постпирогенных точках, встречаемость не превышает 0,14 (рис. 2).

Таблица 2

Характеристики микрорельефа постпирогенных и фоновых участков

Точки	Характеристики микрорельефа		Доля выгорания поверхности, %		
	Амплитуда колебаний высот, см	Стандартное отклонение	Отрицательные формы	Средняя поверхность (–5–5 см)	Положительные формы
BF1	32,8	5,70	95	95	85
BF2	42,5	7,56	64	79	29
BF3	38,0	8,46	82	87	30
BF4	33,8	7,20	100	96	97
BF5	34,7	8,85	87	80	51
BF6	44,2	9,10	0	0	0
Bфон	51,0	11,09	0	0	0
UBF1	28,5	5,12	100	99	100
UBF2	32,9	6,72	100	100	100
UBфон	31,9	6,77	0	0	0
PF1	81,0	20,77	92	86*	67
PF2	60,5	13,55	75	87*	78
Pфон	56,0	13,21	0	0	0

Примечание. *Для плоскобугристого болота (точки PF1, PF2) данные приведены для склонов и понижений бугров вне зависимости от высоты.

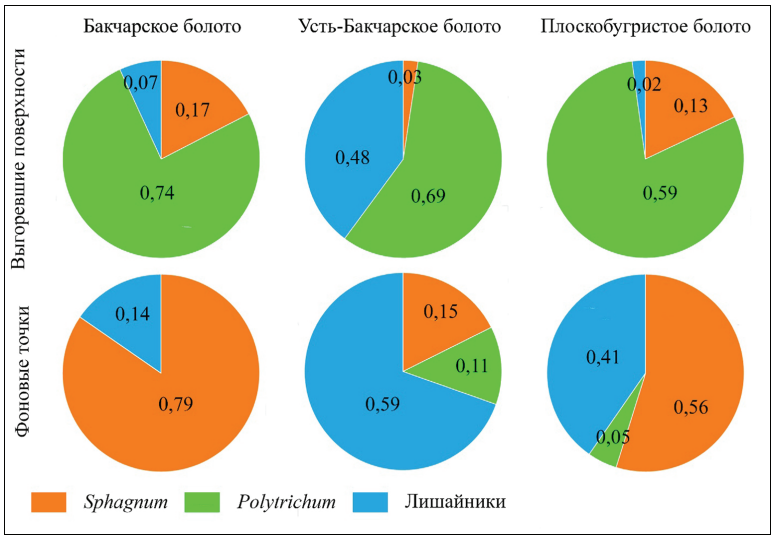


Рис. 2. Встречаемость видов мохово-лишайникового яруса на постпирогенных (средние значения для горелых поверхностей) и фоновых точках (значения представлены в долях от единицы)

Fig. 2. Occurrence of mosses and lichens at post-pyrogenic (mean values for burnout surfaces) and pristine plots (values are presented in fractions of 1)

Для постпирогенных точек Усть-Бакчарского болота также характерно интенсивное зарастание *P. strictum* (встречаемость 0,69) на всех формах микрорельефа. На точке UBфон, выгоревшей около 20 лет назад, встречаемость *P. strictum* составляет 0,11. На болоте произошла критическая деградация сфагнового покрова, вероятно без возможности восстановления в условиях сохраняющихся низких уровней болотных вод. Даже на фоновой точке через 20 лет после пожара не произошло зарастание сфагновыми мхами, встречаемость которых составляет всего 0,19 в понижениях и 0,11 на положительных формах. В видовом составе сфагновых мхов отмечен только *S. fuscum.* На постпирогенных точках, выгоревших в 2014 г., сфагновые мхи практически отсутствуют. Особенностью Усть-Бакчарского болота является широкое распространение лишайников, которые замещают сфагновые мхи в условиях низкого уровня болотных вод. На фоновой точке лишайники распространены равномерно по всей поверхности со средней встречаемостью 0,59. На постпирогенных точках встречаемость несколько ниже (0,41–0,54), увеличивается от 0,16–0,26 в понижениях до 0,50–0,70 на положительных формах (см. рис. 2).

На постпирогенных точках плоскобугристого болота встречаемость *P. strictum* имеет схожие значения с болотами таежной зоны, большая встречаемость характерна для выгоревших поверхностей мочажин, а также пониженных участков бугров и их склонов (0,48–1). Выгоревшие поверхности плоскобугристого болота отличаются низкой встречаемостью сфагновых мхов (0,04–0,16). В целом встречаемость сфагновых мхов выгоревших поверхностей находится на одном уровне с точками Бакчарского болота, доминантой также является *S. fuscum*. На постпирогенных точках встречаемость лишайников единична (см. рис. 2).

На всех болотах за 6–8 лет после пожара произошло интенсивное зарастание кустарничками, тем не менее их встречаемость продолжает оставаться ниже в сравнении с фоновыми точками – 0,47–0,69 на Бакчарском, 0,44–0,69 на Усть-Бакчарском, 0,44–0,56 на плоскобугристом болотах, 0,70–0,78 на фоновых точках.

Закономерности постпирогенного восстановления растительности определяются состоянием болота до пожара. Важным фактором является степень осушения болота, определяющая средний многолетний уровень болотных вод. При низкой интенсивности осушения отмечено зарастание сфагновыми мхами уже через несколько лет после пожара, при высокой интенсивности восстановления типичных для сосново-кустарничково-сфагновых болот видов оказалось невозможным даже через 20 лет после пожара.

Пирогенная трансформация торфяной залежи. Верхние слои торфяной залежи на всех точках образованы сфагновыми торфами. На положительных формах преобладает фускум торф, за исключением бугра фоновой точки плоскобугристого болота (Рфон), где под лишайниками следует слой, образованный *S. balticum* и *S. majus*. В понижениях ботанический состав торфа более разнообразный – встречаются виды торфа: фускум (BF2, BF4, BF5, BF6, Вфон, UBF1, UBфон), балтикум (BF1) и магелланикум (BF3, UBF2). В ботаническом составе мочажин плоскобугристого болота встречаются остатки *S. balticum* и *S. fuscum.* Наибольшая трансформация торфяной залежи проявляется в верхнем горизонте (0–5 см). Влажность верхнего слоя выгоревших понижений изменяется в пределах 79,5–90,4% и в среднем составляет 85,3% на верховых болотах таежной зоны, что на 6% ниже в сравнении с понижениями на фоновом участке Бакчарского болота. На выгоревших участках плоскобугристого болота также отмечено снижение влажности с 93,2 до 87,4%. В пределах выгоревших участков таежной зоны отмечено увеличение зольности с 1,5% на фоновой точке до 8,6–16,7% и с 4,3 до 6,5–9,5% на плоскобугристом болоте. На всех постпирогенных точках отмечено увеличение плотности торфа с 0,04 до 0,05–0,11 г/см^3. Степень гумификации различается между постпирогенными точками (33–57%). На фоновой точке Бакчарского болота степень гумификации составила 31%, Усть-Бакчарского – 46%. На плоскобугристом болоте отмечено более значимое увеличение степени гумификации с 28 до 44–50%.

Различия свойств торфяной залежи постпирогенных и фоновых точек проявляются до глубины 15 см в понижениях и достигают 35 см на повышениях. В понижениях наибольшая глубина проявления различий характерна для зольности, вероятно за счет просачивания зольных элементов вглубь торфяной залежи. На Бакчарском болоте отмечено увеличение зольности до глубины 10–15 см, в том числе в слое 5–10 см зольность в среднем в 2–3 раза выше в сравнении с фоновым участком. На Усть-Бакчарском болоте увеличение зольности менее выражено и превышение значений отмечено только на точке UBF2 в слое 5–10 см, в 1,7 раз в сравнении с фоновой точкой. На некоторых точках Бакчарского болота (BF1, BF4, BF5) уплотнение торфяной залежи прослеживается до глубины 15 см, где значения плотности в слое 5–15 см превышают фоновые в 1,4–1,5 раза. На Усть-Бакчарском и плоскобугристом болотах увеличение плотности в этом слое не выявлено. На отдельных точках наблюдается увеличение степени гумификации до глубины 10–15 см на 7% на точке UBF2 и на 8–13% на плоскобугристом болоте.

На Бакчарском болоте трансформация свойств отмечена даже на невыгоревших моховых подушках пирогенных участков и проявляется в увеличении зольности в 2,2–3 раза в слое 25–35 см. На выгоревших моховых подушках отмечено изменение всех рассматриваемых показателей – увеличение степени гумификации на 6–16%, плотности в 1,6–2 раза, зольности в 2,2–3,2 раза и уменьшение влажности на 3–4%. Положительные формы на Усть-Бакчарском болоте отличаются меньшей глубиной трансформации, которая составляет всего 5–10 см. В слое 5–10 см наблюдается увеличение зольности в 1,6–2,5 раза, плотности в 2,3 раза и снижение влажности на 4–7%. На плоскобугристом болоте изменения свойств торфа бугров глубже 5 см не выявлено.

На выгоревшей около 30 лет назад точке Бакчарского болота (BF6) на положительных формах микрорельефа – сфагновых подушках отмечены проявления горелого слоя на глубине 30 см, что подтверждает возможность восстановления сфагновой растительности и возобновление аккумуляции торфа. В пределах понижений микрорельефа современная аккумуляция торфа не выявлена.

Таким образом, выгорание болот привело к трансформации всех рассматриваемых характеристик верхнего слоя торфа. Наибольшие изменения характерны для зольности верхнего слоя, значения которой увеличились в 1,5–9 раз в сравнении с фоновыми участками.

Обсуждение результатов. Неоднородность микрорельефа болот оказывает сильное влияние на распространение огня и интенсивность горения [Benscoter et al., 2015]. В зависимости от исходного состояния болота до пожара, большему выгоранию могут оказаться подвержены как положительные, так и отрицательные формы микрорельефа. В условиях относительно высокого обводнения болота интенсивность горения больше в понижениях микрорельефа, в то время как положительные формы менее подвержены выгоранию и часто остаются нетронутыми огнем, как это было отмечено на сфагновых болотах в Канаде [Thompson, Waddington, 2013; Benscoter et al., 2015]. По результатам нашего исследования, эта закономерность была отмечена на верховом Бакчарском и плоскобугристом болотах. Устойчивость положительных форм к выгоранию связана с видовым составом моховой растительности и ботанического состава верхних горизонтов торфяной залежи. Для них характерно доминирование *S. fuscum*, обладающего способностью удерживать влагу в засушливые периоды, предотвращая высыхание торфяной залежи [Benscoter et al., 2015]. В сравнении со сфагновыми мхами, зеленые мхи характеризуются большей гидрофобностью [Moore et al., 2017]. На осушенных с целью лесомелиорации верховых болотах таежной зоны Западной Сибири понижения заняты либо лишайниками и зелеными мхами, либо разреженным покровом из сфагновых мхов [Sinyutkina, 2021], не способных сохранять влагу, что привело к более сильному выгоранию понижений в сравнении с моховыми подушками. При этом отмечено, что, несмотря на меньшую глубину горения на положительных формах, для них может быть характерно большее нарушение гидрологических условий, что будет сказываться на восстановлении сфагновой растительности в связи с формированием гидрофобного слоя под воздействием высоких температур во время пожара [Kettridge et al., 2015; Moore et al., 2017]. В понижениях, наоборот, может произойти снижение гидрофобности за счет выгорания покрова из зеленых мхов и лишайников и обнажения сфагнового торфа, способного эффективно удерживать влагу, и тем самым создавая условия для восстановления сфагновых мхов. Это вероятно объясняет более интенсивное восстановление сфагновых мхов в понижениях в сравнении с повышениями, отмеченное на трех постпирогенных точках Бакчарского болота.

В других случаях, описанных в [Benscoter et al., 2005], на повышениях достаточно быстро восстанавливается покров из *S. fuscum*, в то время как восстановление растительности в понижениях более динамично и непредсказуемо. Поэтому на положительных формах аккумуляция торфа начинается быстрее, а понижения требуют большего времени для восстановления растительного покрова, способного накапливать торф. В результате нашего исследования схожая тенденция была выявлена на точке пожара 1990 г. на Бакчарском болоте, где толщина слоя сфагнового торфа, отложившегося над горелым горизонтом, включая живой сфагновый покров, составляет уже 30 см (скорость аккумуляции торфа около 1 см/год), в то время как в понижении аккумуляция торфа практически отсутствует. Несмотря на то что средняя скорость аккумуляции торфа в голоцене на территории Западной Сибири изменялась в пределах 0,35–1,13 мм/год [Borren et al., 2004], современная скорость прироста торфа значительно выше и может достигать нескольких сантиметров в год в поверхностном слое благодаря высокой продуктивности сфагнового покрова [Taminskas et al., 2018]. Высокая скорость аккумуляции отмечена для сосново-кустарничково-сфагновых верховых болот южно-таежной подзоны Западной Сибири, где она на осушенных болотах составила 0,07–2,0 см/год и на естественных – 0,35–0,48 см/год [Sinyutkina, 2021]. Таким образом, скорость аккумуляции торфа на положительных формах постпирогенных участков Бакчарского болота сопоставима с невыгоревшими аналогичными болотами.

На более сухих болотах большему выгоранию становятся подвержены повышения микрорельефа [Вомперский и др., 2007]. На Усть-Бакчарском болоте, где выгорела вся поверхность, средняя толщина горелого слоя оказалась выше на положительных формах в сравнении с понижениями. На таких болотах повышения микрорельефа могут практически полностью деградировать из-за отсутствия фрагментов сфагнового покрова и конкурентного замещения другими видами [Benscoter et al., 2005].

Пожары приводят к увеличению неоднородности поверхности и увеличению амплитуды колебаний высот за счет углубления понижений в результате как прямого воздействия горения, так и косвенного влияния, заключающегося в более интенсивном проседании понижений в первые годы после пожара [Benscoter et al., 2015; Sinyutkina et al., 2020]. Через 6–8 лет после пожара на большинстве исследованных нами постпирогенных точек наоборот отмечено уменьшение амплитуды и выравнивание поверхности, что вероятно объясняется постепенным уплотнением и проседанием положительных форм с нарушенным покровом из сфагновых мхов вследствие нарушения способности удержания влаги. Таким образом, процесс деградации торфяной залежи на постпирогенных болотах происходит не только непосредственно во время горения, но и за счет трансформации гидрологических условий при смене доминантов растительного покрова [Копотева, Купцова, 2016; Малащук, Филиппов, 2021].

Закономерности пирогенной трансформации и постпирогенного восстановления болот имеют различия как на локальном, так и на региональном уровнях и определяются не только интенсивностью пожара, но и исходным состоянием болотной экосистемы. Свойства растительного покрова и торфяной залежи, режим увлажнения и особенности микрорельефа находятся в тесной взаимосвязи и определяют пространственную изменчивость постпирогенного функционирования болот, в первую очередь проявляющуюся в неоднородности накопления углерода. Поэтому важным аспектом в оценках баланса углерода на постпирогенных болотах является учет динамических взаимосвязей между компонентами экосистемы и учет неоднородности условий на микроуровне [Benscoter, Vitt, 2008].

ВЫВОДЫ

Последствия пожара на естественном плоскобугристом болоте оказались более значимы в сравнении с верховым Бакчарским болотом, осушенном с целью лесомелиорации, что проявляется в большей глубине прогорания торфяной залежи. Наибольшая постпирогенная трансформация с полным выгоранием поверхности характерна для осушенного с целью добычи торфа Усть-Бакчарского болота.

Пространственная неоднородность выгорания в значительной степени определяется особенностями микрорельефа поверхности болота. На большинстве исследованных точек выгоранию оказались более подвержены понижения микрорельефа, в то время как положительные формы сохранились либо выгорели частично.

В результате пожара трансформация свойств торфяной залежи распространяется по глубине за пределы слоя, непосредственно подверженного выгоранию, и проявляется в снижении влажности, увеличении зольности, плотности и степени гумификации. Максимальная глубина трансформации достигает 35 см.

В результате исследования выявлены схожие закономерности постпирогенных сукцессий для верховых болот таежной и плоскобугристых лесотундровой зоны, проявляющиеся в интенсивном зарастании *P. strictum* на первых стадиях восстановления. Зарастание сфагновыми мхами не отличается между выгоревшими поверхностями плоскобугристого болота и осушенного с целью лесомелиорации Бакчарского болота, но на осушенном с целью добычи торфа Усть-Бакчарском болоте восстановление сфагновых мхов не происходит даже через 20 лет после пожара.

Исследование показало, что на верховых болотах, осушенных с целью лесомелиорации в условиях таежной зоны Западной Сибири, после пожара возможно полное восстановление сфагновых мхов и возобновление процесса аккумуляции торфа, что подтверждается высокой встречаемостью сфагновых мхов уже через шесть лет после пожара и наличием горизонта торфа мощностью 30 см над горелым слоем на точке, выгоревшей около 30 лет назад.

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 22-77-10024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ахметьева Н.П., Белова С.Э., Джамалов Р.Г., Куличевская И.С., Лапина Е.Е., Михайлова А.В. Естественное восстановление болот после пожаров // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 4. С. 343–354. DOI: 10.7868/S0321059614040026.

Базанов В.А., Егоров Б.А., Льготин В.А., Скугарев А.А. Современная пространственная динамика Большого Васюганского болота (на примере междуречья рек Икса-Шегарка) // Большое Васюганское болото. Со-

временное состояние и процессы развития / под ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. С. 190–196.

Беручашвили Н.Л., Жучкова В.К. Методы комплексных физико-географических исследований. М.: Изд-во МГУ, 1997. 320 с.

Вомперский С.Э., Глухова Т.В., Смагина М.В., Ковалев А.Г. Условия и последствия пожаров в сосняках на осушенных болотах // Лесоведение. 2007. № 6. С. 35–44.

Гизатуллин А.Т., Алексеенко Н.А., Моисеева Н.А. Использование данных дистанционного зондирования для предупреждения возгораний торфоразработок // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 2. С. 45–52.

Глухова Т.В., Сирин А.А. Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте // Почвоведение. 2018. № 5. С. 580–588.

Копотева Т.А., Купцова В.А. Влияние пожаров на функционирование фитоценозов торфяных болот Среднеамурской низменности // Экология. 2016. № 1. С. 14–21.

Малащук А.А., Филиппов Д.А. Постпирогенная динамика растительного покрова верхового болота Барское (Вологодская область) // Трансформация экосистем. 2021. № 4(1). С. 104–121.

Московченко Д.В., Арефьев С.П., Московченко М.Д., Юртаев А.А. Пространственно-временной анализ природных пожаров в лесотундре Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2020. Т. 27. № 2. С. 243–255.

Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 8: Гидрометеорологические наблюдения на болотах. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 360 с.

Сизов О.С., Цымбарович П.Р., Ежова Е.В., Соромотин А.В., Приходько Н.В. Оценка постпирогенной динамики тундровой растительности на севере Западной Сибири за последние 50 лет (1968–2018) на основе данных ДЗЗ детального и высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 137–153.

Синюткина А.А., Гашкова Л.П., Малолетко А.А., Магур М.Г., Харанжевская Ю.А. Трансформация поверхности и растительного покрова осушенных верховых болот юго-востока Западной Сибири // Вестник Томского гос. ун-та. Биология. 2018. № 43. С. 196–223.

Сирин А.А., Макаров Д.А., Гуммерт И., Маслов А.А., Гульбе Я.И. Глубина прогорания торфа и потери углерода при лесном подземном пожаре // Лесоведение. 2019. № 5. С. 410–422.

Торфяные болота центральных областей Европейской части России: их трансформация за последние 100 лет / Н.П. Ахметьева, А.В. Михайлова, Г.Н. Кричевец, А.Ю. Беляев. М.: ГЕОС, 2020. 134 с.

Benscoter B.W., Greenacre D., Turetsky M.R. Wildfire as a key determinant of peatland microtopography, *Canadian Journal of Forest Research*, 2015, no. 45, p. 1133–1137, DOI: 10.1139/cjfr-2015-0028.

Benscoter B.W., Vitt D.H. Spatial patterns and temporal trajectories of the bog ground layer along a postfire chronosequence, *Ecosystems*, 2008, no. 11, p. 1054–1064, DOI: 10.1007/s10021-008-9178-4.

Benscoter B.W., Vitt D.H., Wieder R.K. Association of postfire peat accumulation and microtopography in boreal bogs, *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, no. 35, p. 2188–2193.

Benscoter B.W., Wieder R.K. Variability in organic matter lost by combustion in a boreal bog during the 2001 Chisholm fire, *Canadian Journal of Forest Research,* 2003, no. 33(12), p. 2509–2513, DOI: 10.1139/x03-162.

Borren W., Bleuten W., Lapshina E.D. Holocene peat and carbon accumulation rates in the southern taiga of western Siberia, *Quat. Res*., 2004, no. 61, p. 42–51, DOI: 10.1016/j.yqres.2003.09.002.

Chambers F.M., Beilman D.W., Yu Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostructudies of climate and peatland carbon dynamic, *Mires and Peat*, 2011, vol. 7, article 07, p. 1–10.

Feurdean A., Florescu G., Tantau I. et al. Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia, *Quaternary Science Reviews*, 2020, no. 244, 106495, DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106495.

Kettridge N., Turetsky M., Sherwood J. et al. Moderate drop in water table increases peatland vulnerability to post-fire regime shift, *Scientific Reports*, 2015, no. 5, 8063, DOI: 10.1038/srep08063.

Moore P.A., Lukenbach M.C., Kettridge N. et al. Peatland water repellency: Importance of soil water content, moss species, and burn severity, *Journal of Hydrology*, 2017, no. 554, p. 656–665.

Sinyutkina A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics, *Catena*, 2021, no. 205, 105464, DOI: 10.1016/j.catena.2021.105464.

Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Koronatova N.G. et al. Postfire ecological consequences within the drained site of the Great Vasyugan Mire: retrospective water-thermal regime and pyrogenic disturbance estimation, *IOP Conference Series: Earth Environment Science,* 2020, vol. 408, 012037.

Thompson D.K., Waddington J.M. Wildfire effects on vadose zone hydrology in forested boreal peatland microforms, *Journal of Hydrology*, 2013, no. 486, p. 48–56.

Taminskas J., *Linkeviciene* R., *Simanauskiene* R. et *al.* Climate change and water table fluctuation: Implications for raised bog surface variability, Geomorphology, 2018, no. 304, p. 40–49, DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.12.026.

Электронные ресурсы

Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394. URL: http://meteo.ru/it/178-aisori (дата обращения 14.02.2022).

FIRMS (Fire Information for Resource Management System), URL: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov (дата обращения 10.02.2022).

Поступила в редакцию 09.03.2023
После доработки 23.07.2023
Принята к публикации 06.10.2023

PYROGENIC CHANGES OF BOG VEGETATION AND PEAT IN WESTERN SIBERIA

A.A. Sinyutkina[1], **L.P. Gashkova**[2], **Yu.A. Kharanzhevskaya**[3]

[1–3] *Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies, Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat*

[1] *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ankalaeva@yandex.ru*
[2] *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: gahkova-lp@ramble.ru*
[3] *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: kharan@yandex.ru*

Wildfires are an important environmental factor which determines the carbon cycle intensity in mires. The article presents the assessment of the consequences of pyrogenic transformation and the current state of burnt-out mires in the taiga and forest-tundra zones of Western Siberia 6–8 years after the wildfire, with regard to their microhabitat heterogeneity. Field studies were conducted in 2022 on three mires (a total of 13 post-pyrogenic and pristine plots) and included a total-station survey of the surface, an assessment of the occurrence of species in the grass-dwarf shrub and moss-lichen tiers, sampling for laboratory analysis of the physical properties and botanical composition of peat. *Sphagnum* mosses, *Polytrichum strictum*, lichens and dwarf shrubs were considered as recovery indicator species. As a result of the study, it was found that the intensity of pyrogenic transformation is determined by the initial state of bog ecosystem and increases in a row: the hydro forestation site on the Bakchar raised bog – palsa – the Ust-Bakchar raised bog drained for peat extraction. At most of the studied plots, microdepressions were more susceptible to burnout, while hummocks were preserved or only partially burned out. The transformation of peat deposit properties extends beyond the layer directly exposed to burnout, and manifests itself in a decrease in water content, and an increase in ash content, bulk density and degree of humification. At the first stages of post-pyrogenic successions, similar patterns were revealed for the mires of taiga and forest-tundra zones, i.e. an intensive overgrowth with *P. strictum*. According to the results of the study, it was concluded that the hydroforestation site in the Bakchar bog could possibly restore the species composition of vegetation cover and resume peat accumulation. Irreversible changes in vegetation cover have occurred in the Ust-Bakchar bog, where the restoration of sphagnum mosses does not occur even 20 years after the fire.

***Keywords*:** forest-tundra, southern taiga, drained bog, raised bog, palsa, microtopography, *Sphagnum,* wildfire

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-77-10024).

REFERENCES

Akhmet'eva N.P., Belova S.E., Dzhamalov R.G., Kulichevskaya I.S., Lapina E.E., Mikhailova A.V. Estestvennoe vosstanovlenie bolot posle pozharov [Natural restoration of mires after wildfires]*, Vodnye resursy,* 2014, vol. 41, no. 4, p. 343–354. (In Russian)

Akhmet'eva N.P., Mikhailova A.V., Krichevets G.N., Belyaev A.Yu. *Torfyanye bolota tsentralnyh oblastej Evropejskoj chaste Rossii: ih transformatsiya za poslednie 100 let* [Peat bogs of central regions of the European part of Russia: their transformation during recent 100 years], Moscow, GEOS Publ., 2020. 134 p.

Bazanov V.A., Egorov B.A., L'gotin V.A., Skugarev A.A. [Modern spatial dynamics of the Great Vasyugan Mire (case study of the interfluve of the Iksa and Shegarka rivers)], *Bol'shoe Vasyuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Great Vasyugan Mire: Modern state and development processes], M.V. Kabanov (ed.), Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002, p. 190–196. (In Russian)

Benscoter B.W., Greenacre D., Turetsky M.R. Wildfire as a key determinant of peatland microtopography, *Canadian Journal of Forest Research*, 2015, no. 45, p. 1133–1137, DOI: 10.1139/cjfr-2015-0028.

Benscoter B.W., Vitt D.H. Spatial patterns and temporal trajectories of the bog ground layer along a postfire chronosequence, *Ecosystems*, 2008, no. 11, p. 1054–1064, DOI: 10.1007/s10021-008-9178-4.

Benscoter B.W., Vitt D.H. Wieder *R.K.* Association of postfire peat accumulation and microtopography in boreal bogs, *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, no. 35, p. 2188–2193.

Benscoter B.W., Wieder R.K. Variability in organic matter lost by combustion in a boreal bog during the 2001 Chisholm fire, *Canadian Journal of Forest Research,* 2003, no. 33(12), p. 2509–2513, DOI: 10.1139/x03-162.

Beruchashvili N.L., Zhuchkova V.K. *Metody kompleksnyh fiziko-geograficheskih issledovanij* [Methods of complex physical and geographical research], Moscow, Publishing House of Moscow State University, 1997, 320 p. (In Russian)

Borren W., Bleuten W., Lapshina E.D. Holocene peat and carbon accumulation rates in the southern taiga of western Siberia, *Quat. Res*., 2004, no. 61, p. 42–51, DOI: 10.1016/j.yqres.2003.09.002.

Chambers F.M., Beilman D.W., Yu Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostructudies of climate and peatland carbon dynamic, *Mires and Peat*, 2011, vol. 7, article 07, p. 1–10.

Feurdean A., Florescu G., Tantau I. et al. Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia, *Quaternary Science Reviews*, 2020, no. 244, 106495, DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106495.

Gizatullin A.T., Alexeenko N.A., Moiseewa N.A. Ispolzovanie dannyh distantsionnogo zondirovaniya dlya preduprezhdeniya vozgoranij torforazrabotok [Using remote sensing data to monitor peat field fires], *Vestn. Mosk. Unta, Ser. 5, Geogr.,* 2020, no. 2, p. 45–52. (In Russian)

Glukhova T.V., Sirin A.A. Losses of soil carbon upon a fire on a drained forested raised bog, *Eurasian soil science*, 2018, vol. 51, no. 5, p. 542–549.

Kettridge N., Turetsky M., Sherwood J. et al. Moderate drop in water table increases peatland vulnerability to post-fire regime shift, *Scientific Reports*, 2015, no. 5, 8063, DOI: 10.1038/srep08063.

Kopoteva T.A., Kuptsova V.A. Effect of fires on the functioning of phytocenoses of peat bogs in the Middle-Amur lowland, *Russian journal of ecology,* 2016, vol. 47, no. 1, p. 11–18.

Malashchuk A.A. Philippov D.A. Postpirogennaya dinamika rastitelnogo pokrova verhovogo bolota Barskoe (Vologodskaya oblast) [Post-pyrogenic dynamics of the vegetation cover of the Barskoe raised bog (Vologda Region, Russia)], *Ecosystem Transformation,* 2021, no. 4(1), p. 104–121. (In Russian)

Moore P.A., Lukenbach M.C., Kettridge N. et al. Peatland water repellency: Importance of soil water content, moss species, and burn severity, *Journal of Hydrology*, 2017, no. 554, p. 656–665.

Moskovchenko D.V., Aref'ev S.P., Moskovchenko M.D., Yurtaev A.A. Spatio-temporal analysis of wildfires in the forest tundra of Western Siberia, *Contemporary problems of ecology*, 2020, vol. 13, no. 7, p. 193–203.

Nastavleniya gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam, *vyp. 8, Gidrometeorologicheskiye nablyudeniya na bolotakh* [Manual for hydrometeorological stations and centers, vol. 8, Hydro-meteorological observations at bogs], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 360 p. (In Russian)

Sinyutkina A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics, *Catena*, 2021, no. 205, 105464, DOI: 10.1016/j.catena.2021.105464.

Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Maloletko A.A., Magur M.G., Kharanzhevskaya Y.A. Transformatsiya poverhnosti i rastitelnogo pokrova osushennyh verhovyh bolot yugo-vostoka Zapadnoj Sibiri [Transformation of the surface and vegetation cover of drained bogs in the south-east of Western Siberia], *Tomsk State University Journal of Biology*, 2018, vol. 43, p. 196–223, DOI: 10.17223/19988591/43/10. (In Russian)

Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Koronatova N.G. et al. Post-fire ecological consequences within the drained site of the Great Vasyugan Mire: retrospective water-thermal regime and pyrogenic disturbance estimation, *IOP Conference Series: Earth Environment Science,* 2020, vol. 408, 012037.

Sirin A.A., Makarov D.A., Gummert I., Maslov A.A., Gul'be Ya.I. Depth of peat burning and carbon losses during an underground forest fire, *Contemporary problems of ecology*, 2020, vol. 13, no. 7, p. 769–779.

Sizov O.S., Tsymbarovich P.R., Ezhova E.V., Soromotin A.V., Prikhodko N.V. Otsenka postpirogennoj dinamiki tundrovoj rastitelnosti na severe Zapadnoj Sibiri za poslednie 50 let (1968–2918) na osnove dannyh DZZ detalnogo I vysokogo razresheniya [Assessment of the post-pyrogenic dynamics of tundra vegetation in the northern part of Western Siberia over the past 50 years (1968–2018) based on detailed and high resolution remote sensing data], *Current problems in remote sensing of the Earth from space,* 2020, vol. 17, no. 4, p. 137–153. (In Russian)

Taminskas J., Linkeviciene R., Simanauskiene R. et al. Climate change and water table fluctuation: Implications for raised bog surface variability, *Geomorphology*, 2018, no. 304, p. 40–49, DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.12.026.

Thompson D.K., Waddington J.M. Wildfire effects on vadose zone hydrology in forested boreal peatland microforms, *Journal of Hydrology*, 2013, no. 486, p. 48–56.

Vomperskii S.E., Glukhova T.V., Smagina M.V., Kovalev A.G. Usloviya i posledstviya pozharov v sosnyakah na osushennyh bolotah [The conditions and consequences of fires in pine forests on drained bogs], *Russian Journal of Forest Science,* 2007, no. 6, p. 35–44. (In Russian)

Web sources

Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Shvets N.V. Opisanie massiva dannykh mesyachnykh summ osadkov na stantsiyakh rossii: svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh no. 2015620394 [Description of the data array of monthly precipitation amounts at Russian stations: certificate of state registration of the database no. 2015620394], URL: http://meteo.ru/it/178-aisori (access date 14.02.2022).

FIRMS (Fire Information for Resource Management System), URL: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov (access date 10.02.2022).

Received 09.03.2023
Revised 23.07.2023
Accepted 06.10.2023

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 551.462 + 911.2

РЕЛЬЕФ ДНА ОБСКОЙ ГУБЫ КАРСКОГО МОРЯ

А.А. Ермолов[1], Г.А. Кажукало[2], А.И. Носков[3], С.А. Огородов[4]

[1, 2, 4] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория геоэкологии Севера*
[3] *Маргбургский университет, географический факультет, лаборатория климатологии и дистанционного зондирования Земли, Германия*

[1] *Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ermolov@geogr.msu.ru*
[2] *Техник; e-mail: kazhukalo@geogr.msu.ru*
[3] *PostDoc; e-mail: a@n-kov.com*
[4] *Гл. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: ogorodov@geogr.msu.ru*

В развитии многолетних исследований авторов в статье представлены результаты углубленного изучения рельефа дна Обской губы Карского моря, уточняющие существующие представления и направленные на решение фундаментальной проблемы реконструкции условий формирования рельефа дна мелководных заливов Карского моря в позднем плейстоцене и голоцене. Целью работы являлось создание региональной характеристики геоморфологического строения дна Обской губы. В качестве исходных данных о рельефе дна использовались морские навигационные карты и промерные планшеты ГУНиО масштаба 1:50 000 – 1:100 000. На основе ручной авторской обработки и интерпретации картографического материала была создана детальная цифровая модель рельефа (ЦМР) дна и батиметрическая карта с сечением изобат через 1,0 м масштаба 1:200 000. При составлении геоморфологической карты помимо батиметрических данных был привлечен большой объем литературных и фондовых материалов по геоморфологии, геологии и геокриологии региона, а разработка оригинальной морфогенетической легенды велась с учетом сложившихся представлений об условиях формирования рельефа перигляциальных равнин на регрессивном этапе развития шельфа Карского моря. Установлено, что в пределах губы преобладает реликтовый флювиальный рельеф, частично переработанный субаквальными процессами в ходе послеледниковой трансгрессии и на современном этапе. Выявлены важнейшие особенности строения и плановые очертания затопленной пра-долины Оби и древней эрозионной гидросети в целом. Выделенные отдельные формы и элементы рельефа учитывают масштаб объектов и степень их генерализации на карте и дают представление о развитии рельефообразующих процессов как на субаэральном этапе, так и в субаквальных условиях, включая особенности современной динамики рельефа берегов и дна.

Ключевые слова: эстуарий, рельеф дна, цифровая модель рельефа, геоморфологическая карта, история развития рельефа

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.7

ВВЕДЕНИЕ

Обская губа Карского моря представляет собой мелководный залив Карского моря, вдающийся в сушу более чем на 800 км. Наибольшая ширина губы достигает 95 км, наименьшая – между мысами Каменный и Парусный – 35 км, общая протяженность береговой линии более 1800 км. По своему происхождению Обская губа – эстуарий, сформировавшийся в ходе послеледниковой трансгрессии. В течение девяти месяцев в году акватория Обской губы покрыта льдом. Высота волн в летне-осенний период обычно не превышает 1–2 м, на выходе в открытое море достигает 3–4 м. Направление и интенсивность постоянных, приливных, ветровых и иных течений в значительной степени обусловлены влиянием стока рек Оби и Таза и, как и колебания уровня моря, характеризуются ярко выраженной сезонной изменчивостью. Влияние приливов наиболее заметно в северной части губы, с учетом сгонно-нагонных явлений амплитуда колебаний уровня на отдельных участках может достигать 3,0 м.

Освоение разведанных месторождений углеводородного сырья и строительство объектов транспортной и добычной инфраструктуры в Обской губе имеет ключевое значение для обеспечения прогнозируемых объемов российской добычи и повышения гибко-

сти экспортных поставок газа и газового конденсата. Крупнейшие интегрированные проекты по добыче, сжижению и реализации газа «Ямал СПГ» и «Арктик СПГ 2» уже запущены. Завершено строительство подводного перехода магистрального газопровода «Газ Ямала» на участке Новый Порт – Ямбург. На очереди обустройство месторождения Каменномысское-море, ключевым объектом которого станет специальная ледостойкая платформа в центральной части Обской губы, связанная с берегом системой трубопроводов. Оценка условий строительства и риска развития опасных процессов природного и техногенного характера невозможна без учета рельефа дна, истории его формирования и современной динамики.

Масштабные изыскательские и научно-исследовательские работы способствовали накоплению большого объема сведений о различных компонентах природной среды. В исследованиях принимали участие такие организации, как ПНИИИС, АМИГЭ, ААНИИ, МГУ имени М.В. Ломоносова, НПО «Моринжгеология» и многие другие. Существенный вклад в изучение геокриологических и инженерно-геологических условий, литодинамической обстановки внесли исследования 2005–2009 гг. ФГУП «ВНИИОкеангеология» [Слинченков и др., 2009]. Тем не менее опубликованные материалы о рельефе дна Обской губы и рельефообразующих процессах немногочисленны [Ласточкин, 1977; Суздальский, 1983; Попов и др., 1988; Бирюков, Совершаев, 1998; Бирюков и др., 2008]. Не до конца ясными остаются геокриологические условия Обской губы [Трофимов и др., 1980; Дубиков, 2002; Баду, 2011; Рокос и др., 2019; Кокин, Цвецинский, 2013; Рекант, Васильев, 2011], требуют уточнения данные о литологическом составе донных осадков и развитии опасных ледово-экзарационных процессов [Огородов, 2011].

Дискуссионными остаются многие вопросы палеогеографии региона и история развития долины пра-Оби. По некоторым оценкам, плиоцен-четвертичные эвстатические колебания уровня моря сопровождались существенной перестройкой гидросети, и пра-Обь в эпоху максимальной плиоценовой регрессии впадала в Байдарацкую губу [Ласточкин, 1977; Гатауллин, 1991]. В позднем плейстоцене и голоцене рельеф перигляциальных равнин формировался в условиях деградации оледенения [Матишов, 1987; Бирюков, Совершаев, 1998], трансгрессивного повышения уровня моря и дифференцированных тектонических движений земной коры [Баранская, 2015]. Сочетание этих факторов определило особые условия рельефообразования и осадконакопления на окраине материка и привело к формированию специфических форм рельефа и отложений [Бирюков и др., 1989, 2008; Авенариус и др., 2001; Суздальский, 1983; Жигарев и др., 1984; Попов и др., 1988], изучение которых является важной задачей фундаментальной науки.

Настоящее исследование направлено на решение вопроса формирования рельефа дна мелководных заливов Карского моря в позднем плейстоцене и голоцене и имеет целью создание региональной характеристики геоморфологического строения дна Обской губы (рис. 1). С этой целью выполнен комплексный геоморфологический и палеогеографический анализ условий и факторов развития перигляциального шельфа, разработана ЦМР дна, проведено среднемасштабное геоморфологическое районирование и картографирование центральной части губы в масштабе 1:200 000.

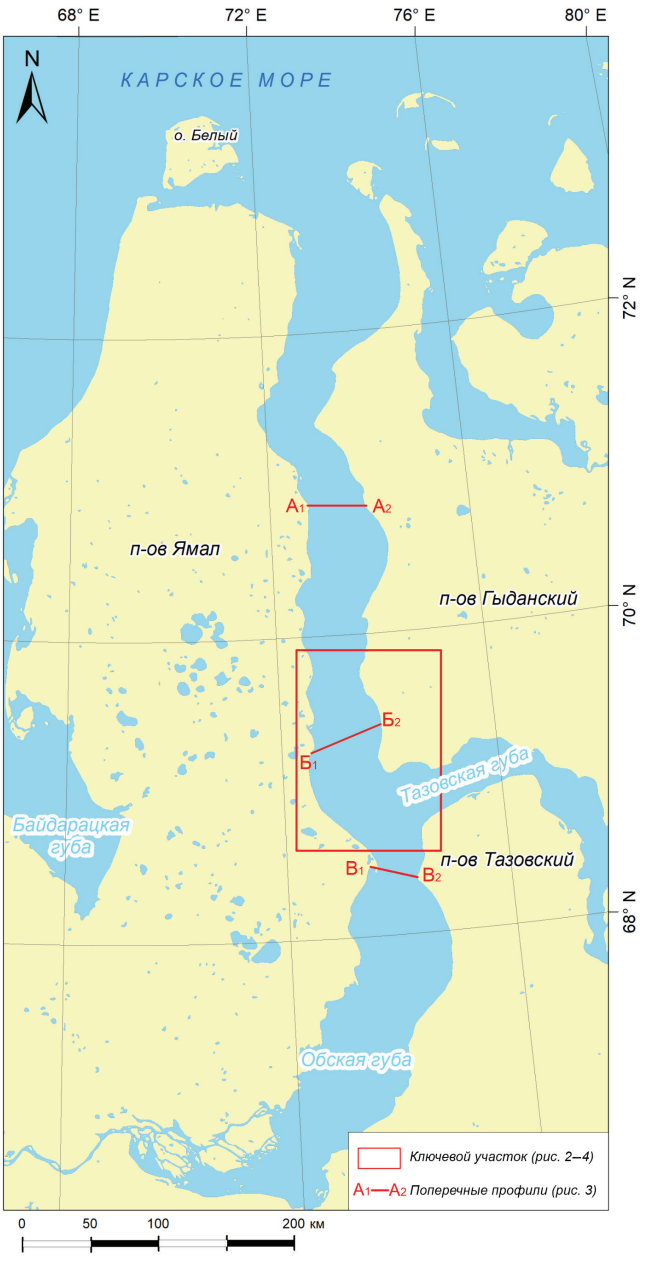


Рис. 1. Местоположение района работ

Fig 1. Location of the study area

При отсутствии доступных для исследователей геологических и океанографических данных геоморфологическая карта является одним из важнейших источников информации о предполагаемом залегании геологических тел, характере распространения донных осадков и реликтов многолетнемерзлых пород, воздействии морских льдов на дно и многом другом. Поэтому особое внимание уделялось вопросам получения достоверной информации о рельефе дна и формированию детальной батиметрической модели рельефа, учитывающей особенности строения и развития отдельных шельфовых областей Карского моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Создание цифровой модели рельефа дна Обской губы – батиметрической карты масштаба 1:200 000 (рис. 2) – выполнялось по оригинальной методике, включающей несколько этапов и основанной на ручной авторской обработке и интерпретации картографического материала [Ласточкин, 1982; Никифоров и др., 2007]. В качестве исходных данных об отметках глубин были использованы морские навигационные карты ГУНиО МО РФ масштаба 1:50 000 – 1:100 000. Планово-картографическая основа формировалась на базе навигационной карты масштаба 1:200 000. Картографическое оформление, привязка, оцифровка и редакция авторских оригиналов карт выполнены в среде MapInfo Professional.

Благодаря достаточно крупному масштабу батиметрической карты, удалось не только уточнить, но и существенно детализировать донный рельеф, выявить отдельные формы и их элементы. Соответственно увеличилась и степень информативности геоморфологической карты Обской губы, впервые составленной в масштабе 1:200 000. Помимо батиметрических данных для создания карты был привлечен большой объем литературных и архивных материалов по геоморфологии, геологии и палеогеографии Карского моря с целью выявления морфоструктурных особенностей и генезиса отдельных форм рельефа. Береговая зона изучалась в ходе полевых работ в разные годы, при этом широко использовались данные дистанционного зондирования Земли, фондовые и литературные данные.

Оригинальная морфогенетическая легенда к карте разрабатывалась с учетом сложившихся представлений об условиях формирования рельефа арктических окраин и результатов исследований морфологии дна Печорского моря и Байдарацкой губы Карского моря [Авенариус и др., 2001; Бирюков и др., 2008; Бирюков, Огородов, 2003; Печорское море…, 2003; Павлидис и др., 2007]. Морфогенетический подход позволил охватить все важнейшие особенности рельефа с учетом масштаба объектов и степени их генерализации на карте, а пространственно-временной анализ дополнил общую картину его развития. Важно подчеркнуть, что разработанная карта может быть основой и для других тематических карт Обской губы, таких как карта современных донных осадков, интенсивности воздействия ледяных образований на дно, динамики берегов и др.

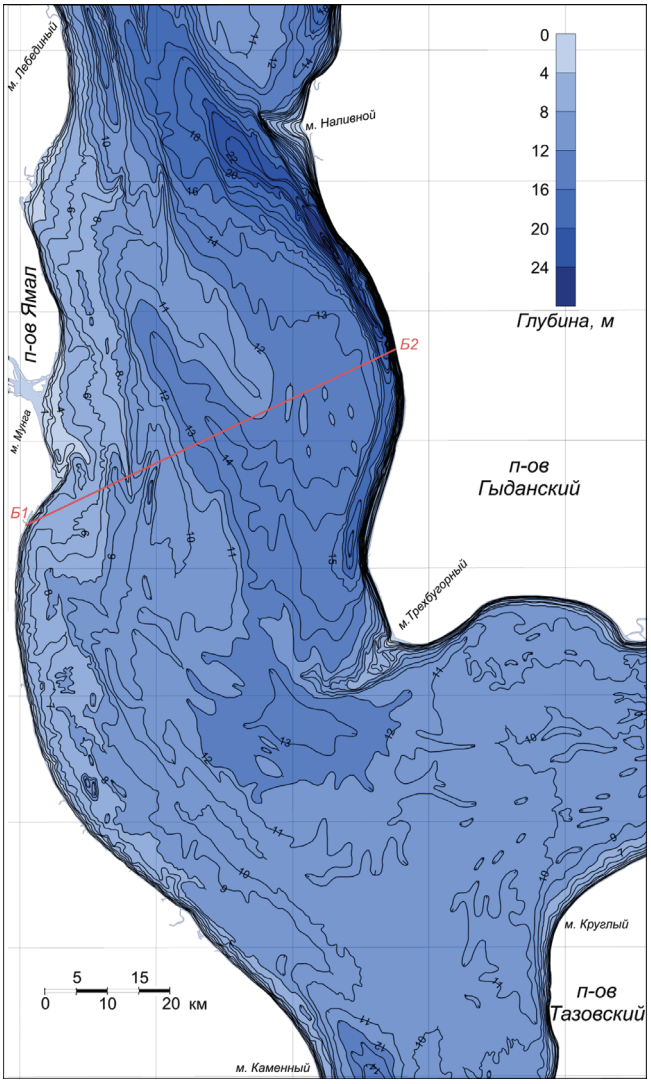


Рис. 2. Фрагмент батиметрической карты Обской губы Карского моря (центральная часть, масштаб оригинала 1:200 000, горизонтали проведены через 1 м)

Fig. 2. Bathymetric map fragment of the Ob Gulf, Kara Sea (central part, original scale 1:200 000, contour lines are drawn every 1 m)

На заключительном этапе геоморфологического картографирования выполнено описание донного рельефа с целью создания региональной характеристики геоморфологического строения дна Обской губы, определения механизмов и основных этапов рельефообразования. Кроме того, с помощью бати-

метрической карты был построен ряд поперечных гипсометрических профилей и проведено трехмерное моделирование рельефа (рис. 3), которое обладает рядом несомненных преимуществ перед плоскими изображениями и является традиционным средством отображения подводных равнин. Наглядная визуальная оценка морфологии и возможность точного морфометрического анализа делают подобные модели удобным инструментом при изучении рельефа, а сама ЦМР является основой для проведения дальнейших прикладных исследований в области геоакустики, геологии, геокриологии, геоморфологии, геофизики и инженерных изысканий. В рамках данного проекта цифровая трехмерная модель рельефа использована в качестве основы для составления геоморфологической карты, отражающей происхождение, возраст и историю развития рассматриваемой территории.

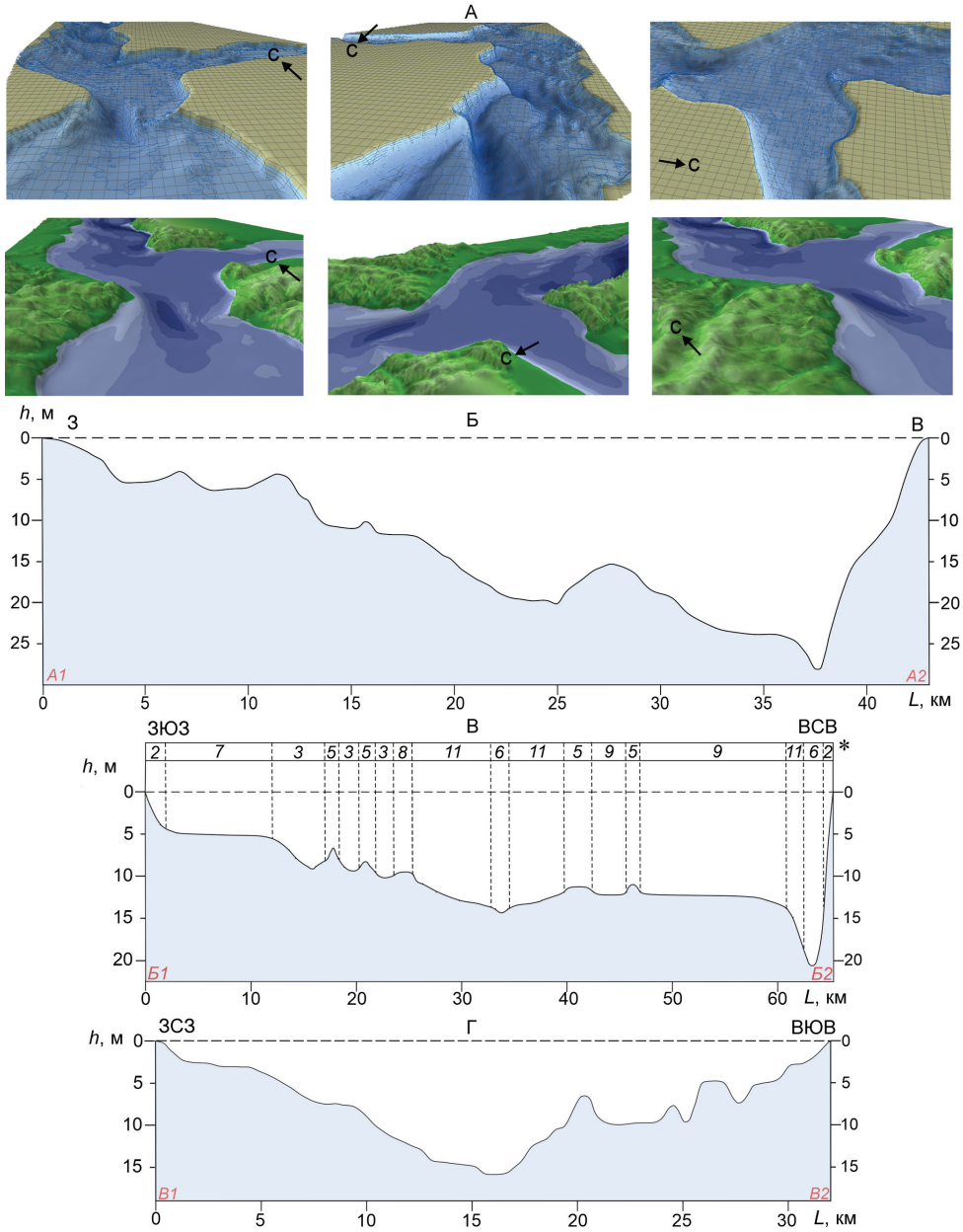


Рис. 3. Отдельные результаты трехмерного моделирования и профилирования рельефа дна Обской губы:
А – фрагменты трехмерной модели рельефа центральной части Обской губы в пределах ключевого участка; Б – поперечный профиль северной части губы по линии $А_1$–$А_2$ (м. Лебединый); В – поперечный профиль центральной части губы по линии $Б_1$–$Б_2$; * – условные обозначения цифровых индексов см. рис. 4; Г – поперечный профиль центральной части губы по линии $В_1$–$В_2$ (коса Каменная – м. Парусный)

Fig. 3. Selected results of the Ob Gulf bottom topography obtained via 3D-modelling and profiling:
А – three-dimensional elevation model fragments of the central part of the Ob Gulf within key area; Б – transverse profile of the northern part of the gulf along the $А_1$–$А_2$ line (cape Lebediny); В – transverse profile of the central part of the gulf along the $Б_1$–$Б_2$ line; * – for legend see fig. 4; Г – transverse profile of the central part of the gulf along the $В_1$–$В_2$ line (Kamennaya Spit – cape Sailing)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Геоморфологическое строение дна. Обская губа представляет собой затопленную в ходе послеледниковой (фландрской) трансгрессии древнюю долину реки Оби, фрагменты которой и образуют наиболее крупные формы донного рельефа субаэрального происхождения, сочетающиеся с современными формами субаквального генезиса (рис. 4). Более мелкие субаэральные и полигенетические формы рельефа представлены фрагментами затопленных дельт с частично перемытыми протоками и островами, а также локальными положительными формами.

Основные типы рельефа дна условно можно разделить на две основные группы. К первой относятся пологонаклонные прибрежные морские равнины (аккумулятивные или абразионно-аккумулятивные) в зоне современного волнового воздействия (подводный береговой склон). Ко второй – слабонаклонные преимущественно аккумулятивные морские равнины вне зоны современного волнового воздействия, в пределах которых прослеживаются фрагменты древнего субаэрального рельефа.

Пологонаклонные прибрежные морские равнины (аккумулятивные и абразионно-аккумулятивные) в зоне современного волнового воздействия. Морфологически хорошо выраженной и в известной мере обособленной формой рельефа Обской губы является подводный береговой склон, включающий в том числе авандельту реки Оби. Нечеткая нижняя граница прибрежных аккумулятивных и абразионно-аккумулятивных равнин зоны современного волнового воздействия представляет собой линию перегиба наклонной поверхности берегового склона, переходящего в относительно ровное уплощенное дно. Нередко переход сопровождается изменением гранулометрического состава донных осадков. В соответствии с различной волновой активностью эта условная граница выделяется на глубинах от 6–8 м в южной части губы до 10–12 м в ее средней и северной частях.

В верхней части подводного берегового склона в областях аккумуляции выделяются обширные ветровые и приливные осушки. Аккумулятивные ветровые (сгонные) осушки формируются преимущественно под воздействием талассогенных факторов и достигают максимальных размеров (ширина 0,5–1,0 км и более) в южной дельтовой области, в приустьевых областях рек и зонах конвергенции вдольбереговых потоков наносов, особенно у восточного побережья полуострова Ямал и в самой северной части губы. Ширина приливных осушек редко превышает 50–100 м, сокращаясь на приглубых участках до 20–50 м, относительные превышения в их пределах составляют 0,4–0,6 м [Belova et al., 2023]. Нередко эти регулярно осушаемые поверхности осложнены серией пологовыпуклых береговых валов и межваловых понижений с изменчивой морфологией, как в пространстве, так и во времени. Поперечное перемещение наносов в приурезовой зоне связано также с многочисленными ложбинами, ориентированными согласно направлению приливно-отливных, сгонно-нагонных и волновых течений. Глубина этих образований может достигать 0,5–1,0 м, а ширина – десятков метров. На приустьевых участках рек осушки и подводный склон осложнены каналами стока речных вод.

На участках аккумуляции наряду с широкими осушками развиты бары, подводные валы и косы, а также их подводные продолжения, сформированные при более низком уровне моря. Интересной особенностью Обской губы является существование своеобразной вертикальной зональности в развитии ряда надводных и подводных аккумулятивных форм. Особенно ярко это проявляется на восточном берегу губы – почти все надводные формы (приустьевые выступы, наволоки и отдельные береговые валы) здесь либо не имеют четко выраженной вдольбереговой направленности (например, у мысов Штормовой, Ханарасаля, Харсе), либо вытянуты в южном направлении (как и большинство кос на западном берегу). Это указывает на преобладающее вдольбереговое перемещение наносов с севера на юг в верхней части подводного склона. В нижней же части подводного берегового склона аккумулятивные формы ориентированы преимущественно на север, согласно направлению стокового течения реки Оби. Этому способствуют ветры южной четверти, создающие пониженный уровенный фон, в результате чего в зону волнового воздействия и транспорта наносов вовлекается нижняя часть подводного склона. В результате в пределах подводного берегового склона формируются два разнонаправленных яруса: верхний с береговыми аккумулятивными формами, ориентированными к югу, и нижний, где аккумулятивные формы направлены к северу. В пределах западной береговой области эта особенность отмечается главным образом на участке севернее устья р. Тамбей.

Подводный береговой склон самой южной, наиболее мелководной части Обской губы (средние глубины 3–4 м) от морского края дельты Оби и примерно до широты Нового Порта представляет собой современную авандельту и является зоной интенсивной аккумуляции. Однако сохранившиеся фрагменты бывших проток и дельтовых островов позволяют выделить здесь затопленную часть субаэральной пра-дельты Оби, сформированной при стоянии уровня на 2–3 м ниже современного.

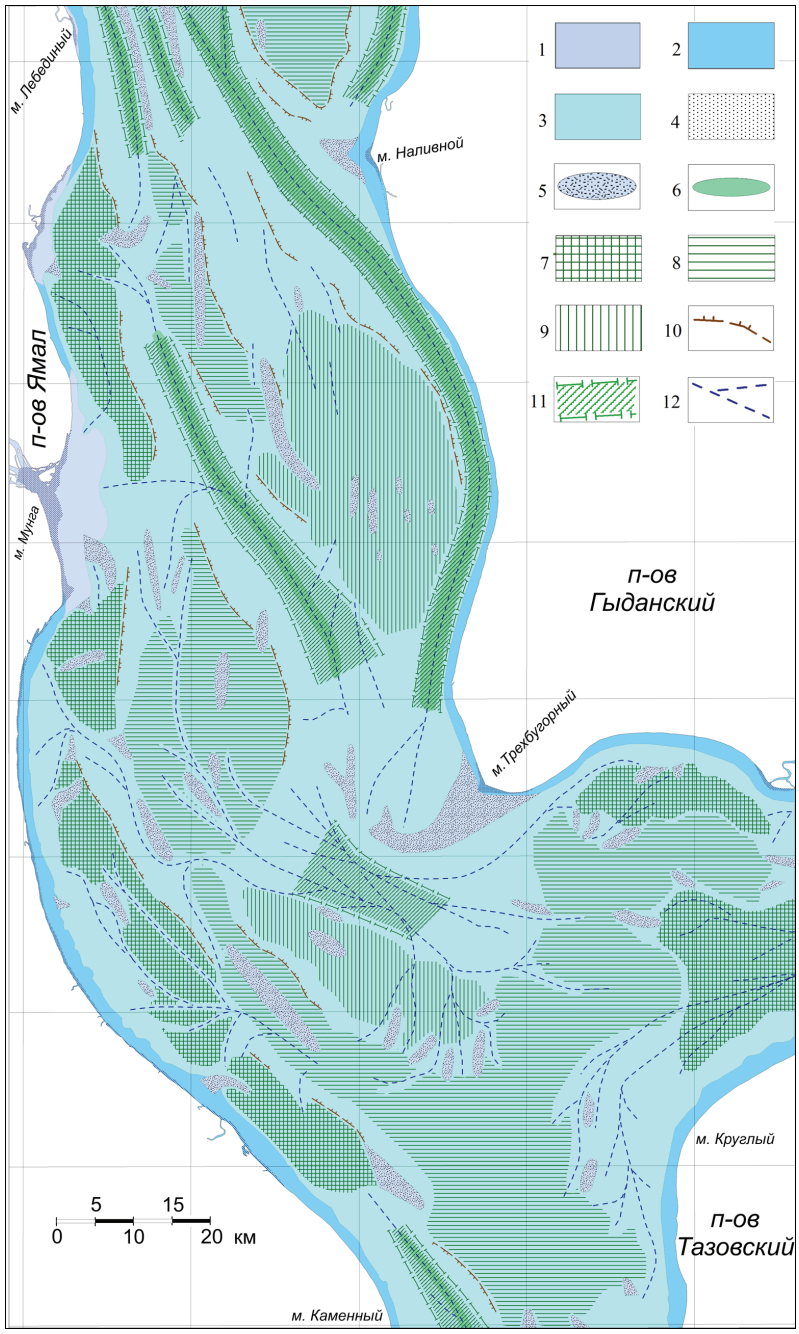


Рис. 4. Фрагмент геоморфологической карты Обской губы Карского моря (центральная часть, масштаб оригинала 1:200 000).

Основные типы рельефа дна: А – пологонаклонные прибрежные морские равнины в зоне современного волнового воздействия (подводный береговой склон) (Q_4): 1) аккумулятивные (мелководья, закрытые лагуны и заливы); 2) абразионно-аккумулятивные; Б – слабонаклонные морские равнины вне зоны современного волнового воздействия (Q_{3-4}): 3) преимущественно аккумулятивные. *Отдельные формы и элементы рельефа дна:* В – морские (Q_4): 4) ветровые и приливные осушки; 5) донные аккумулятивные формы (валы, банки); Г – фрагменты древнего субаэрального рельефа (Q_{3-4}): 6) ложбины (предположительно фрагменты затопленных русел); террасовые уровни на глубинах: 7) 5–9 м; 8) 9–11 м; 9) 11–14 м; 10) эрозионные уступы; 11) днища долин; Д – прочие обозначения: 12) тальвеги

Fig. 4. Geomorphological map fragment of Ob Gulf, Kara Sea (middle part, original scale 1:200 000).

The main types of bottom relief: А – gently sloping coastal plains in the zone of modern wave action (offshore) (Q_4): 1) accumulative (shallow waters, closed lagoons and bays); 2) erosional-accumulative; Б – gently inclined plains beyond modern wave action zone (Q_{3-4}): 3) predominantly accumulative.

Individual features and elements of the bottom relief: В – marine (Q_4): 4) wind and tidal flats; 5) seafloor accumulative landforms (spits, bars); Г – fragments of the relict subaerial landforms (Q_{3-4}): 6) hollows (presumably fragments of flooded riverbeds); terraced levels at depths of: 7) 5–9 m; 8) 9–11 m; 9) 11–14 m; 10) erosional scarps; 11) bottoms of valleys; Д – other designations: 12) thalwegs

Заметим, что в современной дельте реки Оби, представляющей собой эстуарно-дельтовую систему выполнения узких и длинных ингрессионных заливов (губ в Западной Сибири) [Морфодинамика..., 2017; Коротаев, Поморцев, 2022], промоины на продолжении русел проток достигают глубины 12–17 м, тогда как отметки окружающей донной поверхности не превышают в среднем 1–3 м. Сама дельта многорукавная только в западной и северо-восточной частях, на юге же простирается необычайно широкая (до 20 км) Надымская Обь, сохраняющая черты эстуария [Берега, 1991]. По данным повторных аэрофотосъемок и промеров придельтовый участок южной части Обской губы – баровый район устьевого взморья Оби в пределах береговой зоны ее надводной дельты, находится последние 60–70 лет в состоянии динамического равновесия и испытывает незначительные флуктуации в зависимости от изменчивости речного стока [Коротаев, 2012].

На участках промышленного освоения берега и дно Обской губы подвергаются интенсивному техногенному воздействию при строительстве гидротехнических сооружений и подходных каналов (р-н порта Сабетты, терминала «Утренний» и др.). Данные батиметрической съемки поверхности дна многолучевыми эхолотами свидетельствуют о существенных изменениях морфологии, уклонов поверхности, особенно на участках выемки грунта и дноуглубительных работ. Строительство причалов, молов и ледозащитных конструкций ведет к перестройке потоков вдольберегового транспорта наносов, формированию зон размыва и аккумуляции, активизации береговых процессов и изменениям положения линии берега [Belova et al., 2023].

Слабонаклонные, преимущественно аккумулятивные морские равнины вне зоны современного волнового воздействия. Большую часть дна Обской губы вне зоны активного волнового воздействия занимают слабонаклонные, преимущественно аккумулятивные равнины, осложненные отдельными формами субаэрального и субаквального рельефа. В целом поверхность дна достаточно выровненная, несмотря на многочисленные песчаные банки – Вилькицкого (Северные), Прохорова, Опасная, а также банки вблизи мысов Хэсаля, Хонарасаля и Трехбугорный. По оценкам специалистов в пределах этих положительных форм рельефа в северной части губы могут сохраняться реликты многолетнемерзлых пород [Рокос и др., 2019], свидетельствующие о субаэральном этапе морфолитогенеза этой территории в период развития последней крупной позднеплейстоценовой регрессии и на начальных этапах фландрской трансгрессии [Авенариус и др., 2001; Каплин, Селиванов, 1999]. В условиях широкого распространения многолетнемерзлых пород и пониженного базиса эрозии прогрессировало врезание рек. Это привело к глубокому эрозионному расчленению поверхности осушенного шельфа и увеличению сноса терригенного материала с суши в результате активизации криогенных, эоловых и склоновых процессов.

В ходе последующей трансгрессии рельеф и отложения пра-долины Оби подвергались переработке гидрогенными процессами, интенсивность которых во многом определялась скоростью относительного поднятия уровня моря и его ледовитостью, а также объемами обломочного материала, поступающего главным образом от переработки берегов и дна. В результате многие черты субаэрального рельефа были утрачены или оказались погребены под молодыми аллювиально-морскими осадками, устойчивая неволновая аккумуляция которых продолжается в наши дни на фоне дифференцированных новейших тектонических движений [Баранская, 2015] и повышения уровня Мирового океана.

В современном рельефе дна сохранились неглубокие эрозионные врезы, флювиальный генезис которых устанавливается по характерной морфологии и непосредственной связи некоторых из них с пра-тальвегами и устьями рек, впадающих в море. Ширина этих ложбин изменяется от 0,5 до 4–8 км, максимальная глубина не превышает 2–3 м. Ориентированы они согласно уклонам поверхности и образуют в плане рисунок речной сети с выраженными отрезками погребенной пра-долины Оби. Общую картину дополняют террасовые уровни, положение которых в пространстве (вдоль осевой части губы, согласно изобатам) и гипсометрические характеристики не оставляют сомнения в их генезисе.

В *северной* части губы в пределах вторично-расчлененной аккумулятивной равнины прослеживается несколько крупных, в значительной степени погребенных современными осадками фрагментов древних русел шириной до 4,5–5 км, максимальная глубина которых не превышает 25–27 м (профиль $А_1$–$А_2$, рис. 3Б). По обоим бортам затопленных долин морфологически хорошо выражены два террасовых уровня с относительным превышением 7–10 и 13–15 м. Слабонаклонная поверхность уровней осложнена древними береговыми аккумулятивными формами разного масштаба и современными эрозионными ложбинами, сформированными под влиянием талассогенных факторов. На участке в створе м. Лебединый сохранились элементы древней дельты, значительно трансформированной к настоящему времени волнами и течениями. По всей видимости, дельта была сформирована при стоянии уровня воды в Обской губе на 9–12 м ниже современного и устанавливается по плановым очертаниям. Аналогичный уровень береговой линии

в морях восточной Арктики датирован временем 7,5–6,7 тыс. лет назад [Бадюков, Каплин, 1979]. К северу от м. Лебединый в створе м. Ханарасаля в рельефе дна также прослеживаются фрагменты древних русел.

В *центральной* части Обской губы на участке слияния с Тазовской губой (в пределах Северо-Каменномысской структуры) древняя долина Оби не имеет четкой морфологической выраженности вследствие массовой аккумуляции тонкозернистого материала в области конвергенции обских и тазовских вод со значительным содержанием взвешенного материала. Здесь преобладают глубины 11–14 м. Рельеф поверхности дна выровненный, аккумулятивный, в южной части осложнен мелкими валами и грядами высотой 0,5–1,0 м. Из субаэральных форм донного рельефа вдоль западного берега сохранилась морфологически слабовыраженная низкая терраса, бровка которой ориентирована в направлении СЗ–ЮВ. Только к северу от м. Трехбугорного прослеживаются два пересекающихся русла, частично заполненные современными осадками. Здесь же выделяются две террасовидные поверхности, уровни которых по отношению к разновысотным тальвегам русел имеют относительные превышения соответственно 9–10 и 13–15 м в одном случае, и 7–13 м – в другом. В узкой части губы между мысами Каменный и Парусный (район структуры Каменномысское-море) на дне сохранился еще один фрагмент древней долины Оби, вытянутый с юга на север и поддерживаемый в настоящее время течениями различного генезиса. Наибольшие глубины вдоль длинной оси структуры достигают 16,6–16,8 м. Этот участок долины имеет два террасовых уровня с относительными высотами 7–8 и 11–13 м (профиль B_1–B_2, рис. 3Г). Террасы прослеживаются по левому и правому бортам долины, их поверхности осложнены современными аккумулятивными формами. Последний фрагмент древней речной длины, выявленный на дне восточнее Нового Порта, почти полностью перекрыт современными осадками и устанавливается по слабовыраженному линейному понижению. На подводном береговом склоне к западу от мыса Парусный выявлено локальное поднятие дна на расстоянии 12–15 км от берега (банки Вилькицкого). В осенний период ледообразования здесь, как и на мелководье у м. Трехбугорного, формируются стамухи и торосы.

Среди субаквальных донных форм рельефа выделяются хорошо выраженные крупные линейные углубления, выработанные стоковыми течениями. Не исключено, однако, что эти углубления образовались на месте субаэральной речной сети. Особый интерес представляет *южная* часть губы (участок расширения к югу от створа коса Каменная – м. Парусный). Здесь на фоне уплощенного, выровненного современной аккумуляцией дна отмечается серия невысоких субширотно ориентированных волнообразных гряд. Они сложены илистым материалом, в длину достигают нескольких десятков километров, в высоту – до 1,0 м. Образование этих гряд, по-видимому, обусловлено конвергенцией течений из южной и северной частей губы, в результате чего энергия их взаимно гасится и взвесь оседает на дно, образуя упомянутые гряды. Их пространственное расположение обусловлено соотношением скоростей стокового течения реки Оби с юга и преимущественно нагонных и приливных течений с севера. Изменение стока Оби обусловливает миграцию зоны контакта «северных» и «южных» вод, а соответственно и указанную зону гряд в целом можно рассматривать как мигрирующую в зависимости от конкретной гидрологической обстановки (водность года, межень, паводок, сгон, нагон и т. п.) границу заметного литодинамического эффекта стокового течения Оби.

Подобные формы отмечаются и в пределах Обской газоносной структуры, расположенной в 30 км к югу от м. Парусный у восточного берега Обской губы. Глубины на этой площади колеблются от 7,2 до 9,6 м. В рельефе прослеживаются серии слабовыраженных поперечных (ориентированных с запада на восток) донных гряд, сложенных илистым материалом. Относительная высота этих форм от 0,2 до 1,0 м. Определенную роль в их формировании играют, по-видимому, приливные и суммарные сгонно-стоковые течения. Также в рельефе прослеживается относительно крупная субширотно ориентированная ложбина глубиной 1,0–1,5 м, разделяющая поверхность дна над Обской газоносной структурой на две части. По-видимому, ложбина также является фрагментом древней эрозионной сети.

Наряду с различиями морфологии северной, центральной и южной частей губы отмечается ярко выраженная асимметрия поперечного профиля (см. рис. 3), обусловленная действием силы Кориолиса и проявляющаяся во многих чертах строения подводных береговых склонов западного и восточного берегов. Это одна из наиболее характерных особенностей морфологии Обской губы, отмечавшаяся ранее [Лоция, 1939; Земцов, 1976].

Западный (Ямальский) берег почти на всем протяжении отмелый и низкий. Средняя высота береговых уступов близка 4 м (от 2 до 7–12, редко 15–20 м), а средние уклоны подводного берегового склона равны 0,001–0,002 (от 0,0004 до 0,004). На низкие, преимущественно аккумулятивные берега приходится 64% длины береговой линии. Восточный берег значительно более высокий и приглубый. Средняя высота береговых уступов составляет 14 м, средние значения уклонов подводного берегового

склона 0,004–0,005, максимальные – 0,007–0,01. Низкие аккумулятивные берега здесь менее развиты, а на долю обрывистых, подмываемых морем уступов высотой до 35–50 м приходится 62% протяженности линии берега. При общей слабой расчлененности западного и восточного берегов губы западный отличается большей изрезанностью, наличием крупных аккумулятивных форм типа кос, вытянутых в южном направлении и переходящих в подводные отмели (например, коса Каменная), образуемых ими бухт и изгибов береговой линии. На восточном берегу подобные крупные формы вторичного расчленения практически не развиты. В южной (придельтовой) области берег наиболее отмелый (уклоны менее 0,002–0,0005) и, по существу, представляет собой морской край современных субаэральных дельт Оби и Надыма.

Донные осадки. *Пологонаклонные прибрежные морские равнины (аккумулятивные и абразионно-аккумулятивные) в зоне современного волнового воздействия.* В пределах подводного берегового склона с поверхности распространены наиболее пестрые по гранулометрическому составу прибрежно-морские осадки, представленные исключительно терригенным песчано-илистым материалом. Основными источниками поступления наносов являются твердый речной сток и продукты разрушения берегов. Дополнительное поступление осадков осуществляется с ледовыми, фазовыми, гравитационными, эоловыми и биогенными процессами. Общим для всех этих процессов является сезонная ритмичность проявления. Динамика наносов обусловлена волнением и течениями, моделирующим вдольбереговое и поперечное перемещение, а также экзарационным воздействием и ледовым разносом осадков, объемы которого могут быть сопоставимы с объемами волнового транспорта.

Прибрежно-морские осадки подразделяются на три фации: *волноприбойную*, соответствующую верхней, наиболее динамичной полосе береговой зоны (включая мелководья и приустьевые области крупных рек) и отличающуюся наилучшей сортировкой и наибольшей крупностью песчаных осадков; фацию *нижней части подводного берегового склона*, представленную почти несортированными осадками смешанного песчано-алевритового состава, свидетельствующую об ослабленном и эпизодическом волновом воздействии на дно; *бухтовую*, приуроченную к мелким заливам и бухтам с ослабленным волновым режимом, где формируются плохо сортированные песчанистые мелкоалевритовые осадки с повышенным содержанием растительного органического вещества.

Слабонаклонные, преимущественно аккумулятивные морские равнины вне зоны современного волнового воздействия. По мере нарастания глубин и удаления от устья реки Оби решающую роль в переносе наносов начинают играть приливно-отливные, стоковые и другие течения. Пески, пылеватые супеси и легкие суглинки встречаются лишь на отдельных положительных формах рельефа дна, где они характеризуются разной, но в целом меньшей сортированностью по сравнению с отложениями на прибрежных участках. Вся остальная поверхность дна занята алевритами, пелитами или осадками переходного и смешанного типа на их основе. Мощность этих отложений не менее 10–20 м, причем современные аллювиально-морские и лагунно-морские осадки подстилаются погребенными древнеаллювиальными, как правило, тонкозернистыми осадками [Слинченков и др., 2009; Мотычко и др., 2011; Рокос и др., 2020].

Авандельтовые осадки южной части губы формируются почти исключительно за счет взвешенных наносов рек Оби, Надыма, Пура и Таза. Закономерные изменения гранулометрического состава с увеличением глубины и ослаблением влияния речного стока по мере удаления от Обской дельты подчеркиваются сменой сортировки песчано-алевритовых осадков в сторону ее ухудшения.

Эстуарные, сложные по составу песчано-алеврито-глинистые осадки распространены на днище осевой ложбины Обской губы, в том числе над Северо-Каменномысской и Каменномысской структурами. Формируются они наносами из различных источников при существенном воздействии приливных и сгонно-нагонных течений. Наиболее распространены почти несортированные алевритовые отложения смешанного типа, накапливающиеся в обстановке нестабильной и относительно слабой активности водной среды. На их фоне отдельными узкими полосами или пятнами, приуроченными к бортам наиболее глубоких ложбин и склонам некоторых поднятий дна, развиты существенно более грубозернистые несортированные осадки, характер которых указывает на достаточно активную динамику с периодическими размывами и интенсивным перемещением донных наносов. Массовое осаждение тонких взвесей (мельче 0,01 мм) и формирование осадков типа алевритово-глинистых и глинистых илов отмечается в средней части губы. Область их развития совпадает с зоной миграции придонного галофронта, что позволяет связывать эту фацию осадков с коагуляцией взвеси в зоне смешения пресной и соленой воды.

Общей особенностью донных осадков рассматриваемой акватории является их высокая (до 6–8%) обогащенность органическим веществом, которое присутствует не только в рассеянных формах, но также в форме прослоев растительного де-

трита и торфа [Мотычко и др., 2011; Рокос и др., 2020]. Разложение органики приводит к высокой насыщенности донных отложений его газообразными продуктами, прежде всего метаном.

Отсутствие валов и других выраженных форм донного рельефа за пределами подводного берегового склона (на глубинах свыше 10–12 м), характерных для участков интенсивного переноса осадков во взвешенном состоянии, подтверждают сравнительно высокую стабильность отложений на этих глубинах.

Криогенное строение донных осадков в Обской губе изучено крайне слабо и фрагментарно. Известно, что в субаквальных условиях происходит перестройка температурного поля мерзлых пород, обусловливающая в данном случае протаивание отложений, деградацию ММП, уничтожение криогенного рельефа. Однако в береговой зоне, примерно до изобаты 2 м, эти процессы протекают медленно, так как образующийся здесь припайный лед смерзается с донными осадками и формируется так называемый «сезонно-мерзлый козырек», представляющий определенную опасность для инженерных объектов. При этом промерзание и/или протаивание отложений зависит от соотношения температур придонного слоя воды и температур замерзания поровых вод подводных отложений, что определяется в основном их минерализацией. Определяющее же значение имеют рельеф и уклоны подводного берегового склона, а также мощность снежно-ледового покрова. По данным бурения на мысе Каменном (западный берег Обской губы) ширина зоны сезонного промерзания может достигать 300 м на отмелых берегах. При этом кровля многолетнемерзлых пород закономерно понижается в мористом направлении и на расстоянии 400 м от берега залегает на глубине 11 м от поверхности дна [Кокин, Цвецинский, 2013]. Сплошность вдольбереговых зон распространения многолетнемерзлых пород может нарушаться таликами, образовавшимися напротив устьев впадающих (впадавших) в губу рек. На большей части акватории Обской губы развит сплошной талик [Рокос и др., 2019].

Ледово-экзарационный микрорельеф дна. Завершая краткое описание рельефа и осадков дна, нельзя не упомянуть о микроформах, сформированных экзарационным воздействием деформированных морских льдов [Огородов, 2011]. Как известно, динамическая деформация ледяного покрова и его нагромождения в виде различных образований (наслоения, отдельные торосы, гряды торосов, несяки и стамухи) являются характерными для Обской губы и могут занимать до ⅔ площади акватории в зависимости от особенностей атмосферной циркуляции в тот или иной сезон. Под влиянием течений и ветра подводные части ледяных образований могут внедряться в донный грунт, образуя борозды и углубления различной глубины, ширины, протяженности и ориентировки. По своей морфологии они отличаются от форм волнового генезиса, вследствие чего хорошо дифференцируются геофизическими методами [Огородов и др., 2013].

Степень сохранности и продолжительность существования экзарационных борозд на дне определяется литологическим составом и мощностью неконсолидированных донных осадков. Как правило, на мелководье борозды нивелируются при первых сильных волнениях в безледный период, с глубиной сохранность форм возрастает. В силу преобладания слабоконсолидированных сильнообводненных илистых грунтов на дне Обской губы борозды ледового выпахивания достаточно быстро «затекают» и теряют форму.

ВЫВОДЫ

Геоморфологическое строение дна Обской губы Карского моря в полной мере отражает последовательное изменение условий морфолитогенеза в позднем плейстоцене и голоцене, начиная с субаэрального этапа развития осушенной перигляциальной равнины вплоть до настоящего времени, включая признаки неравномерного подъема уровня моря, деятельности береговых и флювиальных процессов. Сохранившиеся в рельефе фрагменты древних русел, частично заполненные современными осадками, и террасовые уровни флювиального генезиса являются наиболее крупными формами донного рельефа субаэрального происхождения. Более мелкие субаэральные и полигенетические формы рельефа представлены фрагментами затопленных дельт с частично перемытыми протоками и островами, а также локальными положительными формами. Все мелкие аккумулятивные и эрозионные формы сформированы на современном этапе развития этого мелководного залива эстуарного типа в условиях сложного взаимодействия талассогенных и флювиальных факторов.

Сохранность реликтовых субаэральных форм рельефа дна во многом обусловлена интенсивностью дельтовой седиментации р. Оби и в целом возрастает по мере удаления от устья. Наиболее выраженные в морфологическом отношении эрозионные формы представлены в северной части губы, тогда как в центральной и южной частях вследствие массовой аккумуляции материала в области конвергенции донных течений, обских и тазовских вод, рисунок древней флювиальной сети выражен менее отчетливо.

Благодарность. Исследование проведено при поддержке РНФ (проект 22-17-00097).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авенариус И.Г., Ермолов А.А., Мысливец В.И., Репкина Т.Ю. Рельеф и некоторые аспекты палеогеографии позднего валдая – голоцена в районе о. Варандей (Баренцево море) // Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перигляциала: сб. ст. / под ред. Э.В. Шипилова. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 2001. С. 135–147.

Баду Ю.Б. Геологическое строение криогенной толщи севера Западной Сибири // Инженерная геология. 2011. № 1. С. 40–56.

Бадюков Д.Д., Каплин П.А. Изменения уровня на побережье дальневосточных и арктических морей СССР за последние 15 000 лет // Океанология. 1979. Т. 19. Вып. 4. С. 674–679.

Баранская А.В. Роль новейших вертикальных тектонических движений в формировании рельефа побережий Российской Арктики: автореф. дис. … канд. геогр. наук. СПб., 2015. 26 с.

Берега / П.А. Каплин, О.К. Леонтьев, С.А. Лукьянова, Л.Г. Никифоров. М.: Мысль, 1991. 479 с.

Бирюков В.Ю., Дунаев Н.Н., Павлидис Ю.А. Осадочный чехол и развитие Западно-Карского шельфа в кайнозое // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1989. № 3. С. 53–59.

Бирюков В.Ю., Ермолов А.А., Огородов С.А. Рельеф дна Байдарацкой губы Карского моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2008. № 3. С. 80–84.

Бирюков В.Ю., Огородов С.А. Рельеф дна Печорского моря // Труды Ин-та океанологии РАН. 2003. № 4. С. 105–110.

Бирюков В.Ю., Совершаев В.А. Геоморфология дна Карского моря // Динамика арктических побережий России / под ред. В.И. Соломатина и др. М.: Географический факультет МГУ, 1998. С. 102–115.

Гатауллин В.Н. Марресальская свита Западного Ямала – отложения дельты пра-Оби // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода (КИЧП). 1991. № 60. С. 53–61.

Дубиков Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. М.: ГЕОС, 2002. 246 с.

Жигарев Л.А., Новиков В.Н., Попов Б.А., Совершаев В.А. Исследование береговой зоны Арктических морей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1984. № 3. С. 45–50.

Земцов Л.А. Геоморфология Западно-Сибирской равнины. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1976. 343 с.

Каплин П.А., Селиванов А.О. Изменения уровня морей России и развитие берегов: прошлое, настоящее, будущее. М.: ГЕОС, 1999. 299 с.

Кокин О.В., Цвецинский А.С. Геокриологическое строение подводного берегового склона Обской губы в зоне контакта с припаем // *Вести газовой науки.* 2013. № 3(14). С. 67–69.

Коротаев В.Н. Сравнительный анализ позднеголоценовых и современных речных дельт Северной Евразии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2012. № 1. С. 52–59.

Коротаев В.Н., Поморцев О.А. Устьевые системы крупных рек арктического побережья России: типизация, геоморфология и история формирования // Вестник Северо-Восточного федерального ун-та им. М.К. Аммосова. Серия «Науки о Земле». 2022. № 4. С. 59–76.

Ласточкин А.Н. Методы морского геоморфологического картографирования. Л.: Недра, 1982. 272 с.

Ласточкин А.Н. Рельеф дна Карского моря // Геоморфология. 1977. № 2. С. 84–91.

Лоция Карского моря. Ч. II. Обь-Енисейский район. Л.: Изд-во ГУСМП, 1939. 314 с.

Матишов Г.Г. Мировой океан и оледенение Земли. М.: Мысль, 1987. 270 с.

Морфодинамика устьевых систем крупных рек арктического побережья России: атлас / отв. ред. В.Н. Коротаев, Г.И. Рычагов, Н.А. Римский-Корсаков. М.: АПР, 2017. 148 с.

Мотычко В.В., Опекунов А.Ю., Константинов В.М., Андрианова Л.Ф. Основные черты морфолитогенеза в северной части Обской губы // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2011. № 1. С. 67–80.

Никифоров С.Л., Островский Д.Б., Павлидис Ю.А., Селезнев И.А. История развития рельефа шельфа Арктики и создание цифровой модели морского дна // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 1(3). С. 66–75.

Огородов С.А. Роль морских льдов в динамике рельефа береговой зоны. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. 173 с.

Огородов С.А., Шестов А.С., Архипов В.В., Баранская А.В., Вергун А.П., Кокин О.В., Марченко А.В., Цвецинский А.С. Современный ледово-экзарационный рельеф на шельфе Западного Ямала: натурные исследования и моделирование // Вестник Новосибирского гос. ун-та. Серия: Математика, механика, информатика. 2013. Т. 13. № 3. С. 77–89.

Павлидис Ю.А., Никифоров С.Л., Огородов С.А., Тарасов Г.А. Печорское море: прошлое, настоящее, будущее // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 927–939.

Печорское море. Системные исследования / под ред. Е.А. Романкевича, А.П. Лисицына, М.Е. Виноградова. М.: Море, 2003. 486 с.

Попов Б.А., Совершаев В.А., Новиков В.Н., Бирюков В.Ю., Камалов А.М., Федорова Е.В. Береговая зона морей Печорско-Карского региона // Исследование устойчивости геосистем Севера / под ред. В.И. Соломатина. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. С. 176–190.

Рекант П.В., Васильев А.А. Распространение субаквальных многолетнемерзлых пород в Карском море // Криосфера Земли. 2011. Т. XV. № 4. С. 72–75.

Рокос С.И., Костин Д.А., Куликов С.Н. Субаквальные многолетнемерзлые породы Обской и Тазовской губ Карского моря // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 5. С. 17–26.

Рокос С.И., Куликов С.Н. Скурихин В.Н., Соколов В.П. Стратиграфия и литология верхней части разреза акватории Обской и Тазовской губ Карского моря // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2020. № 7. С. 164–167.

Слинченков В.И., Самойлович Ю.Г., Николаев В.В., Константинов В.М. Строение кайнозойских отложений северной части Обской губы Карского моря по акустическим данным // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 2. С. 106–117.

Суздальский О.В. Заложение долин Баренцево-Карского бассейна в позднем кайнозое // Россыпеобразование на Арктическом шельфе. Л.: Севморгеология, 1983. С. 115–127.

Трофимов В.Т., Баду Ю.Б., Дубиков Г.И. Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород

Западно-Сибирской плиты. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. 246 с.

Belova N., Ermolov A., Novikova A., Ogorodov S., Stanilovskaya Y. Dynamics of Low-Lying Sandy Coast of the Gydan Peninsula, Kara Sea, Russia, Based on Multi-Temporal Remote Sensing Data, *Remote Sensing*, 2023, vol. 15, no. 1, p. 48.

Поступила в редакцию 27.04.2023
После доработки 14.08.2023
Принята к публикации 06.10.2023

SEAFLOOR MORPHOLOGY OF THE OB RIVER GULF, KARA SEA

A.A. Ermolov[1], G.A. Kazhukalo[2], A.I. Noskov[3], S.A. Ogorodov[4]

[1, 2, 4] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Research Laboratory of Geoecology of the North*
[3] *University of Marburg (Germany), Faculty of Geography, Laboratory for Climatology and Remote Sensing*

[1] *Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ermolov@geogr.msu.ru*
[2] *Lab assistant; e-mail: kazhukalo@geogr.msu.ru*
[3] *PostDoc; a@n-kov.com*
[4] *Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: ogorodov@geogr.msu.ru*

The article presents the results of an extensive study of the bottom topography of the Ob River Gulf in the Kara Sea, which is a follow-up to the long-term studies of the authors. It refines the existing ideas and aims at solving a fundamental problem of reconstructing the conditions for the formation of bottom topography in the shallow bays of the Kara Sea in the Late Pleistocene and Holocene. The work aims to create a regional characteristic of the geomorphologic structure of the Ob River Gulf bottom. The initial data on the bottom topography were taken from marine navigational maps and sounding boards at a scale of 1:50 000 – 1:100 000. We processed and interpreted the collected cartographic material to create a detailed DEM of the bottom and a bathymetric map at a scale of 1:200 000 with an isobaths interval of 1 m. In addition to bathymetric data, the compilation of a geomorphologic map engaged a large amount of literature and stock materials on geomorphology, geology, and geocryology of the region. The original morphogenetic legend was elaborated with due account of current ideas regarding the conditions for the formation of periglacial plains relief at the regressive stage of the Kara Sea shelf evolution. It was found that the relict fluvial relief prevails within the gulf and was partly modified by subaqueous processes during post-LGM transgression and the current epoch. We have indicated the most critical features of the structure and pattern of the flooded pra-valley of the Ob River, as well as the total ancient erosion network. The selected individual forms and relief elements take into account the scale of objects and the degree of their generalization on the map and give an idea of the development of relief-forming processes both at the subaerial stage and under subaqueous conditions, including specific features of modern dynamics of the coastal and bottom relief.

Keywords: estuary, seafloor topography, digital elevation model, geomorphologic map, geomorphic evolution

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 22-17-00097).

REFERENCES

Avenarius I.G., Ermolov A.A., Myslivets V.I., Repkina T.Yu. [Morphology and some paleogeographical aspects of late Valday – Holocene near the Varandey island, Barents Sea], *Sedimentologicheskie protsessy i evolyutsiya morskikh ekosistem v usloviyakh morskogo pereglyatsiala, sb. st.* [Sedimentological processes and evolution of marine ecosystem in marine periglacial settings, proc.], Apatity, KNTs RAS Publ., 2001, p. 135–147. (In Russian)

Badu Yu.B. Geologicheskoe stroenie kriogennoi tolschi severa Zapadnoi Sibiri [Geological structure of cryogenic sediments at Western Siberia north], *Inzhenernaya geologiya,* 2011, no. 1, p. 40–56. (In Russian)

Badyukov D.D., Kaplin P.A. Izmeneniya urovnya na poberezh'e dal'nevostochnykh i arkticheskikh morei SSSR za poslednie 15 000 let [Changes in sea-level of Arctic and Pacific seas of the USSR over the last 15 000 years], *Okeanologiya*, 1979, vol. 19, no. 4, p. 674–679. (In Russian)

Baranskaya A.V. *Rol' noveishikh vertikal'nykh tektonicheskikh dvizhenii v formirovanii rel'efa poberezhij Rossiiskoi Arktiki* [Role of recent vertical tectonic movements in relief formation on the Russian Arctic coasts], Ph.D. Thesis in Geography, St. Petersburg, 2015, 26 p. (In Russian)

Belova N., Ermolov A., Novikova A., Ogorodov S., Stanilovskaya Y. Dynamics of Low-Lying Sandy Coast of the Gydan Peninsula, Kara Sea, Russia, Based on Multi-Temporal Remote Sensing Data, *Remote Sensing*, 2023, vol. 15, no. 1, p. 48.

Berega [Coasts], P.A. Kaplin, O.K. Leont'ev, S.A. Luk'yanova, L.G. Nikiforov (eds.), Moscow, Mysl' Publ., 1991, 479 p. (In Russian)

Biryukov V.Yu., Dunaev N.N., Pavlidis Yu.A. Osadochnyi chekhol i razvitie Zapadno-Karskogo shel'fa v kainozoe [Sedimentary cover and evolution of Western Kara Sea shelf during Cenozoic], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 1989, no. 3, p. 53–59. (In Russian)

Biryukov V.Yu., Sovershaev V.A. [Seafloor geomorphology of the Kara Sea], *Dinamika arkticheskikh poberezhij Rossii* [Dynamics of the Arctic coasts of Russia], V.I. Solomatin (ed.), Moscow, Geograficheskii fakul'tet MGU Publ., 1998, p. 102–115. (In Russian)

Biryukov V.Yu., Ogorodov S.A. Rel'ef dna Pechorskogo morya [Seafloor morphology of the Pechora Sea], *Tr. In-ta okeanologii RAN*, 2003, no. 4, p. 105–110. (In Russian)

Biryukov V.Yu., Ermolov A.A., Ogorodov S.A. Rel'ef dna Baidaratskoi guby Karskogo morya [Bottom relief of the Baydaratskaya Bay, inlet Kara Sea], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2008, no. 3, p. 80–84. (In Russian)

Gataullin V.N. Marresal'skaya svita Zapadnogo Yamala – otlozheniya del'ty pra-Obi [Marresale strata of the Western Yamal – sediments of the pra-Ob' River delta], *Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period (Byull. KIChP)*, 1991, no. 60, p. 53–61. (In Russian)

Dubikov G.I. *Sostav i kriogennoe stroenie merzlykh tolshch Zapadnoi Sibiri* [Sediments and cryogenic structure of Western Yamal frozen stratas], Moscow, GEOS Publ., 2002, 246 p. (In Russian)

Zhigarev L.A., Novikov V.N., Popov B.A., Sovershaev V.A. Issledovanie beregovoi zony Arkticheskikh morei [Research of the coastal zone of Arctic seas], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.,* 1984, no. 3, p. 45–50. (In Russian)

Zemtsov L.A. *Geomorfologiya Zapadno-Sibirskoi ravniny* [Geomorphology of the Western Siberia plain], Tomsk, Tomsk university Publ., 1976, 343 p. (In Russian)

Kaplin P.A., Selivanov A.O. *Izmeneniya urovnya morei Rossii i razvitie beregov: proshloe, nastoyashchee, budushchee* [Sea-level change of Russian seas and coastal evolution: past, present and future], Moscow, GEOS Publ., 1999, 299 p. (In Russian)

Kokin O.V., Tsvetsinskii A.S. Geokriologicheskoe stroenie podvodnogo beregovogo sklona Obskoi guby v zone kontakta s pripaem [Geocryological structure of the Ob River Gulf submarine nearshore slope in the landfast ice zone], *Vesti gazovoi nauki*, 2013, no. 3(14), p. 67–69. (In Russian)

Korotaev V.N. Sravnitel'nyi analiz pozdnegolotsenovykh i sovremennykh rechnykh del't Severnoi Evrazii [Comparative analysis of the late Holocene and present-day river deltas of Northern Eurasia], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2012, no. 1, p. 52–59. (In Russian)

Korotaev V.N., Pomortsev O.A. Ustjevye sistemy krupnyh rek arkticheskogo poberejya Rossii: tipizatsiya, geomorfologiya i istoriya formirovaniya [Mouth systems of large rivers of the arctic coast of Russia: typification, geomorphology and the history of formation], *Vestnik of North-Eastern Federal. Un-ty, Earth Sciences*, 2022, no. 4, p. 59–76. (In Russian)

Lastochkin A.N. Rel'ef dna Karskogo morya [Bottom topography of the Kara Sea], *Geomorfologiya*, 1977, no. 2, p. 84–91. (In Russian)

Lastochkin A.N. *Metody morskogo geomorfologicheskogo kartografirovaniya* [Marine geomorphologic mapping techniques], Leningrad, Nedra Publ., 1982, 272 p. (In Russian)

Lotsiya Karskogo morya, ch. II, Ob'-Eniseiskii raion [Sailing map of the Kara Sea, pt II, Ob'-Yenisey region], Leningrad, GUSMP Publ., 1939, 314 p. (In Russian)

Matishov G.G. *Mirovoi okean i oledenenie Zemli* [The World Ocean and the Earth's glaciation], Moscow, Mysl' Publ., 1987, 270 p. (In Russian)

Morfodinamika ust'evykh sistem krupnykh rek arkticheskogo poberezh'ya Rossii. Atlas [Morphodynamic of the large rivers deltas of Russian Arctic hinterland. Atlas], V.N. Korotaev, G.I. Rychagov, N.A. Rimskii-Korsakov (eds.), Moscow, APR Publ., 2017, 148 p. (In Russian)

Motychko V.V., Opekunov A.Yu., Konstantinov V.M., Andrianova L.F. Osnovnye cherty morfolitogeneza v severnoi chasti Obskoi guby [Main features of morpholithogenesis in the northern part of the Ob River Gulf], *Vestnik SPb-GU, Ser. 7,* 2011, no. 1, p. 67–80. (In Russian)

Nikiforov S.L., Ostrovskii D.B., Pavlidis Yu.A., Seleznev I.A. Istoriya razvitiya rel'efa shel'fa Arktiki i sozdanie tsifrovoi modeli morskogo dna [Geomorphic evolution of the Arctic shelf and creating a digital bathymetric model], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika,* 2007, no. 1(3), p. 66–75. (In Russian)

Ogorodov S.A. *Rol' morskikh l'dov v dinamike rel'efa beregovoi zony* [The role of sea ice in the coastal dynamics], Moscow, MSU Publ., 2011, 173 p. (In Russian)

Ogorodov S.A., Shestov A.S., Arkhipov V.V., Baranskaya A.V., Vergun A.P., Kokin O.V., Marchenko A.V., Tsvetsinskii A.S. Sovremennyi ledovo-ekzaratsionnyi rel'ef na shel'fe Zapadnogo Yamala: naturnye issledovaniya i modelirovanie [Modern ice-exaration relief on the Western Yamal shelf: field research and modeling], *Vestnik Novosibirskogo gos. Un-ta, Seriya: Matematika, mekhanika, informatika*, 2013, vol. 13, no. 3, p. 77–89. (In Russian)

Pavlidis Yu.A., Nikiforov S.L., Ogorodov S.A., Tarasov G.A. Pechorskoe more: proshloe, nastoyashchee, budushchee [The Pechora Sea: past, present and future], *Okeanologiya*, 2007, vol. 47, no. 6, p. 927–939. (In Russian)

Pechorskoe more. Sistemnye issledovaniya [The Pechora Sea: system studies], E.A. Romankevich, A.P. Lisitsyn, M.E. Vinogradov (eds.), Moscow, More Publ., 2003, 486 p.

Popov B.A., Sovershaev V.A., Novikov V.N., Biryukov V. Yu., Kamalov A.M., Fedorova E.V. [Coastal zone of the Pechora-Kara Seas], *Issledovanie ustoichivosti geosistem Severa* [Investigation in stability of the North geosystems], V.I. Solomatin (ed.), Moscow, MSU Publ., 1988, p. 176–190. (In Russian)

Rekant P.V., Vasil'ev A.A. Rasprostranenie subakval'nykh mnogoletnemerzlykh porod v Karskom more [Spatial distribution of subaqueous frozen sediments in the Kara Sea], *Kriosfera Zemli*, 2011, vol. XV, no. 4, p. 72–75. (In Russian)

Rokos S.I., Kostin D.A., Kulikov S.N. Subakval'nye mnogoletnemerzlye porody Obskoi i Tazovskoi gub Karskogo morya [Subaqueous frozen sediments of the Ob and Taz River gulfs, Kara Sea], *Kriosfera Zemli*, 2019, vol. XXIII, no. 5, p. 17–26. (In Russian)

Rokos S.I., Kulikov S.N., Skurikhin V.N., Sokolov V.P. Stratigrafiya i litologiya verkhnei chasti razreza akvatorii Obskoi i Tazovskoi gub Karskogo moray [Stratigraphy and lithology of the upper outcrop part of the Ob and Taz River gulfs, Kara Sea], *Rel'ef i chetvertichnye*

obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i Severo-Zapada Rossii, 2020, no. 7, p. 164–167, DOI:10.24411/2687-1092-2020-10725. (In Russian)

Slinchenkov V.I., Samoilovich Yu.G., Nikolaev V.V., Konstantinov V.M. Stroenie kainozoiskikh otlozhenii severnoi chasti Obskoi guby Karskogo morya po akusticheskim dannym [Cenozoic sediment structure of the northern part of the Ob River Gulf, Kara Sea, based on acoustic data], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2009, no. 2, p. 106–117. (In Russian)

Suzdal'skii O.V. [Valley formation in the Barents-Kara basin over the late Cenozoic], *Rossypeobrazovanie na Arkticheskom shel'fe* [Placer formation on the Arctic shelf], Leningrad, Sevmorgeologiya Publ., 1983, p. 115–127. (In Russian)

Trofimov V.T., Badu Yu.B., Dubikov G.I. *Kriogennoe stroenie i l'distost' mnogoletnemerzlykh porod Zapadno-Sibirskoi plity* [Cryogenic structure and ice content of Western Siberia's frozen sediments], Moscow, MSU Publ., 1980, 246 p. (In Russian)

Received 27.04.2023
Revised 14.08.2023
Accepted 06.10.2023

Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2024. Т. 79. № 1. С. 103–113

УДК 598.2.9(571.56)

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ НАСЕЛЕНИЯ ПТИЦ ОСТРОВОВ УРУП И ИТУРУП (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)

А.А. Романов[1], **Е.А. Коблик**[2], **Я.А. Редькин**[3]

[1] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кафедра биогеографии*
[2, 3] *Научно-исследовательский Зоологический музей МГУ имени М.В. Ломоносова*

[1] *Профессор, д-р биол. наук; e-mail: putorana05@mail.ru*
[2] *Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: koblik@zmmu.msu.ru*
[3] *Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: yardo@mail.ru*

Проанализирована эколого-географическая дифференциация населения птиц в 18 пунктах островов Уруп и Итуруп. Использован метод маршрутного учета. Суммарно отмечено 109 видов, в т. ч. 62 на двух островах. Коэффициент фаунистической общности между сухопутными местообитаниями островов 72%, прибрежно-морскими – 71%. Коэффициент сходства населения птиц между сухопутными местообитаниями островов 36%, прибрежно-морскими – 29%. Значения плотности населения птиц островов близки как между сухопутными (610–757 ос./км²), так и прибрежно-морскими (536–607 ос./км²) местообитаниями. Высокая плотность населения повсеместно обусловлена обилием численно преобладающих видов дальневосточного островного и китайского типов фаун. Суммарно на совокупность особей видов этих фаун почти повсеместно приходится более 50% населения в сухопутных (282–469 ос./км²) и прибрежно-морских (172–333 ос./км²) местообитаниях. Характерна пространственно-временная динамика населения птиц.

Ключевые слова: авифауна, распространение, местообитание

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.8

ВВЕДЕНИЕ

Проведенные исследования направлены на изучение географии населения птиц и формирование комплексной оценки биоразнообразия островов Уруп и Итуруп, расположенных в южной части Большой Курильской гряды. Наряду с морскими птицами, связанными в основном с окружающими архипелаг акваториями [Артюхин, Бурканов, 1999; Коблик, 2001; Морские ключевые…, 2016], значительное число сухопутных и околоводных видов освоили внутриостровные и прибрежные местообитания [Нечаев, 1969]. При этом даже в обобщающих орнитологических работах сравнительные данные по пространственной дифференциации и структуре населения сухопутных птиц островов Уруп и Итуруп отсутствуют [Воробьев, 1947; Воробьев, 1947; Нечаев, 1969, 2003; Нечаев, Гамова, 2009; Редькин и др., 2021]. Лишь в двух (и пока единственных) публикациях приведены сведения о плотности населения птиц и обилию отдельных видов на о. Уруп [Романов и др., 2020, 2022]. Между тем известно, что, в отличие от относительно стабильной в пространстве и времени авифауны, население птиц значительно более динамично [Равкин и др., 2022]. Анализ динамики количественных параметров населения птиц позволяет выявлять быстрые изменения в орнитоценозах, идентифицировать пространственную динамику реальной (количественной) роли того или иного вида в освоении островных местообитаний и формировании островных сообществ в целом. Особенно актуальным и перспективным представляется сравнение формирования и динамики населения птиц двух соседних островов в контексте проблемы влияния биоты востока континентальной Азии на биоразнообразие островов. В нашем случае острова Итуруп, биота которого испытала последствия соединения с материком в прошлом, и острова Уруп, формировавшегося в условиях изоляции от материковой суши. Наша работа направлена на познание пространственной организации биоты и оценку разнообразия птиц как одних из наиболее значимых элементов островных экосистем.

Цель работы – сравнительный анализ структуры населения птиц островов Уруп и Итуруп в свете эколого-географических закономерностей его формирования. Основные задачи: 1) выявление видового состава островной авифауны; 2) определение параметров населения птиц в сухопутных и прибрежно-морских местообитаниях (обилие видов, плотность населения, состав и значимость многочисленных видов); 3) установление пространственной дифференциации фауны и населения птиц; 4) сравнение населения птиц двух островов в основных типах островных местообитаний.

Физико-географическая характеристика района исследований. Итуруп – крупнейший остров (3170 км^2), Уруп – четвертый по величине (1511 км^2) в составе Курильской островной гряды. Отделены друг от друга проливом Фриза шириной 40 км [Атлас…, 2009]. Рельеф островов сформирован горными кряжами вулканического происхождения с вершинами более 1000 м над уровнем моря. Климат типично океанический. Лето прохладное, дождливое, с температурой воздуха не выше +20°C. Широко развита речная сеть. Выражена высотная поясность растительности [Воробьев, 1963]. В обследованных пунктах о. Итуруп верхний ярус леса в различных пропорциях формируют береза каменная (Эрмана) (*Betula ermanii* (Cham.)), береза широколистная (*Betula platyphylla* Sukaczev), пихта сахалинская (*Abies sachalinensis* (F. Schmidt) Mast), лиственница курильская (*Larix kurilensis* Mayr), дуб курчавенький (*Quercus crispula* Blume), тополь Максимовича (*Populus maximowiczii* A. Henry), калопанакс семилопастный (*Kalopanax septemlobus* (Thunb.) Koidz.), ильм лопастный (*Ulmus laciniata* (Trautv.) Mayr), ольховник Максимовича (*Duschekia maximowiczii* (Callier) Pouzar), ольха волосистая (*Alnus hirsuta* (Spach) Rupr.), рябина смешанная (*Sorbus commixta* (Hedl.)), несколько видов кленов (*Acer*) и ив (*Salix*). Средний и нижний ярусы представляют собой сплошные чащобные заросли из бамбука курильского (*Sasa kurilensis* (Rupr.) Makino & Shibata) с фрагментарным участием кедрового стланика (*Pinus pumila* (Pall.) Regel), тиса остроконечного (*Taxus cuspidata* Siebold et Zucc. ex Endl.), падубов морщинистого (*Ilex rugosa* F. Schmidt) и городчатого (Ilex crenata Thunb.), рододендрона Чоноски (*Rhododendron tschonoskii* Maxim.), бузины Микеля (*Sambucus miquelii* (Nakai) Kom.), рябины бузинолистной (*Sorbus sambucifolia* (Cham. & Schltdl.) M. Roem.) [Воробьев, 1963].

В обследованных пунктах о. Уруп верхний ярус леса, покрывающего берега рек, формируют деревья высотой до 12 м: береза каменная, ольховник Максимовича, ива удская (*Salix udensis* (Trautv. & C.A. Mey)), рябина смешанная. Средний и нижний ярусы представляют собой сплошные чащобные заросли из бамбука курильского, высокотравья, белокопытника широкого, местами с участием бузины Микеля и рябины бузинолистной. В поймах крестовник коноплелистный (*Senecio cannabifolius* (Less.)), лабазник камчатский (*Filipendula camtschatica* (Pall.) Maxim.), недоспелка мощная (*Cacalia robusta* (Tolm.)), белокопытник широкий, борщевик шерстистый (*Heracleum lanatum* (Michx.)) формируют очень густые высокотравные луга, перемежающиеся с зарослями бамбука курильского и участками высокотравных ивняков из ивы удской.

На обширных пространствах обследованных островов береза каменная, а на о. Итуруп также лиственница курильская формируют мозаично чередующиеся редколесья, небольшие лесные куртины или растут одиночно среди очень густых зарослей кедрового стланика и высокотравья из таволги камчатской (*Filipendula camtschatica* (Pall.) Maxim.), крестовника коноплелистного, недоспелки мощной, лабазника камчатского.

Открытые безлесные территории островов Уруп и Итуруп заняты густым высокотравьем, зарослями кустарников и бамбука курильского. Некоторые вершины сопок покрыты густыми смешанными зарослями (высотой не более 2 м) из приземистого каменноберезового криволесья, кедрового стланика, рябины бузинолистной, ольховника Максимовича, ивы Накамуры (*Salix nakamurana* (Koidz.)), бамбука курильского и плотных куртин разнотравья [Воробьев, 1963].

Обследованная полоса морского побережья представляет собой чередование высоких, сильно расчлененных скалистых обрывов и очень крутых задернованных склонов с густыми зарослями высокотравья (до 2,5 м). Местами формируются широкие песчаные пляжи. Выше пляжей расположены песчаные приморские террасы, заросшие высокотравьем и кустами шиповников, преимущественно шиповника морщинистого (*Rosa rugosa* (Thunb.)) с примесью рябины бузинолистной.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На о. Уруп с 29 августа по 15 сентября 2019 г. и с 18 августа по 2 сентября 2021 г. обследованы п-ова Кастрикум и Ван-дер-Линд, бухты Новокурильская и Песочная, заливы Щукина и Наталии, оз. Токотан. На о. Итуруп с 15 августа по 9 сентября 2022 г. обследованы окрестности поселков Горячие Ключи и Рейдово, территория между г. Курильском и пос. Горячие Ключи, Осенний и Куйбышевский перешейки, бухты Парусная, Торная, Черная, заливы Касатка и Куйбышевский, окрестности вулкана Баранский. Суммарная протяженность пеших учетных маршрутов, проведенных на высотах 0–370 м над ур. моря по методике Ю.С. Равкина [1967], составила 287 км (239 – в сухопутных лесных, кустарниковых и травянистых местообитаниях внутренних частей островов; 48 – на прибрежно-морских участках, включающих побережье и сопредельную морскую акваторию). Высоту местности и длину маршрутов определяли по приборам глобального позиционирования (GPS). Достоверность гнездования определяли по критериям Европейского комитета по учету птиц [The EBCC Atlas…, 1997], учитывая при этом известные данные о статусе пребывания видов на о. Итуруп [Нечаев, 1969, 2003;

Нечаев, Гамова, 2009; Редькин и др., 2021]. Авифауны сравнивались по коэффициенту фаунистической общности Серенсена [Песенко, 1982], население птиц – по коэффициенту сходства населения [Наумов, 1964]. Многочисленными считались виды с обилием более 10 ос./км², обычными – 1–9 ос./км², редкими – менее 0,9 ос./км². Авифауна охарактеризована по типам фаун [Штегман, 1938; Кищинский, 1988; Коблик, 2001; Романов и др., 2022] с учетом широко распространенных видов, имеющих обширный ареал и неясный центр происхождения. В номенклатуре мы следовали сводке Е.А. Коблика, В.Ю. Архипова [2014] с некоторыми коррективами в соответствии с ежегодно обновляемым онлайн-вариантом этой сводки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Плотность населения птиц в сухопутных лесных и кустарниковых местообитаниях о. Уруп 420–902, в среднем – 610 ос./км², на побережье и сопредельной морской акватории – 321–685, в среднем 536 ос./км² [Романов и др., 2020]. Максимальные плотности населения птиц в сухопутных биотопах зарегистрированы в окрестностях бухты Новокурильской на северо-востоке о. Уруп (902 ос./км²), а в прибрежно-морских местообитаниях – в заливе Щукина на юго-западной его оконечности (685 ос./км²). Это обусловлено наличием здесь широкого спектра местообитаний для большого числа лесных, кустарниково-опушечных, луговых, петрофильных видов птиц, а также видов, связанных с внутренними водоемами и морской акваторией. Обилие некоторых видов, широко распространенных по территории о. Уруп, в этих пунктах максимально. Например, обилие большой горлицы (*Streptopelia orientalis* (Latham)), пеночки-таловки (*Phylloscopus borealis* (J.H. Blasius)), черноголовой гаички (*Poecile palustris* (L.)), японской зарянки (*Larvivora akahige* (Temminck)) в лесных и кустарниковых биотопах у бухты Новокурильской составляет 26, 113, 90, 4 ос./км², а в аналогичных местообитаниях других обследованных пунктов о. Уруп не превышает 6, 55, 33, 1 ос./км² соответственно. В противоположность этому обилие каменушки (*Histrionicus histrionicus* (L.)), песочника-красношейки (*Calidris ruficollis* (Pallas)), чернохвостой чайки (*Larus crassirostris* (Vieillot)) на побережье и сопредельной морской акватории залива Щукина составляет 198, 20, 10 ос./км², а в аналогичных местообитаниях бухты Новокурильской и залива Наталии не превышает 34, 6, 1 ос./км² соответственно. Аналогичная закономерность выявлена также и для некоторых исключительно сухопутных птиц, широко распространенных на о. Уруп, но отличавшихся максимальным обилием в береговой полосе залива Щукина. Камчатская трясогузка (*Motacilla lugens* Gloger), соловей-красношейка (*Calliope calliope* (Pallas)), маскированная овсянка (*Ocyris (spodocephala) personatus* (Temminck)) концентрировались здесь в полосе густого высокотравья у основания высокого берегового склона, а кедровка (*Nucifraga caryocatactes* (L.)) и большеклювая ворона (*Corvus macrorhynchos* (Wagler)) – вдоль верхней бровки высокого берегового обрыва, заросшего каменноберезовым криволесьем (высотой 1,5 м), кедровым стлаником, рябиной бузинолистной, бамбуком курильским и разнотравьем. Локальные участки с максимальными показателями обилия в сухопутных местообитаниях о. Уруп выявлены на п-ове Ван-дер-Линд для большого пестрого дятла (*Dendrocopos major* (L.)) (11 ос./км²) и кедровки (78 ос./км²), в окрестностях залива Наталии для орлана-белохвоста (*Haliaeetus albicilla* (L.)) (14 ос./км²), урагуса (*Uragus sibiricus* (Pallas)) (45 ос./км²), маскированной овсянки (106 ос./км²). Локальные участки с максимальными показателями обилия на побережье и сопредельной акватории о. Уруп выявлены в бухте Новокурильской для тихоокеанской чайки (*Larus schistisagus* Stejneger) (41 ос./км²), серокрылой чайки (*Larus glaucescens* (J.F. Naumann)) (173 ос./км²), моевки (*Rissa tridactyla* (L.)) (142 ос./км²).

Плотность населения птиц в лесных местообитаниях разных частей о. Итуруп лежит в интервале 335–1531 ос./км², в мозаичных местообитаниях из леса и редколесий – 644–1292 ос./км², в мозаичных местообитаниях из высокотравья и зарослей кустарников – 340–675 ос./км², составляя в среднем 785, 968, 518 ос./км² соответственно. Плотность населения птиц на побережье и сопредельной морской акватории о. Итуруп 507–746, в среднем 607 ос./км².

У многих видов птиц (n = 22), широко распространенных во всех обследованных сухопутных местообитаниях о. Итуруп, повышенная концентрация выявлена лишь в одном из них. Например, установлено, что обилие большой горлицы, крапивника (*Troglodytes troglodytes* (L.)), золотистого дрозда (*Turdus chrysolaus* (Temminck)), японской зарянки, синехвостки (*Tarsiger cyanurus* (Pallas)), пеночки-таловки, черноголовой гаички, московки (*Periparus ater* (L.)), поползня (*Sitta europaea* (L.)), большеклювой вороны максимально в лесных местообитаниях, обилие белопоясного стрижа (*Apus pacificus* (Latham)), японской завирушки (*Prunella rubida* (Temminck et Schlegel)), бамбуковой широкохвостки (*Horornis diphone* (Kittlitz)), кедровки, урагуса, краснощекого снегиря (*Pyrrhula (pyrrhula) griseiventris* (Lafresnaye)), маскированной овсянки, сизой овсянки (*Ocyris variabilis* (Temminck)) – в мозаичных местообитаниях из леса и редколесий, черного коршуна (*Milvus migrans* (Boddaert)), япон-

ского бекаса (*Gallinago hardwickii* (J.E. Gray)), охотского сверчка (*Locustella ochotensis* (Middendorff)), китайской зеленушки (*Chloris sinica* (L.)) – в мозаичных местообитаниях из высокотравья и зарослей кустарников.

В приморско-береговой полосе о. Итуруп максимальное обилие отмечено не только у водно-околоводных видов, но и некоторых исключительно сухопутных видов птиц. Камчатская трясогузка (*Motacilla lugens* Gloger) и соловей-красношейка в поисках корма концентрировались здесь в полосе густого разнотравья, а в верхней части высокого скалистого берегового обрыва располагались жилые гнездовые колонии восточного воронка (*Delichon dasypus* (Bonaparte)). Полоса концентрации полевого жаворонка (*Alauda arvensis* L.) и гольцового конька (*Anthus rubescens* (Tunstall)) охватывала не только песчаные и травянистые участки морского берега о. Итуруп, но и сопредельные мозаичные местообитания из высокотравья и зарослей кустарников.

Характерно неравномерное размещение большинства видов птиц в пределах каждого из обследованных местообитаний о. Итуруп. Например, в лесных массивах разных частей о. Итуруп (n = 6) обилие перепелятника (*Accipiter nisus* (L.)) варьировало в пределах 0,2–13 ос./км², белопоясного стрижа – 7–144 ос./км², пеночки-таловки – 1–22 ос./км², большеклювой вороны – 2–52 ос./км², урагуса – 1–30 ос./км². В обследованных пунктах (n = 4) с господством высокотравья и зарослей кустарников обилие бамбуковой широкохвостки изменялось в пределах – 5–79 ос./км², китайской зеленушки – 5–168 ос./км², на разных прибрежно-морских участках (n = 3) обилие каменушки составляло 3–20 ос./км², чернохвостой чайки – 3–90 ос./км².

Существенная амплитуда показателей обилия видов на о. Итуруп, вероятно, обусловлена как спецификой экологических условий на локальных участках местообитаний с разным уровнем привлекательности для птиц, так и высокой подвижностью значительной части всего населения птиц. Дело в том, что в период наших наблюдений на о. Итуруп наряду с некоторыми видами, которые еще насиживали кладки (большая горлица), выкармливали птенцов в гнездах (восточный воронок) или слетков вблизи от гнезд (бамбуковая широкохвостка), у абсолютного большинства птиц начались активные кочевки (черноголовая гаичка, ширококлювая мухоловка (*Muscicapa dauurica* Pallas), чиж (*Spinus spinus* (L.)), маскированная овсянка) или шел осенний пролет (гуменник (*Anser fabalis* (Latham)), каменушка, черный коршун, камчатская трясогузка, гольцовый конек, полевой жаворонок).

Высокий уровень пространственно-временной динамики населения птиц на о. Итуруп подтвержден учетами на периодически повторявшемся модельном маршруте (длиной 8 км) по лесу у пос. Горячие Ключи. С 21 августа по 5 сентября 2022 г. плотность населения здесь в разные дни составляла 497–1214 ос./км², а обилие японского бекаса, крапивника, золотистого дрозда, синехвостки, желтоголового королька (*Regulus regulus* (L.)), ополовника (*Aegithalos caudatus* (L.)), поползня, соответственно – 1–10, 5–32, 2–43, 3–40, 1–45, 5–81, 3–39 ос./км². Появление основной массы кочующих особей разных видов, как правило, приурочено к разным календарным датам. При этом конфигурация графика многодневной динамики всего населения птиц в целом представляла собой комбинацию двух волн с соответственно двумя хорошо выраженными максимумами. Наиболее мощные всплески подвижности и обилия кочующих птиц на о. Итуруп проявились 25 августа и 5 сентября 2022 г. Связь повышения числа кочующих птиц с определенными метеорологическими параметрами или их сменой не выявлена.

Итоги проведенных на островах Уруп и Итуруп маршрутных учетов птиц позволяют сделать сравнительный анализ основных параметров населения птиц (табл. 1).

Комплексы видов, зарегистрированные нами на о. Уруп (n = 105) и о. Итуруп (n = 116), составляют соответственно 45 и 49% авифауны Южных Курильских островов (n = 234) [Нечаев, 1969, 2003; Нечаев, Гамова, 2009; Редькин и др., 2021].

Среди всех отмеченных на о. Уруп видов птиц (n = 105) гнездящихся и вероятно гнездящихся – 52 вида (50%), гнездящихся (вероятно гнездящихся) и наблюдавшихся при этом на кочевках или миграциях – 19 видов (18%), кочующих или мигрирующих – 33 вида (31%), залетных – 1 вид (1%), а среди отмеченных на о. Итуруп (n = 116), соответственно, – 71 (62%), 6 (5%), 34 (29%), 5 (4%) видов.

Показатель представленности общей авифауны о. Уруп (n = 105) в отдельных обследованных сухопутных местообитаниях (n = 5) 20–44%, в местообитаниях побережья и сопредельной акватории (n = 3) 25–49%. Показатель представленности общей авифауны о. Итуруп (n = 225) в отдельных обследованных сухопутных местообитаниях (n = 12) 6–18%, в отдельных местообитаниях побережья и сопредельной акватории (n = 3) 5–12%.

Локальные авифауны сухопутных древесно-кустарниковых и травянистых местообитаний (n = 5) о. Уруп насчитывают 21–47 видов, в среднем – 32, в целом – 57 видов, побережья и сопредельной акватории (n = 3) – 26–51 вид, в среднем – 41, в целом – 65 видов [Романов и др., 2020]. Локальные авифауны лесных местообитаний (n = 6) о. Итуруп насчитывают 15–41, в среднем – 31, в целом – 55 видов, мозаичных местообитаний из леса и ред-

колесий (n = 2) – 19–34, в среднем – 26, в целом – 37 видов, мозаичных местообитаний из высокотравья и зарослей кустарников (n = 4) – 22–28, в среднем – 26, в целом – 46 видов, местообитаний побережья и сопредельной акватории (n = 3) – 13–27, в среднем – 21, в целом – 41 вид.

Среди птиц, отмеченных на маршрутных учетах по о. Уруп (n = 85), распространены повсеместно 29 видов (34%), локально – 33 (39%), точечно – 23 (27%), а среди птиц, отмеченных на маршрутных учетах по о. Итуруп (n = 86), соответственно 31 (36%), 29 (34%), 26 (30%).

Таблица 1

Основные параметры населения птиц

Параметры	О. Уруп	О. Итуруп
Общее число отмеченных видов (их доля от всей авифауны Южных Курильских о-вов, %)	105 (45)	116 (50)
Число гнездящихся и вероятно гнездящихся видов, в т. ч. приступивших к послегнездовым кочевкам и миграциям	71	77
Число кочующих и мигрирующих видов	33	34
Число залетных видов	1	5
Число видов, отмеченных на маршрутных учетах, в т. ч. в сухопутных местообитаниях на побережье и прибрежной акватории	85 57 65	86 70 41
Представленность общей авифауны острова в сухопутных местообитаниях отдельных обследованных пунктов, %	20–44	6–18
Представленность общей авифауны острова в местообитаниях побережья и сопредельной акватории отдельных обследованных пунктов, %	25–49	5–12
Число видов в локальных авифаунах сухопутных местообитаний	21–47	15–41
Число видов в локальных авифаунах побережья и сопредельной акватории	26–51	13–27
Число видов, распространенных повсеместно	29	31
Число видов, распространенных локально	33	29
Число видов, распространенных точечно	23	26
Коэффициент фаунистической общности локальных авифаун сухопутных местообитаний	Значение повсеместно близко к 60% или выше	Значение повсеместно близко к 60% или выше
Коэффициент фаунистической общности локальных авифаун побережья и сопредельной акватории, %	55–65	38–55
Коэффициент сходства населения птиц сухопутных местообитаний, %	12–39 (в 50% случаев не выше 19%)	19–48
Коэффициент сходства населения птиц местообитаний побережья и сопредельной акватории, %	18–26	21–52
Плотность населения птиц в сухопутных местообитаниях (min–max, в среднем), ос./км^2	420–902, 610	335–1531, 757
Плотность населения птиц на побережье и сопредельной акватории (min–max, в среднем), ос./км^2	321–685, 536	507–746, 607

Коэффициент фаунистической общности видового состава двух островов, выявленного на учетах, 73%. При этом коэффициент взаимной общности видового состава сухопутных местообитаний островов 72%, а прибрежно-морских – 71%.

Коэффициент общности локальных авифаун сухопутных обследованных участков (n = 5) о. Уруп – 52–77% (в подавляющем большинстве случаев (n = 10) – выше 60%), морского побережья и сопредельной акватории (n = 3) – 55–65%.

Коэффициенты общности локальных авифаун лесных местообитаний (n = 6) о. Итуруп варьируют в пределах 49–78% (в подавляющем большинстве случаев (n = 12) – выше 60%), мозаичных место-

обитаний из леса и редколесий (n = 2) – 60%, мозаичных местообитаний из высокотравья и зарослей кустарников (n = 4) – в пределах 57–73%, морского побережья и сопредельной акватории (n = 3) – в пределах 38–55%. При этом во всех обследованных типах сухопутных местообитаний коэффициент взаимной общности локальных авифаун выше или близок к 60%, что свидетельствует об однородности авифауны каждого типа местообитаний.

Приведенные цифры свидетельствуют о значительном сходстве авифаун островов и о внутренней однородности авифауны каждого из них. В условиях мозаичного сочетания элементов ландшафта с господством лесных, кустарниковых, травянистых растительных ассоциаций и повсеместной сопряженности их горных и равнинных аналогов подавляющее большинство видов птиц освоило их повсеместно, так как не имело непреодолимых преград, препятствующих расселению.

Коэффициент сходства населения птиц двух островов, выявленного на учетах, ниже уровня сходства соответствующих авифаун и между охваченными маршрутными учетами сухопутными местообитаниями островов составил 36%, а между прибрежно-морскими – 29%.

Коэффициенты сходства населения птиц обследованных сухопутных участков (n = 5) о. Уруп составили 12–39% (в 50% случаев (n = 5) не выше 19%), морского побережья и сопредельной акватории (n = 3) – 18–26%. Коэффициенты сходства населения между обследованными лесными местообитаниями (n = 6) о. Итуруп составили 19–48% (в большинстве случаев (n = 9) выше 30%), между мозаичными местообитаниями из леса и редколесий (n = 2) – 22%, между мозаичными местообитаниями из высокотравья и зарослей кустарников (n = 4) – 20–37%, между прибрежно-морскими (n = 3) – 21–52%.

Средняя плотность населения птиц в сухопутных древесно-кустарниковых и травянистых местообитаниях на о. Уруп 610 ос./км², на о. Итуруп – 757 ос./км², что сопоставимо с показателями плотности населения птиц долинных лиственных лесов Южного Сихотэ-Алиня или широколиственных и хвойно-широколиственных лесов Амуро-Сахалинской страны, составляющих соответственно 888 ос./км² [Харченко, 2015] и 556 ос./км² [Равкин и др., 2020].

Средняя плотность населения птиц на побережье и сопредельной морской акватории островов Уруп и Итуруп составляет соответственно 536 и 607 ос./км², тогда как на амуро-сахалинских литоралях – 218 ос./км², а у северо-притихоокеанских морских берегов и в прибрежных водах к югу и северу от пролива Лаперуза – 4–60 ос./км² [Равкин и др., 2020].

Суммарно на двух островах в ходе учетов отмечено 109 видов (47% всей авифауны Южных Курильских островов), из них 47 видов – лишь на одном из островов, 62 – одновременно на двух. Среди последних, как в сухопутных, так и в прибрежно-морских местообитаниях обоих островов зарегистрированы 24 вида, представленные не только повсеместно или локально многочисленными видами (табл. 2), но также редкими или обычными (серая цапля (*Ardea cinerea* (L.)), сапсан (*Falco peregrinus* (Tunstall)), черный коршун, орлан-белохвост, восточный канюк (*Buteo* (*buteo*) *japonicus* (Temminck et Schlegel)), фифи (*Tringa glareola* (L.)), перевозчик (*Actitis hypoleucos* (L.)), ворон (*Corvus corax* (L.))).

Почти все (32 из 34) повсеместно или локально многочисленные виды встречены на обоих островах. Лишь регистрации серокрылой чайки ограничены островом Уруп, а ширококлювой мухоловки – островом Итуруп.

Из 80 видов, отмеченных на учетах в сухопутных местообитаниях, многочисленные виды (n = 26) составляют основу местного населения птиц. На о. Уруп на долю таких видов (n = 21) приходится 86% населения. По вкладу в плотность населения наиболее значимы виды дальневосточного островного (180 ос./км², 36%), китайского (102 ос./км², 19%), сибирского (таежного) (87 ос./км², 16%) типов фауны, а также широко распространенные виды (105 ос./км², 20%). Менее значимы сибирско-американские (29 ос./км², 5%) и пацифические (20 ос./км², 4%) виды. На о. Итуруп на долю многочисленных видов (n = 16) приходится 85% населения. По вкладу в плотность населения наиболее значимы виды китайского (264 ос./км², 41%), дальневосточного островного (205 ос./км², 33%) типов фауны, а также широко распространенные виды (148 ос./км², 23%). Менее значимы сибирско-американские (22 ос./км², 3%) виды и виды сибирского (таежного) (9 ос./км², 1%) типа фауны.

Многочисленны в сухопутных местообитаниях обоих островов 11 видов: белопоясный стриж, гольцовый конек, соловей-красношейка, бамбуковая широкохвостка, черноголовая гаичка, московка, кедровка, китайская зеленушка, урагус, маскированная и сизая овсянки. В сухопутных местообитаниях на о. Уруп многочисленны также сибирский пепельный улит (*Heteroscelus brevipes* (Vieillot)), серокрылая чайка, горная трясогузка (*Motacilla cinerea* (Tunstall)), камчатская трясогузка, крапивник, золотистый дрозд, охотский сверчок, пеночка-таловка, большеклювая ворона, краснощекий снегирь, а на о. Итуруп – большая горлица, полевой жаворонок, ширококлювая мухоловка, ополовник, поползень (см. табл. 2).

Таблица 2

Обилие многочисленных видов птиц, ос./км²

Виды	В среднем в сухопутных местообитаниях о. Уруп	В среднем в сухопутных местообитаниях о. Итуруп	В среднем в прибрежно-морских местообитаниях о. Уруп	В среднем в прибрежно-морских местообитаниях о. Итуруп
Каменушка	–	–	81,6	10,3
Японский баклан	–	–	1,3	51,7
Берингов баклан	–	–	4,7	11,9
Сибирский пепельный улит	11,0	0,01	4,3	0,2
Песочник-красношейка	–	–	10,3	42,3
Чернохвостая чайка	–	–	3,6	45,9
Тихоокеанская чайка	7,5	–	18,7	131,7
Серокрылая чайка	20,2	–	77,4	–
Моевка	–	–	63,3	15,0
Большая горлица	7,0	31,0	0,1	2,7
Белопоясный стриж	51,5	114,2	42,3	53,0
Полевой жаворонок	0,01	16,5	1,6	32,3
Восточный воронок	3,9	8,6	16,3	35,3
Гольцовый конек	28,7	21,7	50,3	43,1
Горная трясогузка	11,0	2,3	0,4	0,7
Камчатская трясогузка	12,3	2,4	56,7	62,1
Крапивник	22,8	6,2	–	–
Золотистый дрозд	11,1	7,2	1,1	0,7
Соловей-красношейка	26,7	9,5	11,3	17,3
Ширококлювая мухоловка	–	21,0	–	–
Бамбуковая широкохвостка	27,0	62,4	0,5	—
Охотский сверчок	38,7	5,4	0,1	0,7
Пеночка-таловка	49,6	7,9	0,2	2,0
Ополовник	5,5	11,1	–	–
Черноголовая гаичка	26,3	48,8	4,3	–
Московка	14,3	44,8	1,1	–
Поползень	6,9	10,8	–	–
Кедровка	31,0	15,7	5,4	–
Большеклювая ворона	23,3	8,6	22,8	–
Китайская зеленушка	13,4	35,4	4,0	4,0
Урагус	14,1	62,4	5,1	2,0
Краснощекий снегирь	10,3	3,2	–	–
Маскированная овсянка	54,9	85,0	15,8	4,7
Сизая овсянка	25,7	57,2	0,4	–

Из 69 видов, отмеченных на учетах в прибрежно-морских местообитаниях, основу местного населения птиц также составляют многочисленные виды (n = 16). На о. Уруп на долю многочисленных видов (n = 12) приходится 87% населения. По вкладу в плотность населения наиболее значимы сибирско-американские виды (132 ос./км², 29%). Существенно суммарное участие в населении представленных почти в равных долях видов дальневосточного островного (91 ос./км², 19%), пацифи-

ческого (77 ос./км², 17%), китайского (81 ос./км², 17%), арктического (74 ос./км², 16%) типов фауны. Крайне незначительна доля видов сибирского (таежного) типа фауны (11 ос./км², 2%), в целом играющих второстепенную роль в местных сообществах птиц. На о. Итуруп на долю многочисленных видов (n = 13) приходится 91% населения. По вкладу в плотность населения наиболее значимы виды дальневосточного островного (245 ос./км², 44%), китайского (88 ос./км², 16%) типов фауны. Менее значимы пацифические (66 ос./км², 12%), арктические (57 ос./км², 10%) и сибирско-американские (53 ос./км², 9%) виды. Крайне незначительна доля видов сибирского (таежного) типа фауны (17 ос./км², 3%) и широко распространенных видов (32 ос./км², 6%).

Многочисленны в прибрежно-морских местообитаниях обоих островов 9 видов: каменушка, песочник-красношейка, тихоокеанская чайка, моевка, белопоясный стриж, восточный воронок, гольцовый конек, камчатская трясогузка, соловей-красношейка. На о. Уруп многочисленны также серокрылая чайка, большеклювая ворона, маскированная овсянка, а на о. Итуруп – японский баклан (*Phalacrocorax capillatus* (Temminck et Schlegel)), берингов баклан (*Phalacrocorax pelagicus* (Pallas)), чернохвостая чайка, полевой жаворонок (см. табл. 2).

ВЫВОДЫ

Суммарно на маршрутных учетах на о-вах Уруп и Итуруп отмечено 109 видов (47% всей авифауны Южных Курильских островов), в т. ч. 62 – на обоих островах.

Коэффициент фаунистической общности видового состава птиц двух островов, выявленного на учетах, высок и составляет 73%, в т. ч. между сухопутными местообитаниями – 72%, прибрежно-морскими – 71%. На однородность авифауны указывает также то, что значения коэффициентов фаунистической общности сухопутных местообитаний в пределах каждого из островов почти повсеместно выше 60%.

Коэффициент сходства населения птиц двух островов ниже уровня сходства соответствующих авифаун и между охваченными маршрутными учетами сухопутными местообитаниями островов составил 36%, между прибрежно-морскими – 29%.

Установлено, что многие параметры структуры населения птиц островов, обследованных в один и тот же фенологический период на учетах существенной и сопоставимой протяженности, имеют сходные количественные и качественные показатели.

Почти одинаково общее число наблюдавшихся видов (на о. Уруп – 105, на о. Итуруп – 116), число видов, зарегистрированных на учетах (на о. Уруп – 85, на о. Итуруп – 86), число видов в локальных авифаунах сухопутных местообитаний (на о. Уруп – 21–47, в среднем – 32, в целом – 57, на о. Итуруп – 15–41, в среднем – 31, в целом – 55).

На о-вах Уруп и Итуруп сходно соотношение гнездящихся и вероятно гнездящихся, кочующих или мигрирующих, залетных видов, на долю которых приходится 67–68, 29–31, 1–4% соответственно.

Сходно также соотношение видов, распространенных повсеместно, локально, точечно, доля которых составляет 34–36, 34–39, 27–30% соответственно.

Весьма близки показатели средней плотности населения птиц островов как в сухопутных древесно-кустарниковых и травянистых (на о. Уруп – 610 ос./км², на о. Итуруп – 757 ос./км²), так и в прибрежно-морских (на о. Уруп – 536 ос./км², на о. Итуруп – 607 ос./км²) местообитаниях.

Почти все (32 из 34) повсеместно или локально многочисленные виды распространены на обоих островах. Среди них 23 вида воробьеобразных (Passeriformes), 6 – ржанкообразных (Charadriiformes), 2 – пеликанообразных (Pelecaniformes), и по одному виду гусеобразных (Anseriformes), голубеобразных (Columbiformes), стрижеобразных (Apodiformes).

Из 80 видов, отмеченных на учетах в сухопутных местообитаниях двух островов, основу местного населения птиц составляют многочисленные виды (n = 26), которые на о. Уруп составляют 86%, на о. Итуруп – 85% населения.

Из 69 видов, отмеченных на учетах в прибрежно-морских местообитаниях двух островов, основу местного населения птиц составляют многочисленные виды (n = 16), которые на о. Уруп составляют 87%, на о. Итуруп – 91% населения.

В сухопутных местообитаниях обоих островов многочисленны 11 видов, а в прибрежно-морских местообитаниях – 9 видов птиц.

На обоих островах высокие показатели плотности населения почти повсеместно обусловлены обилием численно преобладающих представителей дальневосточного островного и китайского типов фаун. В группе многочисленных видов сухопутных местообитаний на о. Уруп они составляют 55% (при суммарном обилии 282 ос./км²), на о. Итуруп – 74% (при суммарном обилии 469 ос./км²). В группе многочисленных видов прибрежно-морских местообитаний на о. Уруп они составляют 36% (при суммарном обилии 172 ос./км²), на о. Итуруп – 60% (при суммарном обилии 333 ос./км²).

Высок уровень пространственно-временной динамики населения птиц. Существенная амплитуда показателей обилия видов обусловлена как спецификой экологических условий на локальных участках местообитаний с разным уровнем привлекательности для птиц, так и высокой подвижностью значительной части всего населения птиц.

Благодарности. Авторы благодарны Министерству обороны Российской Федерации и Русскому географическому обществу за организацию экспедиций «Восточный бастион – Курильская гряда». Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды» и гостемы «Таксономический и биохорологический анализ животного мира как основа изучения и сохранения структуры биологического разнообразия», ЦИТИС–121032300105-0, а также при частичной поддержке «Программы развития Московского университета» (№ 1220).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Артюхин Ю.Б., Бурканов В.Н. Морские птицы и млекопитающие Дальнего Востока России: полевой определитель. М.: АСТ, 1999. 224 с.

Атлас Курильских островов. Российская академия наук. Институт географии РАН. Тихоокеанский институт географии ДВО РАН / под ред. В.М. Котлякова, П.Я. Бакланова, Н.Н. Комедчинова [и др.]; отв. ред.-картограф Е.Я. Федорова. М.; Владивосток: ДИК, 2009. 516 с.

Воробьев Д.П. Растительность Курильских островов. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 92 с.

Воробьев К.А. Материалы к орнитофауне Курильских островов // Доклад АН СССР. Нов. сер. 1947. Т. 57. № 4. С. 413–416.

Кищинский А.А. Орнитофауна северо-востока Азии. М.: Наука, 1988. 288 с.

Коблик Е.А. Разнообразие птиц (по материалам Зоологического музея МГУ): в 4 т. М.: Изд-во МГУ, 2001. 1498 с.

Коблик Е.А., Архипов В.Ю. Фауна птиц стран Северной Евразии в границах бывшего СССР: списки видов. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 171 с.

Морские ключевые орнитологические территории Дальнего Востока России / под ред. Ю.Б. Артюхина. М.: РОСИП, 2016. 136 с.

Наумов Р.Л. Птицы в очагах клещевого энцефалита Красноярского края: автореф. … дис. канд. биол. наук. М.: ИМПиТМ им. Е.И. Марциновского, 1964. 19 с.

Нечаев В.А. Птицы Южных Курильских островов. Л.: Наука, 1969. 246 с.

Нечаев В.А. Птицы острова Итуруп (Курильские острова) // Вестник Сахалинского музея. 2003. № 1(10). С. 297–306.

Нечаев В.А., Гамова Т.В. Птицы Дальнего Востока России (аннотированный каталог). Владивосток: Дальнаука, 2009. 564 с.

Песенко Ю.А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 287 с.

Равкин Ю.С. К методике учета птиц лесных ландшафтов // Природа очагов клещевого энцефалита на Алтае. Новосибирск, 1967. С. 66–75.

Равкин Ю.С., Бабенко В.Г., Стишов М.С., Пронкевич В.В., Лялина М.И. Эколого-географическая изменчивость летнего населения птиц притихоокеанской части России // Сиб. экол. журн. 2020. Т. 27. № 6. С. 689–703.

Редькин Я.А., Коблик Е.А., Мосалов А.А. и др. Материалы по фауне и систематике птиц острова Итуруп по результатам исследований 2004 и 2019 годов // Русский орнитологический журнал. 2021. Т. 30. Экспресс-выпуск № 2022. С. 83–128.

Романов А.А., Коблик Е.А., Редькин Я.А., Кожемякина Р.В., Яковлев В.О., Мурашев И.А. Авифауна острова Уруп (Большая Курильская гряда) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 5. С. 98–107.

Романов А.А., Редькин Я.А., Коблик Е.А. и др. Анализ фауны и населения птиц острова Уруп и сопредельных акваторий (Большая Курильская гряда) // Зоологический журнал. 2022. Т. 101. № 11. С. 1243–1254.

Штегман Б.К. Основы орнитогеографического деления Палеарктики // Фауна СССР. Птицы. Т. 1. Вып. 2. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1938. 157 с.

Харченко В.А. Население птиц основных лесных биотопов Южного Сихотэ-Алиня // Сиб. экол. журн. 2015. № 4. С. 563–569.

The EBCC Atlas of European breeding birds: their distribution and abundance. E.J.M. Hagemmeijer, M.J. Blair (eds.), T.&A.D. Poyser, 1997, 903 p.

Поступила в редакцию 16.08.2023
После доработки 05.09.2023
Принята к публикации 06.10.2023

SPATIAL ORGANIZATION OF BIRD POPULATION OF THE URUP AND ITURUP ISLANDS (KURIL ISLANDS)

A.A. Romanov[1], **E.A. Koblik**[2], **Y.A. Redkin**[3]

[1] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Biogeography*
[2, 3] *Lomonosov Moscow State University, Scientific Zoological Museum*

[1] *Professor, D.Sc. in Biology; e-mail: putorana05@mail.ru*
[2] *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: koblik@zmmu.msu.ru*
[3] *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: yardo@mail.ru*

The ecological and geographical differentiation of the bird population at 18 sites of the Urup and Iturup islands was analyzed. The method of route accounting was applied. A total of 109 species were recorded, 62 of them on both islands. The coefficient of faunal commonality between the terrestrial habitats of the islands is 72%, and between the coastal-marine – 71%. The coefficient of similarity of the bird population between the land habitats of the islands is 36%, and between the coastal-marine – 29%. The values of bird population density on the islands are close both between terrestrial (610–757 ind./km^2) and coastal-marine (536–607 ind./km^2) habitats. The high population density is everywhere due to the abundance of numerically predominant species of the Far Eastern island and the Chinese fauna types. The total population of species of these faunas accounts for more than 50% of the population in terrestrial (282–469 ind./km^2) and coastal marine (172–333 ind./km^2) habitats. The spatio-temporal dynamics of the bird population is characteristic.

Keywords: avifauna, distribution, habitat

Acknowledgements. The authors are grateful to the RF Ministry of Defense and the Russian Geographical Society for the organization of the Eastern Bastion – the Kuril Chain expeditions. The study was carried out under the Program of development of the Interdisciplinary scientific and education school of the Lomonosov Moscow State University "Future of the Planet and the Global Environmental Changes" and the State theme "Taxonomic and biochorological analysis of the animal world as a basis for studying and preserving the structure of biodiversity" CITIS–121032300105-0, and also with partial support from the Moscow University Development Program (no. 1220).

REFERENCES

Artyukhin Yu.B., Burkanov V.N. *Morskie ptitsy i mlekopitayushchie Dal'nego Vostoka Rossii: polevoi opredelitel'* [Seabirds and mammals of the Russian Far East: field guide], Moscow, AST Publ., 1999, 224 p. (In Russian)

Atlas Kuril'skikh ostrovov [Atlas of the Kuril Islands], Rossiiskaya akademiya nauk. Institut geografii RAN, Tikhookeanskii institut geografii DVO RAN, Moscow, Vladivostok, DIK Publ., 2009, 516 p. (In Russian)

Kharchenko V.A. Naselenie ptits osnovnykh lesnykh biotopov Yuzhnogo Sikhote-Alinya [Bird population of the main forest biotopes of South Sikhote Alin], *Sib. ekol. zhurn*., 2015, no. 4, p. 563–569. (In Russian)

Kishchinskii A.A. *Ornitofauna severo-vostoka Azii* [Bird fauna of north-east Asia], Moscow, Nauka Publ., 1988, 288 p. (In Russian)

Koblik E.A. *Raznoobrazie ptits (po materialam Zoologicheskogo muzeya MGU), ch. 1–4* [A variety of birds (based on materials from the Zoological Museum of the Moscow State University), pts 1–4], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2001, 1498 p. (In Russian)

Koblik E.A., Arkhipov V.Yu. *Fauna ptits stran Severnoi Evrazii v granitsakh byvshego SSSR: spiski vidov* [The fauna of birds of the countries of Northern Eurasia within the borders of the former USSR: lists of species], Moscow, Tovarishchestvo nauchnykh izdanii KMK, 2014, 171 p. (In Russian)

Morskie klyuchevye ornitologicheskie territorii Dal'nego Vostoka Rossii [Marine key ornithological territories of the Russian Far East], Yu.B. Artyukhin (ed.), Moscow, Russian Society for the Conservation and Study of Birds named after M.A. Menzbir Publ., 2016, 136 p. (In Russian)

Nechaev V.A. *Ptitsy Yuzhnykh Kuril'skikh ostrovov* [Birds of the South Kuril Islands], Leningrad, Nauka Publ., 1969, 246 p. (In Russian)

Nechaev V.A. Ptitsy ostrova Iturup (Kuril'skie ostrova) [Birds of Iturup Island (Kuril Islands)], *Vestnik Sakhalinskogo muzeya*, 2003, no. 1(10), p. 297–306. (In Russian)

Nechaev V.A., Gamova T.V. *Ptitsy Dal'nego Vostoka Rossii (annotirovannyi katalog)* [Birds of the Russian Far East (annotated catalog)], Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2009, 564 p.

Naumov R.L. *Ptitsy v ochagakh kleshchevogo entsefalita Krasnoyarskogo kraya* [Birds in the centers of tick-borne encephalitis of the Krasnoyarsk Territory], avtoref. … dis. kand. biol. nauk, Moscow, Institute of Medical Parasitology and Tropical Medicine named after E.I. Martsinovsky Publ., 1964, 19 p. (In Russian)

Pesenko Yu.A. *Printsipy i metody kolichestvennogo analiza v faunisticheskikh issledovaniyakh* [Principles and methods of quantitative analysis in faunal studies], Moscow, Nauka Publ., 1982, 287 p. (In Russian)

Ravkin Yu.S. [On the method of birds survey in forest landscapes], *Priroda ochagov kleshchevogo entsefalita na Altae* [The nature in the foci of tick-borne encephalitis in Altai], Novosibirsk, 1967, p. 66–75. (In Russian)

Ravkin Yu.S., Babenko V.G., Stishov M.S., Pronkevich V.V., Ljalina M.I. Ecogeographical variability of the summer bird assemblage in the Pacific part of Russia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, vol. 13, no. 6, p. 577–589.

Red'kin Ja.A., Koblik E.A., Mosalov A.A. i dr. Materialy po faune i sistematike ptic ostrova Iturup po rezul'tatam issledovanij 2004 i 2019 godov [Materials on the fauna and systematics of birds of the Iturup Island based on the results of 2004 and 2019 surveys], *Russkij ornitologicheskij zhurnal*, 2021, vol. 30, ekspress-vypusk no. 2022, p. 83–128. (In Russian)

Romanov A.A., Koblik E.A., Red'kin Ja.A., Kozhemjakina R.V., Jakovlev V.O., Murashev I.A. Avifauna ostrova Urup (Bol'shaja Kuril'skaja grjada) [Avifauna of the Urup Island (Great Kuril Ridge)], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 5, p. 98–107. (In Russian)

Romanov A.A., Red'kin Ja.A., Koblik E.A. i dr. Analiz fauny i naselenija ptic ostrova Urup i sopredel'nyh akvatorij (Bol'shaja Kuril'skaja grjada) [Analysis of the fauna and bird population of the Urup Island and adjacent water areas (Great Kuril Ridge)], *Zoologicheskij zhurnal*, 2022, vol. 101, no. 11, p. 1243–1254. (In Russian)

Shtegman B.K. *Osnovy ornitogeograficheskogo deleniya Palearktiki* [Basics of the ornithogeographical division of the Palaearctic region], Fauna SSSR, Ptitsy, vol. 1, vyp. 2, Moscow, Leningrad, USSR Academy of Sciences Publ., 1938, 157 p. (In Russian)

The EBCC Atlas of European breeding birds: Their distribution and abundance, E.J.M. Hagemmeijer, M.J. Blair (eds.), T.&A.D. Poyser, 1997, 903 p.

Vorob'ev D.P. *Rastitel'nost' Kuril'skih ostrovov* [Vegetation of the Kuril Islands], Moscow, Leningrad, USSR Academy of Sciences Publ., 1963, 92 p. (In Russian)

Vorob'ev K.A. *Materialy k ornitofaune Kuril'skikh ostrovov* [Materials to the avifauna of the Kuril Islands], *Dokl. AN SSSR, Nov. ser*., 1947, vol. 57, no. 4, p. 413–416. (In Russian)

Received 16.08.2023
Revised 05.09.2023
Accepted 06.10.2023

Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2024. Т. 79. № 1. С. 114–124

УДК 551.510.04:551.577 : 550.42 : 546.027

ВАРИАЦИИ ЗНАЧЕНИЙ $\delta^{18}O$ И $\delta^{2}H$ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ МОСКВЫ В 2017–2019 ГГ.

Ю.К. Васильчук[1], Н.А. Буданцева[2], Дж.Ю. Васильчук[3], А.К. Васильчук[4], И.Д. Еремина[5], Ю.Н. Чижова[6]

[1–5] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет*
[6] *Институт геологии рудных месторождений, петрологии, минералогии и геохимии РАН, Институт географии РАН*

[1] *Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, проф., д-р. геол.-минерал. наук; e-mail: vasilch_geo@mail.ru*
[2] *Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: nadin.budanceva@mail.ru*
[3] *Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, мл. науч. сотр.; e-mail: jessica.vasilchuk@gmail.com*
[4] *Лаборатория геоэкологии Севера, вед. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: alla-vasilch@yandex.ru*
[5] *Кафедра метеорологии и климатологии, вед. науч. сотр., канд. хим. наук; e-mail: meteo@rambler.ru*
[6] *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: eacentr@yandex.ru*

С целью выявления особенностей вариаций изотопного состава кислорода и водорода атмосферных осадков в Москве и процессов, определяющих формирование изотопного состава осадков в течение 2017–2019 гг. на метеоплощадке метеорологической обсерватории МГУ, были отобраны пробы всех выпадавших осадков: 2017 г. – 158 проб, 2018 г. – 119 проб, 2019 г. – 143 пробы. Проведенное исследование является продолжением непрерывных измерений изотопного состава осадков, начатых авторами в 2014 г. Изучение изотопного состава осадков метеообсерватории МГУ поддержано МАГАТЭ и стало частью международной базы данных по метеоосадкам (GNIP). Показано, что внутригодовая изменчивость изотопного состава осадков имеет явно выраженную сезонность: наиболее изотопно тяжелые осадки выпадали с мая по август, наиболее изотопно легкие осадки выпадали в декабре – феврале, что, в основном, обусловлено сезонными вариациями температур воздуха. Коэффициент связи среднемесячных значений $\delta^{18}O$ осадков и температур воздуха для исследуемого периода варьировал от 0,34 до 0,39‰/°С, что согласуется с ранее полученными данными для осадков Москвы. Соотношение значений $\delta^{2}H$ и $\delta^{18}O$ в осадках близко к соотношению $\delta^{2}H$–$\delta^{18}O$ для глобальной линии метеорных вод, что отражает в целом равновесные условия формирования осадков. Установлено, что в летние месяцы на изотопный состав заметное влияние оказывает подоблачное испарение. В распределении значений дейтериевого эксцесса в осадках не выявлено строгой сезонности, однако показано, что более низкие значения d_{exc} (ниже 11‰ – среднего значения за трехлетний период) характерны для летних месяцев (июль – август), что, вероятно, обусловлено влиянием подоблачного испарения в условиях низкой относительной влажности и высоких температур воздуха. С октября по апрель преобладали более высокие значения d_{exc} (выше 11‰).

Ключевые слова: стабильные изотопы кислорода, стабильные изотопы водорода, дейтериевый эксцесс, температура воздуха

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.9

ВВЕДЕНИЕ

Изотопный состав кислорода ($\delta^{18}O$) и водорода ($\delta^{2}H$) атмосферных осадков определяется условиями их формирования, т. е. атмосферными условиями в источнике (месте испарения) и на пути следования влаги к месту ее выпадения и метеорологическими условиями во время выпадения осадков – температуры воздуха во время конденсации, конкретных погодных условий [Dansgaard, 1964; Rozanski et al., 1992; Fricke et al., 1999].

В МАГАТЭ с 1961 г. функционирует программа наблюдений за изотопным составом в осадках (GNIP), в настоящее время получены данные по значениям ^{18}O и ^{2}H в осадках для 1178 пунктов наблюдений, база данных GNIP ежегодно дополняется новой информацией.

Изотопные исследования на метеообсерватории МГУ в 2018 г. поддержаны МАГАТЭ и стали частью международной базы данных GNIP. Соотношение параметров $\delta^{2}H$–$\delta^{18}O$ в осадках мира, определяемое как глобальная линия метеорных вод (ГЛМВ), описывается уравнением $\delta^{2}H = 8\delta^{18}O + 10$ [Craig, 1961]. В региональных исследованиях для описания соотношения $\delta^{2}H$–$\delta^{18}O$ в осадках часто применяют понятие локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ), при этом установлено, что параметры ЛЛМВ (наклон линии, положение точки пересечения линии с координатной осью) существенно отличаются для

осадков в разных районах мира и в разные сезоны года в конкретном исследуемом регионе, что указывает на особенности формирования изотопного состава осадков, обусловленные, в основном, влиянием влажности и температуры воздуха [Putman et al., 2019; Hatvani et al., 2023]. Расчетный параметр – дейтериевый эксцесс – в изотопных исследованиях осадков часто рассматривается как дополнительный критерий для оценки источника формирования влаги и для фиксации вторичного испарения в процессе выпадения осадков [Fröhlich et al., 2008; Pfahl, Sodemann, 2014].

На изотопный состав осадков внутриконтинентальных районов большое влияние оказывает происхождение осадков и дальность переноса воздушных масс. На Московский регион оказывают влияние атлантические, средиземноморские влажные воздушные массы и арктические холодные фронты, что дает возможность исследовать влияние различных источников влаги на изотопный состав осадков. До настоящего времени по Москве были получены изотопные данные за 2014–2016 гг. [Чижова и др., 2017; Васильчук и др., 2021] и за 1970–1979 и 2005–2014 гг. [Zykin et al., 2021].

Цель данной статьи – проанализировать изотопный состав кислорода и водорода всех осадков за 2017–2019 гг., оценить связь изотопного состава осадков с температурой воздуха и количеством осадков, оценить внутригодовое распределение значений d_{exc} и соотношение $\delta^{2}H$–$\delta^{18}O$ для осадков каждого исследуемого года, выявить процессы, влияющие на формирование изотопного состава осадков, а также сопоставить результаты исследования изотопного состава осадков для 2017–2019 гг. с ранее полученными данными.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор проб осадков проводился на территории метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова в Москве. Исследование выполнено на основе отбора каждого случая дождя, снегопада или смешанных осадков с начала выпадения до его окончания в текущие или смежные сутки. Определялся тип осадка (снег, дождь, снег с дождем – осадки смешанного типа) и его количество, температура приземного слоя воздуха. Осадки отбирались с помощью винипластовой воронки размером 80×80 см, расположенной на высоте 2 м от поверхности земли. Для сбора дождевой воды под воронкой устанавливали пластмассовое ведро. Зимой, после окончания снегопада, снег из воронки собирали пластмассовым совком в ведро для оттаивания при комнатной температуре. После этого пробы осадков переливались в пластиковые флаконы, обматывались парафильмом и хранились в холодильнике.

Для всех отобранных проб был выполнен анализ изотопного состава кислорода и водорода на масс-спектрометре Delta–V с интерфейсом GasBench II в лаборатории стабильных изотопов кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ. При измерении и калибровке результатов использовались международные стандарты SMOW, SLAP и GRESP. Средняя точность измерений составила 0,2 и 0,8‰ по $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ соответственно. Расчет дейтериевого эксцесса выполнен по формуле: $d_{exc} = \delta^{2}H - 8\delta^{18}O$ [Dansgaard, 1964].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В течение 2017–2019 гг. было зафиксировано 420 случаев выпадения осадков с количеством >0,5 мм. Наиболее изотопно тяжелые осадки (со значениями $\delta^{18}O$ до –2, –4‰ и $\delta^{2}H$ до –15, –40‰) выпадали с мая по август, наиболее изотопно легкие осадки (со значениями $\delta^{18}O$ до –20, –25‰ и $\delta^{2}H$ до –160, –180‰) в декабре – феврале, при этом сезонный ход сопровождался максимумом летом и минимумом зимой (рис. 1).

Изотопный состав осадков в 2017 г. В этом году количество дней с осадками (158) было максимальным за исследуемый период. В первой половине января осадки характеризовались минимальными значениями $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ (от –20,7 до –24,8‰ и от –151,4 до –184,5‰ соответственно), в течение января и февраля осадки выпадали преимущественно в виде снега. Среднесуточная температура воздуха в этот период также была минимальной, для большинства дней с осадками она была ниже 0°С и опускалась до –23…–25°С. С начала марта изотопный состав осадков стал заметно более тяжелым на фоне повышения температуры воздуха: значения $\delta^{18}O$ варьировали от –6 до –16,6‰ и $\delta^{2}H$ от –146,9 до –161,7‰, температура воздуха изменялась от –1,3 до 10,7°С. С 24–25 мая до середины сентября значения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ осадков были максимальными и варьировали от –2 до –14,7‰ и от –15 до –117,6‰ соответственно, температура воздуха в этот период изменялась от 5,9 до 22,3°С. Необычно низкие для летнего периода значения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ осадков отмечены в начале июня при резком понижении температуры воздуха, также несколько эпизодов изотопно-легких осадков ($\delta^{18}O$ до –13…–14‰) отмечено для начала июля, при этом температура воздуха в эти дни и в смежные сутки была близка к средней климатической норме первой половины июля.

С начала октября отмечено снижение значений $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ осадков: значения $\delta^{18}O$ варьировали от –6 до –16,3‰, значения $\delta^{2}H$ от –6 до –123,8‰; с 22.10 стали выпадать осадки смешанного типа и снег, аномально низкие значения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ получены

для осадков 31.10 и 1.11 (–30,2, –20,3‰ и –228,3, –158,1‰ соответственно), при этом температура воздуха в эти дни была не ниже –0,6°С. В течение ноября – декабря значения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ осадков (выпадавших как в виде дождя и снега, а также смешанного типа) варьировали в основном в диапазоне от –10 до –22‰ для $\delta^{18}O$ и от –84 и –156‰ для $\delta^{2}H$, при вариациях среднесуточной температуры воздуха от 5 до –3,7°С.

Изотопный состав осадков в 2018 г. В этом году количество осадков было минимальным за три года исследований – 119 эпизодов. В течение первых трех месяцев года зафиксированы в целом довольно низкие значения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ осадков, выпадавших преимущественно в виде снега: значения $\delta^{18}O$ варьировали от –11 до –23,1‰, значения $\delta^{2}H$ – от –70 до –181,7 ‰. Температура воздуха в этот период варьировала от 0,4 до –16,3°С. С конца марта и

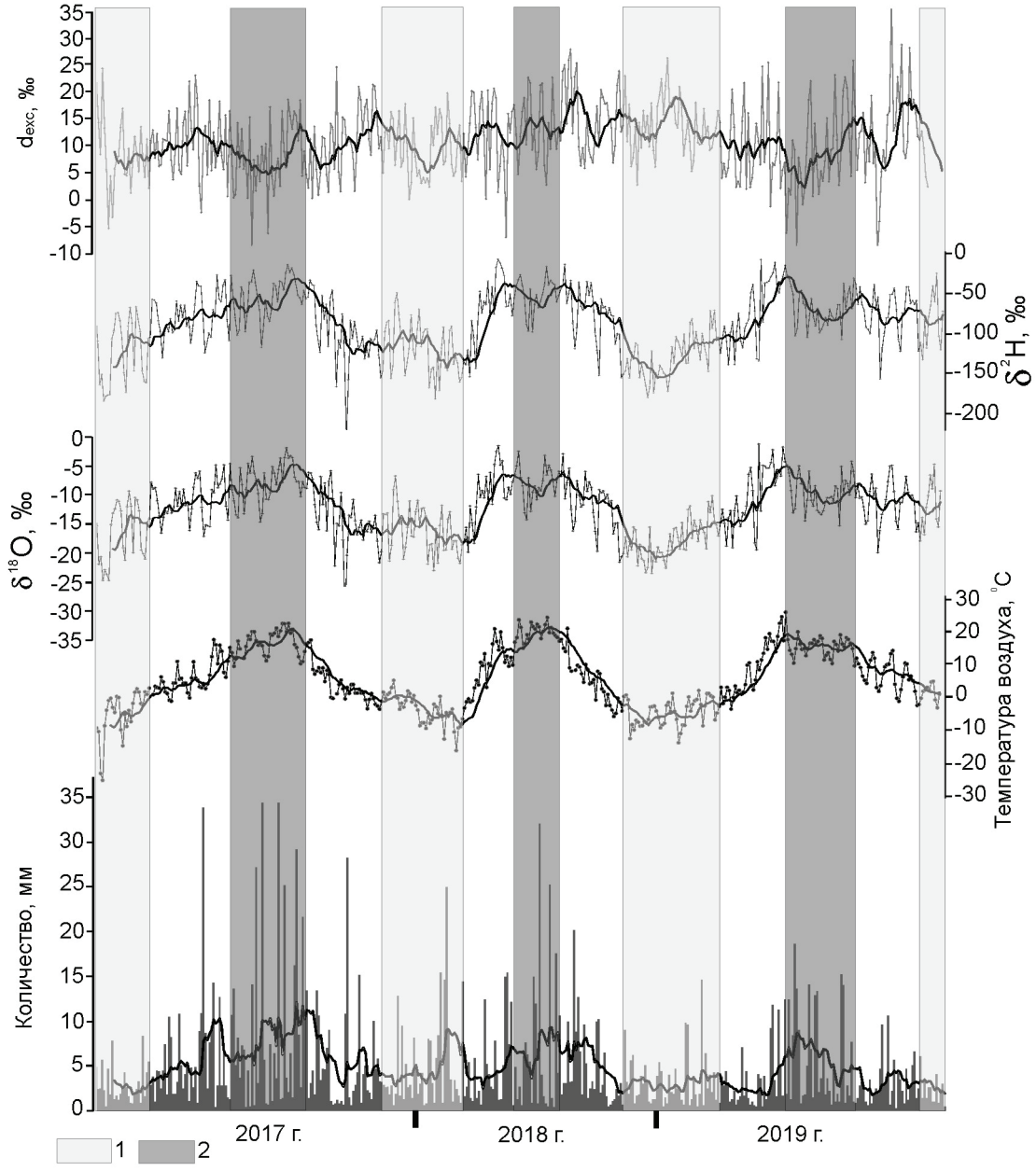


Рис. 1. Изотопный состав кислорода ($\delta^{18}O$), водорода ($\delta^{2}H$), значения дейтериевого эксцесса (d_{exc}), среднесуточная температура воздуха и количество осадков всех событий выпадения осадков за 2017–2019 гг. Для отражения сезонности распределения изотопных параметров и температуры воздуха выделены календарная зима (1) и календарное лето (2)

Fig. 1. Values of $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ and deuterium excess (d_{exc}), daily air temperature and precipitation amount for all precipitation events in 2017–2019. To emphasize the seasonality of stable isotope parameters and air temperature, calendar winter (1) and calendar summer (2) are marked on the plots

в апреле начали выпадать осадки смешанного типа и дожди, отмечено повышение значения $\delta^{18}O$ от –6,2 до –12,1‰ и $\delta^{2}H$ от –35,3 до –84,8‰; температура воздуха в этот период была уже положительной и варьировала от 2,7 до 13,1°С. Для периода с начала мая до середины сентября получены наиболее высокие значения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ осадков: значения $\delta^{18}O$ варьировали от –1,6 до –14,3‰, значения $\delta^{2}H$ – от –8,1 до –98,6‰, температура воздуха в этот период изменялась в диапазоне от 9,2 до 24°С. Так же как и в 2017 г., в первой половине июля в течение двух смежных суток выпадали дожди с довольно низкими для лета значениями $\delta^{18}O$ (–13, –14‰). С конца сентября отмечалось постепенное снижение значений $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ осадков, значения $\delta^{18}O$ варьировали от –6 до –19,8‰, значения $\delta^{2}H$ – от –36 до –152,5‰, температура воздуха в этот период была положительной и изменялась от 4 до 9,8°С и только в день с наиболее изотопно легким дождем она была немного ниже 0°С. Со второй декады ноября и в течение декабря осадки выпадали преимущественно в виде снега, температура воздуха варьировала от 1,5 до –12,6°С, значения $\delta^{18}O$ изменялись от –10 до –23,6‰, значения $\delta^{2}H$ – от –77,4 до –180‰.

Изотопный состав осадков в 2019 г. Количество дней с осадками в этом году было достаточно большим – 143 случая. В течение января и февраля зафиксированы в целом низкие значения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ осадков, выпадавших преимущественно в виде снега: значения $\delta^{18}O$ варьировали от –11,2 до –22,7‰, значения $\delta^{2}H$ – от –71,9 до –172,4‰. Температура воздуха в этот период была ниже 0°С в течение января и варьировала от 0 до –13,9°С, однако уже в феврале отмечались частые оттепели и значительное количество дней с положительной температурой воздуха. С конца февраля до середины апреля осадки выпадали преимущественно в виде снега и снега с дождем, отмечено постепенное повышение значений $\delta^{18}O$ до –5,3‰ и $\delta^{2}H$ до –39,4‰. Температура воздуха варьировала от –7 до –3,3°С в конце февраля и в течение почти всего марта, с конца марта она изменялась от 0,9 до 10,3°С. С мая по середину сентября осадки выпадали в виде дождей, в тот период отмечены наиболее высокие значения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$: $\delta^{18}O$ варьировали от –1,8 до –15,4‰, $\delta^{2}H$ – от –15,8 до –108‰ при наиболее высоких температурах воздуха от 8,2 до 25,6°С. В течение летнего периода также отмечено значительное количество дней, в которые выпадали изотопно легкие осадки со значениями $\delta^{18}O$ от –11 до –15‰. Со второй половины сентября до начала ноября значения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ постепенно снижались и варьировали от –5 до –16,2‰ для $\delta^{18}O$ и от –44 до –118,4‰ для $\delta^{2}H$, и только 6 октября, для осадков смешанного типа получены наиболее низкие значения: –20‰ для $\delta^{18}O$ и –156,9‰ для $\delta^{2}H$. Ноябрь и декабрь 2019 г. можно считать теплыми по сравнению с аналогичным периодом в 2017 и 2018 гг., температура воздуха в дни выпадения осадков, в основном, была выше 0°С, только в течение пяти дней она опускалась до значений –2, –3°С. Осадки выпадали, как правило, в виде дождя или дождя со снегом, значения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ были близки к величинам октября и варьировали от –4,8 до –18‰ и от –25,6 до –133,2‰ соответственно.

Взаимосвязь изотопного состава осадков с климатическими параметрами. *Зависимость значений $\delta^{18}O$ от температуры воздуха.* Закономерный сезонный ход значений $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ обусловлен температурной зависимостью, которая выражается линейным уравнением и значимым коэффициентом корреляции как для ежедневных проб, так и для среднемесячных значений (рис. 2). Для ежедневных проб коэффициент $\Delta\delta^{18}O/\Delta T_{возд}$ составил 0,46‰/°С для 2017 г., 0,42‰/°С для 2018 г. и 0,43‰/°С для 2019 г., значение достоверности аппроксимации R^2 варьировало от 0,57 до 0,64. Для среднемесячных значений $\delta^{18}O$ и $T_{возд}$ получены следующие величины: 0,37‰/°С для 2017 г., 0,39‰/°С для 2018 г. и 0,34‰/°С для 2019 г., при заметно более высоких значениях R^2 от 0,78 до 0,84.

Сравнение с полученными ранее данными по 2014–2016 гг. [Васильчук и др., 2021; Чижова и др., 2017] показывает, что коэффициент связи $\delta^{18}O$–$T_{возд}$ для среднемесячных значений составлял: 0,33‰/°С, R^2 = 0,72 (2014 г.), 0,45‰/°С, R^2 = 0,91 (2015 г.) и 0,47‰/°С, R^2 = 0,84 (2016 г.). Для 1970–2014 гг. этот коэффициент для среднемесячных значений составлял: для 1970–1979 гг. – 0,34‰/°С и для 2005–2014 гг. – 0,44‰/°С [Zykin et al., 2021].

Таким образом, значения коэффициента связи средних значений $\delta^{18}O$ с температурой воздуха за все периоды наблюдений за изотопным составом осадков (1970–1979, 2005–2014 и 2014–2019 гг.) составляли от 0,33 до 0,47‰/°С, при этом наиболее выраженная связь отмечалась в 2015–2016 гг., наименее выраженная – в 1970–1979 гг. и 2014 г.

В глобальном масштабе для среднемесячных значений зависимость $\delta^{18}O/T$ выражается коэффициентами от 0,5‰/°С в высоких широтах до 0‰/°С в низких [Gat et al., 2001]. Для осадков Европы было установлено соотношение 0,58‰/°С [Rozanski et al., 1992]. По Австрийской сети станций GNIP за 30-летний период наблюдений получено значение коэффициента корреляции $\delta^{18}O/T$ в осадках, равное 0,39‰/°С при высоком значении R^2 = 0,85 [Hager, Foelsche, 2015].

В общих чертах установленная нами для Москвы зависимость изотопного состава кислорода от температуры приземного слоя воздуха отражает близкую степень континентальности с удаленными от побережья европейскими регионами.

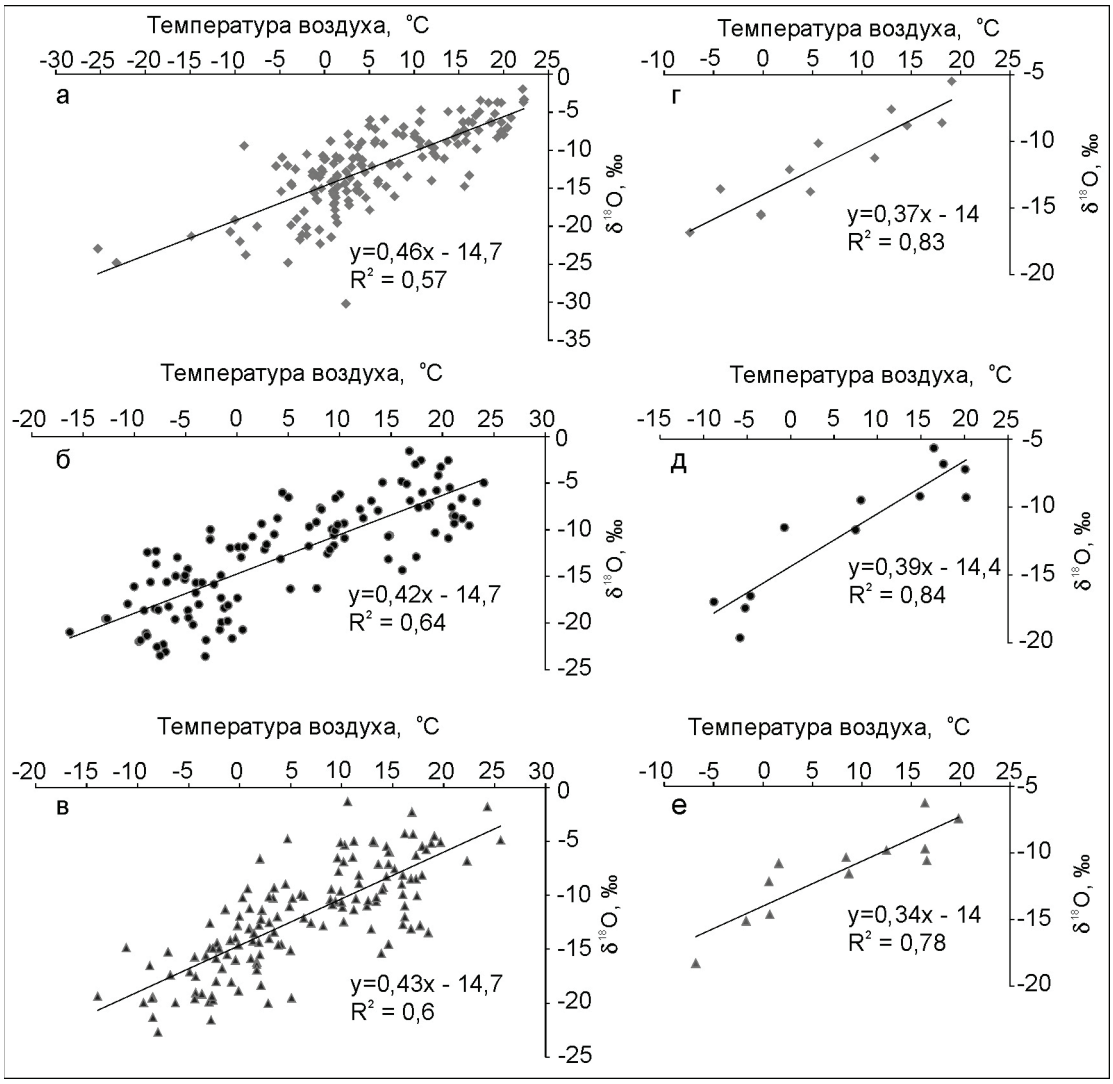


Рис. 2. Зависимость значений $\delta^{18}O$ осадков от приземной температуры воздуха для ежедневных проб (а – 2017 г.; б – 2018 г.; в – 2019 г.) и для среднемесячных проб (г – 2017 г.; д – 2018 г.; е – 2019 г.)

Fig. 2. The $\delta^{18}O$ – air temperature relationship for daily precipitation events (а – 2017; б – 2018; в – 2019) and for monthly averaged data (г – 2017; д – 2018; е – 2019)

Зависимость значений $\delta^{18}O$ от количества осадков. Для исследуемого периода 2017–2019 гг. не выявлена корреляция значений $\delta^{18}O$ в осадках с их количеством (рис. 3). При этом также невозможно выделить сезон года, в течение которого эта корреляция была бы прослежена. Скорее всего, это обусловлено неравномерным распределением суточного количества осадков, прохождениями циклонов и перемешиванием воздушных масс, что значительно влияет на изотопный состав осадков.

Можно отметить, что отсутствие корреляции $\delta^{18}O$ – количество осадков отмечалось для европейских стран, близких к европейской части России по распределению количества осадков в течение года, например, Словении, Румынии [Vreča et al., 2005; Puscas et al., 2013]. В то же время для стран Европы с более засушливым климатом в летние периоды, когда количество осадков заметно ниже, а значения $\delta^{18}O$ выше, чем зимой, отмечается выраженная отрицательная корреляция параметров $\delta^{18}O$ – количество осадков, например, для осадков Мадрида установлена линейная зависимость в –0,13‰/1 мм при $R^2 = 0,88$ [Araguas-Araguas, Diaz Teijeiro, 2005].

Соотношение $\delta^{18}O$ и δ^2H в осадках. Значения $\delta^{18}O$ и δ^2H осадков Москвы аппроксимируются уравнениями: $\delta^2H = 7,7\delta^{18}O + 5,9$ для 2017 г., $\delta^2H = 8\delta^{18}O + 12,5$ для 2018 г. и $\delta^2H = 7,5\delta^{18}O + 4,8$ для 2019 г. (рис. 4). В 2018 г. локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ) для Москвы наиболее близка к ГЛМВ, которая описывается уравнением $\delta^2H = 8\delta^{18}O + 10$.

Если рассматривать все осадки 2017–2019 гг., то уравнение зависимости δ^2H–$\delta^{18}O$ будет иметь вид: $\delta^2H = 7,7\delta^{18}O + 7,6$, при $R^2 = 0,97$. Сопоставление с данными для более ранних периодов по-

казывает, что за 1975–1979 гг. для осадков Москвы получена зависимость $\delta^2H = 6{,}1\delta^{18}O - 23$ ($R^2 = 0{,}87$), за 2005–2014 гг. – зависимость $\delta^2H = 6{,}9\delta^{18}O - 11{,}3$ ($R^2 = 0{,}9$) [Zykin et al., 2021], т. е. в 2017–2019 гг. соотношение изотопного состава кислорода и водорода наиболее близко к таковому для ГЛМВ, что указывает на формирование изотопного состава осадков в условиях, близких к равновесным. При этом для летних месяцев, к которым можно отнести месяцы с доминирующей среднесуточной температурой воздуха выше 0°С (май–сентябрь), наклон ЛЛМВ немного ниже, чем для зимних, к которым отнесены месяцы с устойчивой $T_{ср.сут.}$ ниже 0°С (ноябрь–март), что обусловлено более низкой влажностью воздуха в летнее время и возможным испарением осадков. Подобные различия в наклонах ЛЛМВ для летних и зимних осадков были отмечены для европейских стран, например, Румынии [Varlam et al., 2020; Puscas et al., 2013]; для средиземноморского региона по данным 62 станций показано, что влияние испарения на изотопный состав осадков наиболее выражено в западной части и на севере Африки (наклон ЛЛМВ около 6) и заметно снижается в альпийских предгорьях Италии, где наклон ЛЛМВ составил 8–8,3 [Hatvani et al., 2023].

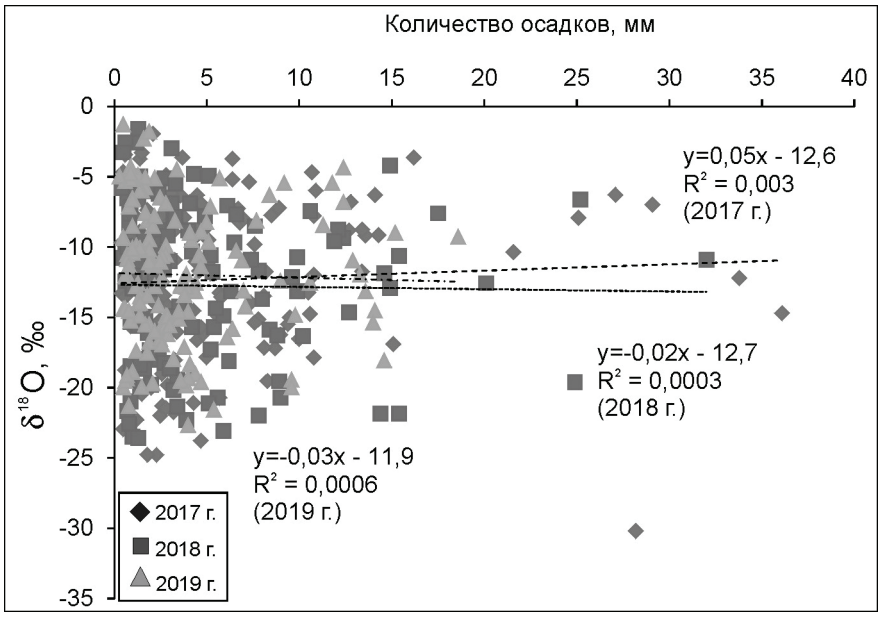


Рис. 3. Соотношение значений $\delta^{18}O$ и количества осадков для ежедневных проб 2017–2019 гг.

Fig. 3. The $\delta^{18}O$ – amount relationship for daily precipitation events in 2017–2019

Вариации значений d_{exc} в осадках. Величины d_{exc} в осадках, прежде всего, отражают условия в источнике формирования водяного пара, при этом низкие величины d_{exc} объясняются высокими значениями относительной влажности над поверхностью океана и наоборот, более высокие значения d_{exc} соответствуют более низкой влажности в источнике [Pfahl, Sodemann, 2014; Aemisegger, 2018]. Вторичное испарение осадков в процессе их выпадения, отмечаемое в летние месяцы, часто приводит к формированию низких значений d_{exc} в осадках как, например, было прослежено для осадков на 17 станциях в Румынии для периода 2012–2014 гг. [Nagavciuc et al., 2022].

Значения дейтериевого эксцесса в осадках Москвы за три исследованные года варьировали от –10,2 до 36,9‰. Среднее арифметическое значение d_{exc} по всем осадкам за три года исследований составило 11‰, а среднее отклонение – 6,9‰, поэтому за низкие были приняты все значения d_{exc} ниже 4,1‰, а за высокие – все значения выше 17,9‰ (в публикации [Klein et al., 2015] за критерий высоких и низких значений принимают ±2σ от средней величины). Всего из 420 случаев осадков за 2017–2019 гг. было 57 случаев с низкими d_{exc} и 62 – с высокими d_{exc}. То есть 72% случаев – это осадки со средними $d_{exc} \pm 2\sigma$, а 28% случаев – осадки с высокими и низкими d_{exc}. Это достаточно высокая степень внутригодовых вариаций при большом диапазоне величины дейтериевого эксцесса.

Низкие величины d_{exc}, как правило, характерные для летних сезонов, отмечались в июне – августе 2017–2019 гг., что связано, скорее всего, с подоблачным испарением в условиях низкой относительной влажности и высоких температур. В зимние месяцы (с октября по апрель) преобладали высокие значения d_{exc}. Подобное сезонное распределение значений

d_{exc} в осадках Москвы отмечалось и ранее: за 2005–2014 гг. наиболее высокие значения d_{exc} получены для осадков зимних месяцев; наиболее низкие значения характерны для периода с апреля по август, что объясняется влиянием испарения [Zykin et al., 2021].

Однако необычно низкие значения d_{exc} были отмечены в осадках в январе 2018 г. (среднее значение 6,7‰) и в октябре 2019 г. (среднее значение 7,1‰), что не может быть связано с подоблачным испарением. Вероятнее всего, низкие значения d_{exc} это результат условий в источнике пара и, возможно, в путях поступления воздушных масс к Москве. Для осадков с низкими значениями d_{exc} в 2017–2018 гг. обратные траектории свидетельствуют о поступлении воздуха из Северной Атлантики, из континентальной Канады, из высоких широт Арктики, с акватории Карского моря и континентальных районов Западной Сибири. В этих случаях воздушные массы получали влагу из ближайших пространств открытой воды в Арктике, что обусловило низкие величины d_{exc}, связанные с низкой температурой воды и высокой относительной влажностью.

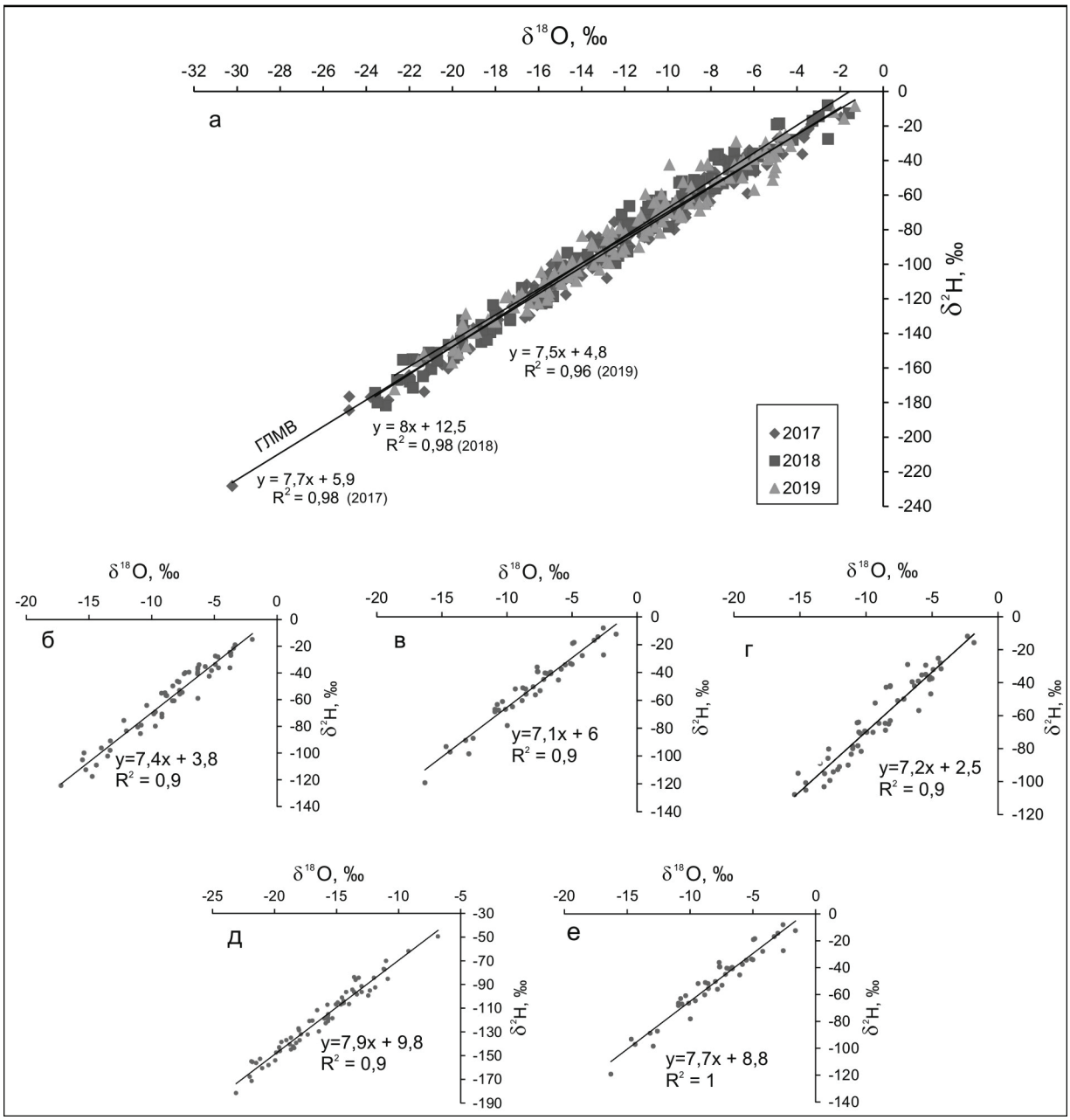


Рис. 4. Соотношение значений δ^2H–$\delta^{18}O$ в осадках за весь год для 2017, 2018 и 2019 гг. (а) и для теплых (май–сентябрь; б–г) и холодных (ноябрь–март; д–е) сезонов: б – 2017 г.; в – 2018 г.; г – 2019 г.; д – 2017–2018 гг.; е – 2018–2019 гг.

Fig. 4. The δ^2H–$\delta^{18}O$ ratio in precipitation for the entire year of 2017, 2018 and 2019 (a) and for the warm (May–September; б–г) and cold (November–March; д–е) seasons: б – 2017; в – 2018; г – 2019; д – 2017–2018; е – 2018–2019

Для ряда европейских городов было установлено, что величины d_{exc} в осадках в осенне-зимний сезон выше, чем в весенне-летний [Fröhlich et al., 2002, Duliński et al., 2019]. В целом для Европейского континента характерна сезонность в распределении d_{exc} с более высокими значениями d_{exc} с октября по январь и более низкими – с февраля по август, а для осадков Москвы такая закономерность не выявлена. К тому же, для Западной Европы было показано изменение среднегодовых значений d_{exc} в 1976–1991 гг. (по сравнению с периодом наблюдений 1961–1975 гг.), указывающее на усиление влияния северной Атлантики как источника влаги и увеличения скорости переноса влаги над континентом [Власова, Ферронский, 2008]. По нашим данным, северная часть Атлантического океана являлась источником не более 26% осадков, выпадающих в Москве в 2017–2018 гг. Это может говорить о том, что Москва, несмотря на близкие значения коэффициентов связи $\delta^{18}O/T_{возд}$ с европейскими городами, имеет несколько другую картину формирования осадков.

ВЫВОДЫ

Получены новые данные об изотопном составе кислорода и водорода для каждого эпизода выпадения атмосферных осадков в Москве в течение 2017–2019 гг.

Наиболее изотопно тяжелые осадки (со значениями $\delta^{18}O$ до –2, –4‰ и $\delta^{2}H$ до –15, –40‰) выпадали с мая по август, наиболее изотопно легкие (со значениями $\delta^{18}O$ до –20, –25‰ и $\delta^{2}H$ до –160, –180‰) – в декабре–феврале.

Изотопный состав осадков хорошо коррелирует с температурой приземного слоя воздуха. Для среднемесячных значений $\delta^{18}O_{осадки}$ и $T_{возд}$ для 2017–2019 гг. получены коэффициенты от 0,34 до 0,39‰/°С, что хорошо согласуется с данными предыдущего трехлетия (2014–2016), для которого получены коэффициенты от 0,33 до 0,47‰/°С.

Соотношение $\delta^{2}H$–$\delta^{18}O$ в осадках описывается уравнением $\delta^{2}H = 7,7\ \delta^{18}O + 7,6$, что близко к уравнению глобальной линии метеорных вод. В летние месяцы, когда на изотопный состав заметное влияние оказывает подоблачное испарение, наклон линии $\delta^{2}H$–$\delta^{18}O$ меньше, чем в течение зимних месяцев.

Для большинства проб осадков (72%) получены средние значения дейтериевого эксцесса (11 ± 6,9‰), в 28% осадков отмечены высокие (от 17,6 до 36,9‰) и низкие (от –10,2 до 4,1‰) значения d_{exc}. Низкие величины d_{exc}, как правило, типичны для июня – августа, для зимних месяцев (с октября по апрель) получены преимущественно более высокие значения d_{exc}, что согласуется с ранее полученными данными для 2005–2014 гг. Необычно низкие среднемесячные значения d_{exc}, полученные для января 2018 г. (среднее значение d_{exc} = 6,7‰) и октября 2019 г. (среднее значение d_{exc} = 7,1‰), скорее всего, обусловлены поступлением воздушных масс из высоких широт Арктики, где они формировались над акваторией с низкой температурой воды и высокой относительной влажностью.

Благодарность. Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-77-30004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук Д.Ю., Еремина И.Д., Блудушкина Л.Б. Вариации значений $\delta^{18}O$ и содержание водорастворимых солей в атмосферных осадках Москвы в 2014–2016 гг. // Вестн. моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 2. С. 35–43.

Власова Л.С., Ферронский В.И. Влагоперенос над Западной Европой и его связь с колебаниями климата по данным об изотопном составе осадков // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 5. С. 525–545.

Чижова Ю.Н., Еремина И.Д., Буданцева Н.А., Суркова Г.В., Васильчук Ю.К. Содержание ^{18}O в атмосферных осадках Москвы в 2014 г. // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 78–90.

Aemisegger F. On the link between the North Atlantic storm track and precipitation deuterium excess in Reykjavik, *Atmospheric Science Letters*, 2018, vol. 19, iss. 12, p. 1–9, DOI: 10.1002/asl.865.

Araguas-Araguas L.J., Diaz Teijeiro M.F. Isotope composition of precipitation and water vapour in the Iberian Peninsula, *Isotopic composition of precipitation in the Mediterranean Basin in relation to air circulation patterns and climate,* Final report of a coordinated research project, 2000–2004, 2005, p. 173–191.

Craig H. Isotopic variations in meteoric waters, *Science,* 1961, vol. 133(3465), p. 1702–1703.

Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation, *Tellus,* 1964, no. 16, p. 436–468, DOI: 10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x.

Duliński M., Różański K., Pierchała A. et al. Isotopic composition of precipitation in Poland: a 44-year record, *Acta Geophys.*, 2019, vol. 67, p. 1637–1648.

Fricke H.C., O'Neil J.R. The correlation between $^{18}O/^{16}O$ ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time, *Earth and Planetary Science Letters,* 1999, vol. 170, no. 3, p. 181–196, DOI: 10.1016/s0012-821x(99)00105-3.

Fröhlich K., Gibson J.J., Aggarwal P.K. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance, *Pro-*

ceedings of the study of environmental change using isotope techniques, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2002, p. 54–66.

Fröhlich K., Kralik W., Papesch W. et al. Deuterium excess in precipitation of Alpine regions – moisture recycling, *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2008, vol. 44, no. 1, p. 61–70, DOI: 10.1080/10256010801887208.

Gat J.R., Mook W.G., Rozanski K., Fröhlich K. Environmental isotopes in the hydrological cycle: Principles and applications, Paris, UNESCO, 2001, vol. 2.

Hager B., Foelsche U. Stable isotope composition of precipitation in Austria, *Austrian journal of Earth Sciences*, 2015, vol. 108, p. 2–14, DOI: 10.17738/ajes.2015.0012.

Hatvani I.G., Smati A.E., Erdélyi D. et al. Modeling the spatial distribution of the meteoric water line of modern precipitation across the broader Mediterranean region, *Journal of Hydrology,* 2023, vol. 617, part B, 128925, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128925.

Klein E.S., Cherry J.E., Young J. et al. Arctic cyclone water vapor isotopes support past sea ice retreat recorded in Greenland ice, *Science Reports*, 2015, no. 5, p. 10295.

Nagavciuc V., Perşoiu A., Bădăluţă C.-A. et al. Defining a precipitation stable isotope framework in the wider Carpathian Region, *Water*, 2022, vol. 14, p. 2547, DOI: 10.3390/w14162547.

Pfahl S., Sodemann H. What controls deuterium excess in global precipitation? *Climate of the Past*, 2014, vol. 10, p. 771–781, DOI: 10.5194/cp-10-771-2014.

Puscas R., Feurdean V., Simon V. Stable isotopes composition of precipitation fallen over Cluj-Napoca, Romania, between 2009–2012, *AIP Conference Proceedings*, 2013, 1565, 308, DOI: 10.1063/1.4833751.

Putman A.L., Fiorella R.P., Bowen G.J., Cai Z. A global perspective on local meteoric water lines: meta-analytic insight into fundamental controls and practical constraints, *Water Resources Research*, 2019, vol. 55, no. 8, p. 6896–6910, DOI: 10.1029/ 2019WR025181.

Rozanski K., Araguás-Araguás L., Gonfiantini R. Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate, *Science,* 1992, vol. 258, p. 981–985, DOI: 10.1126/science.258.5084.981.

Varlam C., Duliu O.G., Ionete R.E., Costinel D. Time series analysis of the δ^2H, $\delta^{18}O$ and d_{excess} values in correlation with monthly temperature, relative humidity and precipitation in Râmnicu Vâlcea, Romania: 2012–2018, *Geological Society, London, Special Publications*, 2021, vol. 507, iss. 1, p. 77–89, DOI: 10.1144/SP507-2020-56.

Vreča P., Kanduč T., Žigon S., Trkov Z. Isotopic composition of precipitation in Slovenia, *Isotopic composition of precipitation in the Mediterranean Basin in relation to air circulation patterns and climate*, Final report of a coordinated research project, 2000–2004, 2005, p. 157–173.

Zykin N.N., Tokarev I.V., Vinograd N.A. Monitoring of stable isotopes (δ^2H, $\delta^{18}O$) in precipitations of Moscow city (Russia): Comparison for 2005–2014 and 1970–1979 periods // Вестник Санкт-Петербургского гос. ун-та. Науки о Земле. 2021. Т. 66. № 4. С. 723–733. DOI: 10.21638/spbu07.2021.405.

Поступила в редакцию 22.05.2023
После доработки 11.07.2023
Принята к публикации 06.10.2023

VARIATIONS OF $\delta^{18}O$ AND δ^2H VALUES OF PRECIPITATION IN MOSCOW FROM 2017 TO 2019

Yu.K. Vasil'chuk[1], N.A. Budantseva[2], J.Yu. Vasil'chuk[3], A.C. Vasil'chuk[4], I.D. Eremina[5], Yu.N. Chizhova[6]

[1–5] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,*
[6] *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Institute of Geography RAS*

[1] *Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography Professor, D.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: vasilch@geol.msu.ru*
[2] *Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: nadin.budanceva@mail.ru*
[3] *Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography Junior Scientific Researcher; e-mail: jessica.vasilchuk@gmail.com*
[4] *Laboratory of Geoecology of the North, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: alla-vasilch@yandex.ru*
[5] *Department of Meteorology and Climatology, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Chemistry; e-mail: meteo@rambler.ru*
[6] *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: eacentr@yandex.ru*

To reveal variations in the isotopic composition of O and H in the atmospheric precipitation in Moscow and the processes influencing the isotope composition, all events of precipitation in 2017–2019 were sampled at the Meteorological Observatory of the Moscow State University: 158 samples in 2017, 119 samples in 2018 and 143 samples in 2019. The study is a prolongation of continuous measurements of the isotope composition

of precipitation, started by authors in 2014. The study of the isotope composition of precipitation at the MSU Meteorological Observatory was supported by the IAEA and became a part of the Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) database. It has been found that the intra–annual variability of the isotope composition of precipitation has a pronounced seasonality. The most isotopically heavy precipitation falls from May to August, and the most isotopically light precipitation at December-February, mainly due to seasonal air temperature variations. The ratio of the average monthly $\delta^{18}O$ values in precipitation and air temperature for the study period varied from 0.34 to 0.39‰/°C, which is consistent with the previously obtained data for precipitation in Moscow. The $\delta^{2}H$–$\delta^{18}O$ ratio in precipitation was close to that of the Global Meteoric Water Line, pointing to the equilibrium conditions during precipitation formation. It was established that in the summer months isotopic composition is significantly influenced by undercloud evaporation. The deuterium excess values in precipitation are not markedly seasonal; however, lower d_{exc} values (below the 3-year average of 11‰) are typical for the summer months (July–August). It is most likely due to undercloud evaporation in conditions of low relative humidity and high air temperatures. Higher d_{exc} values (above 11‰) prevailed from October to April.

Keywords: stable isotopes of oxygen, stable isotopes of hydrogen, deuterium excess, air temperature

Acknowledgements. The research was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 19-17-30004).

REFERENCES

Aemisegger F. On the link between the North Atlantic storm track and precipitation deuterium excess in Reykjavik, *Atmospheric Science Letters*, 2018, vol. 19, iss. 12, p. 1–9, DOI: 10.1002/asl.865.

Araguas-Araguas L.J., Diaz Teijeiro M.F. Isotope composition of precipitation and water vapour in the Iberian Peninsula, *Isotopic composition of precipitation in the Mediterranean Basin in relation to air circulation patterns and climate,* Final report of a coordinated research project, 2000–2004, 2005, p. 173 –191.

Chizhova Ju.N., Eremina I.D., Budantseva N.A., Surkova G.V., Vasil'chuk Yu.K. Concentration of ^{18}O in precipitation over Moscow in 2014, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2017, vol. 42, no. 1, p. 54–63, DOI:10.3103/S1068373917010071.

Craig H. Isotopic variations in meteoric waters, *Science,* 1961, vol. 133(3465), p. 1702–1703.

Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation, *Tellus,* 1964, no. 16, p. 436–468, DOI: 10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x.

Duliński M., Różański K., Pierchała A. et al. Isotopic composition of precipitation in Poland: a 44-year record, *Acta Geophys*, 2019, vol. 67, p. 1637–1648.

Fricke H.C., O'Neil J.R. The correlation between $^{18}O/^{16}O$ ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time, *Earth and Planetary Science Letters,* 1999, vol. 170, no. 3, p. 181–196, DOI: 10.1016/s0012-821x(99)00105-3.

Fröhlich K., Gibson J.J., Aggarwal P.K. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance, *Proceedings of the study of environmental change using isotope techniques, International Atomic Energy Agency*, Vienna, 2002, p. 54–66.

Fröhlich K., Kralik W., Papesch W. et al. Deuterium excess in precipitation of Alpine regions – moisture recycling, *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2008, vol. 44, no. 1, p. 61–70, DOI: org/61-70.10.1080/10256010801887208.

Gat J.R., Mook W.G., Rozanski K., Fröhlich K. *Environmental isotopes in the hydrological cycle: Principles and applications,* Paris, UNESCO, 2001, vol. 2.

Hager B., Foelsche U. Stable isotope composition of precipitation in Austria, *Austrian journal of Earth Sciences*, 2015, vol. 108, p. 2–14, DOI: 10.17738/ajes.2015.0012.

Hatvani I.G., Smati A.E., Erdélyi D. et al. Modeling the spatial distribution of the meteoric water line of modern precipitation across the broader Mediterranean region, *Journal of Hydrology,* 2023, vol. 617, part B, 128925, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128925.

Klein E.S., Cherry J.E., Young J. et al. Arctic cyclone water vapor isotopes support past sea ice retreat recorded in Greenland ice, *Science Reports*, 2015, no. 5, p. 10295.

Nagavciuc V., Perşoiu A., Bădăluţă C.-A. et al. Defining a precipitation stable isotope framework in the wider Carpathian Region, *Water*, 2022, vol. 14, p. 2547, DOI: 10.3390/w14162547.

Pfahl S., Sodemann H. What controls deuterium excess in global precipitation? *Climate of the Past*, 2014, vol. 10, p. 771–781, DOI: 10.5194/cp-10-771-2014.

Puscas R., Feurdean V., Simon V. Stable isotopes composition of precipitation fallen over Cluj-Napoca, Romania, between 2009–2012, *AIP Conference Proceedings*, 2013, 1565, 308, DOI: 10.1063/1.4833751.

Putman A.L., Fiorella R.P., Bowen G.J., Cai Z. A global perspective on local meteoric water lines: meta-analytic insight into fundamental controls and practical constraints, *Water Resources Research*, 2019, vol. 55, no. 8, p. 6896–6910, DOI: 10.1029/ 2019WR025181.

Rozanski K., Araguás-Araguás L., Gonfiantini R. Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate, *Science,* 1992, vol. 258, p. 981–985, DOI: 10.1126/science.258.5084.981.

Varlam C., Duliu O.G., Ionete R.E., Costinel D. Time series analysis of the $\delta^{2}H$, $\delta^{18}O$ and d_{excess} values in correlation with monthly temperature, relative humidity and precipitation in Râmnicu Vâlcea, Romania: 2012–2018, *Geological Society, London, Special Publications*, 2021, vol. 507, iss. 1, p. 77–89, DOI: 10.1144/SP507-2020-56.

Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk J.Yu., Eremina I.D., Bludushkina L.B. Variacii znachenij $\delta^{18}O$ i soderzhanie vodorastvorimyh solej v atmosfernyh osadkah Moskvy v 2014–2016 gg. [Variations of the $\delta^{18}O$ values and water-soluble salts in precipitation in Moscow during 2014 to 2016], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 2, p. 35–43. (In Russian)

Vlasova L.S., Ferronskii V.I. Water transport over Western Europe and its correlation with climate variations based

on precipitation isotopic composition, *Water Resources*, 2008, vol. 35, no. 5, p. 502–521.

Vreča P., Kanduč T., Žigon S., Trkov Z. Isotopic composition of precipitation in Slovenia, *Isotopic composition of precipitation in the Mediterranean Basin in relation to air circulation patterns and climate*, Final report of a coordinated research project, 2000–2004, 2005, p. 157–173.

Zykin N.N., Tokarev I.V., Vinograd N.A. Monitoring of stable isotopes (δ^2H, $\delta^{18}O$) in precipitations of Moscow city (Russia): Comparison for 2005–2014 and 1970–1979 periods, *Vestnik of Saint Petersburg Un-ty, Earth Sciences,* 2021, vol. 66, no. 4, p. 723–733, DOI: 10.21638/spbu07.2021.405.

Received 22.05.2023
Revised 11.07.2023
Accepted 06.10.2023

Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2024. Т. 79. № 1. С. 125–132

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК: 528.88

ОЦЕНКА ПИРОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЛЕСНЫЕ ТЕРРИТОРИИ ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ

С.Н. Жаринов[1], Е.И. Голубева[2], М.В. Зимин[3]

[1] *ГК СКАНЭКС, департамент лесных проектов*
[2, 3] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет*
[3] *Институт географии РАН, отдел картографии и дистанционного зондирования Земли*

[1] *Руководитель; e-mail: snzharinov@mail.ru*
[2] *Кафедра рационального природопользования, проф., д-р биол. наук; e-mail: egolubeva@gmail.com*
[3] *Лаборатория аэрокосмических методов, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ziminmv@mail.ru*

Рассматриваются возможность и ограничения применения общепринятых алгоритмов детектирования поврежденных огнем лесных территорий средствами дистанционного зондирования, которые позволяют системам мониторинга в автоматическом режиме формировать данные о площадях пожаров и площадях, на которых в последующем фиксируется гибель лесных насаждений. Результирующие размеры детектируемых площадей пожаров обладают погрешностью измерений, величины которых определены на основе единовременных данных, установленных в ходе исследований в отношении обширной территории за один лесопожарный сезон. Лесные пожары, в зависимости от географических особенностей территории, имеют различные пространственно-временные и качественные характеристики, поэтому сопровождаются неоднородными повреждениями лесов, что влияет на точность дистанционного определения гари или горельника. В связи с этим применение установленной величины погрешности при исследованиях на локальном уровне может привести к неточности результатов. Анализ космических снимков земель лесного фонда Тверской области за 2007–2022 гг. показал необходимость установления региональных величин погрешности измерений площадей, пройденных пожарами. Сопоставление производных данных среднего пространственного разрешения с данными высокого пространственного разрешения доказывает наличие региональной величины отклонения от установленной величины погрешности измерений, достигающей значительных размеров при относительно малых площадях детектируемых участков. Исследование показало целесообразность установления региональных величин погрешности измерений пирогенного воздействия на лесные территории. Применение полученных результатов позволит повысить точность определения площадей лесных пожаров и размера связанного с ними ущерба по данным дистанционного мониторинга.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, космические снимки, лесные пожары, погрешность измерений

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.10

ВВЕДЕНИЕ

Существующие способы дистанционного определения мест возникновения лесных пожаров и пройденной огнем площади базируются на основе данных об изменениях радиационной температуры земной поверхности [Li et al., 2001; Giglio et al., 2003; Arino et al., 2005], а также на пространственно-временных изменениях ее спектрально-отражательных характеристик [Gregoire et al., 2003; Sukhinin et al., 2005; Roy et al., 2008]. В связи с общедоступностью и широким охватом территории космической съемкой высокого пространственного разрешения (данные со спутников Landsat и Sentinel-2) разрабатываются методы, способные с более высокой точностью, в сравнении с результатами по данным среднего пространственного разрешения (данные со спутников Terra и Aqua), определять лесные площади, которые повреждаются огнем [Богданов и др., 2017; Шихов, Зарипов, 2018], в том числе с применением нейронных сетей глубокого обучения [Вик и др., 2021]. Чрезвычайно информативные оценки пирологического воздействия на леса, расположенные на территории Российской Федерации, проводятся регулярно [Барталев и др., 2017] на основе обработки данных среднего пространственного разрешения.

Продукты разработанных алгоритмов обработки данных ДЗ, помимо иных систем, применяются в Информационной системе дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) [Информационная…, 2023]. Одним из источников информации, по данным которых они формируются, выступает прибор MODIS спутников Terra и Aqua. Пространственное разрешение исходных данных, которые обрабатываются алгоритмом, основанным на изменениях радиационной температуры, составляет 1 км, алгоритмом, основанном на фиксации изменений спектрально-отражательных характеристик, – 250 м.

Технология формирования полигональных объектов, потенциально представляющих собой пройденные огнем участки, по алгоритму, основанному на температурных аномалиях, заключается в объединении пикселов и групп пикселов, определяемых при помощи алгоритма MOD14, а также агрегацию определяемых полигонов при их сопоставимости по пространственно-временным критериям [Барталев и др., 2012].

Учет участков растительного покрова, потенциально поврежденных в результате пожара, детектируемых на основе анализа спектрально-отражательных характеристик земной поверхности проводится только на территориях, на которых ранее в текущем году регистрировались температурные аномалии. Таким образом, из общего массива данных об изменениях растительного покрова исключаются лесные территории, изменения на которых произошли по иным причинам. В качестве критерия пространственной согласованности используется наличие четырех процентов площади связанной области, совпадающей с тепловыми аномалиями. В результате выявленный участок изменения растительности считается поврежденным пожаром, если он согласуется с тепловыми аномалиями в пространственном и временном отношении. Состоятельность данного принципа приводится в ряде профильных исследований [Fraser et al., 2000; Bartalev et al., 2007].

В связи с тем что лесные пожары обладают высокой пространственно-временной вариабельностью, обусловленной характеристиками пирологических материалов, метеорологическими условиями, рельефом местности, суточной и сезонной динамикой температур очагов горения [Giglio et al., 2006], получение однородных данных о лесных пожарах на значительных территориях дистанционными методами невозможно. Известно, что при формировании данных по алгоритму, основанному на изменениях спектрально-отражательных свойств земной поверхности, точность детектирования пройденной огнем площади находится в прямой зависимости от ее размера. Исследованием [Руководство…, 2014] определено, что существенная погрешность измерения характерна для участков, площадь которых составляет менее 100 га, и различна для лесных и не лесных территорий. Результаты приведенной работы исходят из пространственно-временного сопоставления данных о площадях пройденной огнем территории в Российской Федерации в 2011 г., определенной алгоритмом, основанным на изменениях спектрально-отражательных свойств земной поверхности, с площадями, полученными при дешифрировании снимков высокого пространственного разрешения (Landsat TM/ETM+), в том числе в экспертном режиме.

Очевидно, что точность данных о площадях пожаров на лесных территориях, получаемых дистанционными методами, варьирует в зависимости от региона исследования.

Установление региональных величин погрешности измерений позволит дать более точное представление о пирогенном воздействии на лесные территории и оценивать связанный с ним ущерб дистанционными методами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки точности выявления пройденных огнем площадей на основе метода фиксации изменения спектрально-отражательных свойств поверхности на региональном уровне проведено сопоставление соответствующих результатов обработки данных прибора MODIS (пространственного разрешения 250 м/пиксель) с результатами дешифрирования спутниковых изображений высокого пространственного разрешения (от 30 до 2,5 м/пиксель), полученных приборами OLI (Landsat-8), ETM+ (Landsat-7), MSI (Sentinel-2), МСС (Канопус-В, БКА). Оценка проводилась в отношении территории земель лесного фонда в Тверской области, на которых в период с 2007 по 2022 г. алгоритмом автоматического детектирования по данным прибора MODIS зафиксированы изменения спектрально-отражательных свойств земной поверхности.

На территории, где в автоматическом режиме определены повреждения растительного покрова, с использованием ИСДМ-Рослесхоз в экспертном режиме подбирались снимки высокого пространственного разрешения. Применимость подобранного снимка должна отвечать условиям: 1) его дата отстояла по времени от момента окончания фиксации «горячей точки» в системе не более чем на три месяца; 2) цветное синтезированное изображение позволяло надежно идентифицировать поврежденные огнем территории. Оценка площадей, пройденных пожарами, проводилась средствами ГИС на основе экспертного дешифрирования материалов космической съемки высокого пространственного разрешения. Пример сопоставля-

емых пространственных данных (рис. 1) представлен пожаром, действовавшим на территории Торжокского лесничества в период с 19.08.2022 по 23.08.2022 (снимок Sentinel-2A за 25.08.2022).

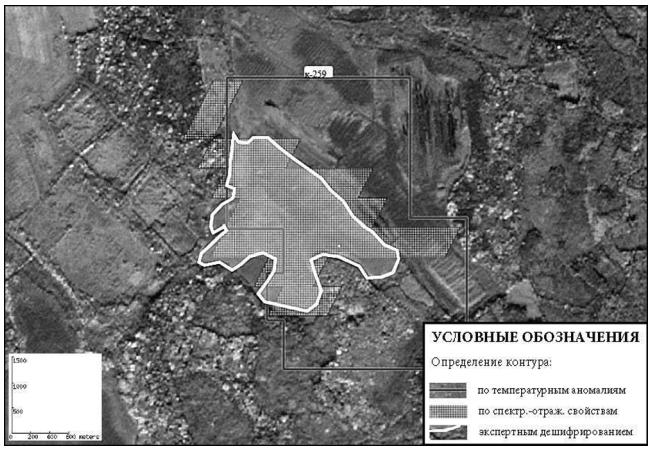


Рис. 1. Пример создания контуров лесных пожаров

Fig. 1. Example of creating forest fire contours

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На территории земель лесного фонда Тверской области в 2007–2022 гг. с применением данных ИСДМ-Рослесхоз по алгоритму, основанному на данных об изменениях радиационной температуры земной поверхности, зарегистрировано 505 участков тепловых аномалий (пространственное разрешение 1 км), в границах которых или смежных с ними территориях по алгоритму, основанному на выявлении изменений спектрально-отражательных свойств поверхности земли, в заданных условиях детектировано 236 участков (пространственное разрешение 250 м). Данные территории составили базу участков, на которые подбирались снимки высокого пространственного разрешения (2,5–30 м) для экспертного определения контуров гарей или горельника при их наличии. Для 206 участков подобраны снимки высокого пространственного разрешения, позволяющие в заданных условиях экспертным подходом идентифицировать наличие повреждений растительного покрова, вызванных пожарами. На остальные участки снимки, удовлетворяющие заданным условиям, подобрать не удалось. Визуальная оценка снимков высокого пространственного разрешения показала, что для 155 участков контуры последствий лесных пожаров визуально определяются. В данное число не вошли участки с зафиксированными изменениями спектрально-отражательных свойств поверхности, распознаваемые по снимками высокого пространственного разрешения как разработанные лесосеки, на которых очистка от порубочных остатков проводилась огневым способом (рис. 2, слева Западнодвинское лесничество, дата детектирования пожара 12.09.2017, справа Фировское лесничество, дата детектирования пожара 23–24.09.2015).

Таким образом, опорные данные, сформированные в результате дешифрирования снимков высокого пространственного разрешения, включили в себя информацию о 155 поврежденных пожарами участках, которые сопоставлялись с соответствующими им пространственными данными, определенными по алгоритму, основанному на изменениях спектрально-отражательных свойств земной поверхности. Общая площадь пожаров, определенная по алгоритму изменения спектрально-отражательных свойств поверхности, составила 45731 га, из которых 5904 га являются покрытой лесом территорией. Экспертный анализ снимков высокого пространственного разрешения показал, что общая площадь поврежденных территорий составила 38891 га, из которых 3604 га являются покрытой лесом территорией.

Для проведения оценки зависимости точности определения площади поврежденных огнем участков от их размеров все участки не более 1000 га разделялись на группы с шагом в 100 га, что обеспечило сопоставимость полученных результатов с общероссийскими данными [Руководство…, 2014]. Для каждой группы получена оценка относительной средней ошибки для покрытых и не покрытых лесом территорий.

Суммарные значения показывают относительную ошибку по общей площади в 18%, а по покрытой лесом – 64%.

Проведенный анализ данных относительно составных частей региона исследования – лесничеств показал, что величина погрешности измерений для них различна. Все площади контуров, определенные как поврежденные огнем территории, распределены по четырем агрегированным группам: до 300, 300–600, 600–900, более 900 га. В группе до 300 га с погрешностью измерения не более 50% определено 23% пожаров, с погрешностью 50–100% – 16% пожаров, с погрешностью более 100% – 61% пожаров. В группе 300–600 га с погрешностью измерений не более 50% определено 9% пожаров, с погрешностью 50–100% – 64% пожаров, с погрешностью более 100% – 27% пожаров. В группе 600–900 га с погрешностью измерений не более 50% определено 33% пожаров, с погрешностью 50–100% – 50% пожаров, с погрешностью более 100% – 17% пожаров. В группе более 900 га с погрешностью измерений не более 50% определено 75% пожаров, с погрешностью 50–100% – 25% пожаров, с погрешностью определения более 100% пожаров не зарегистрировано.

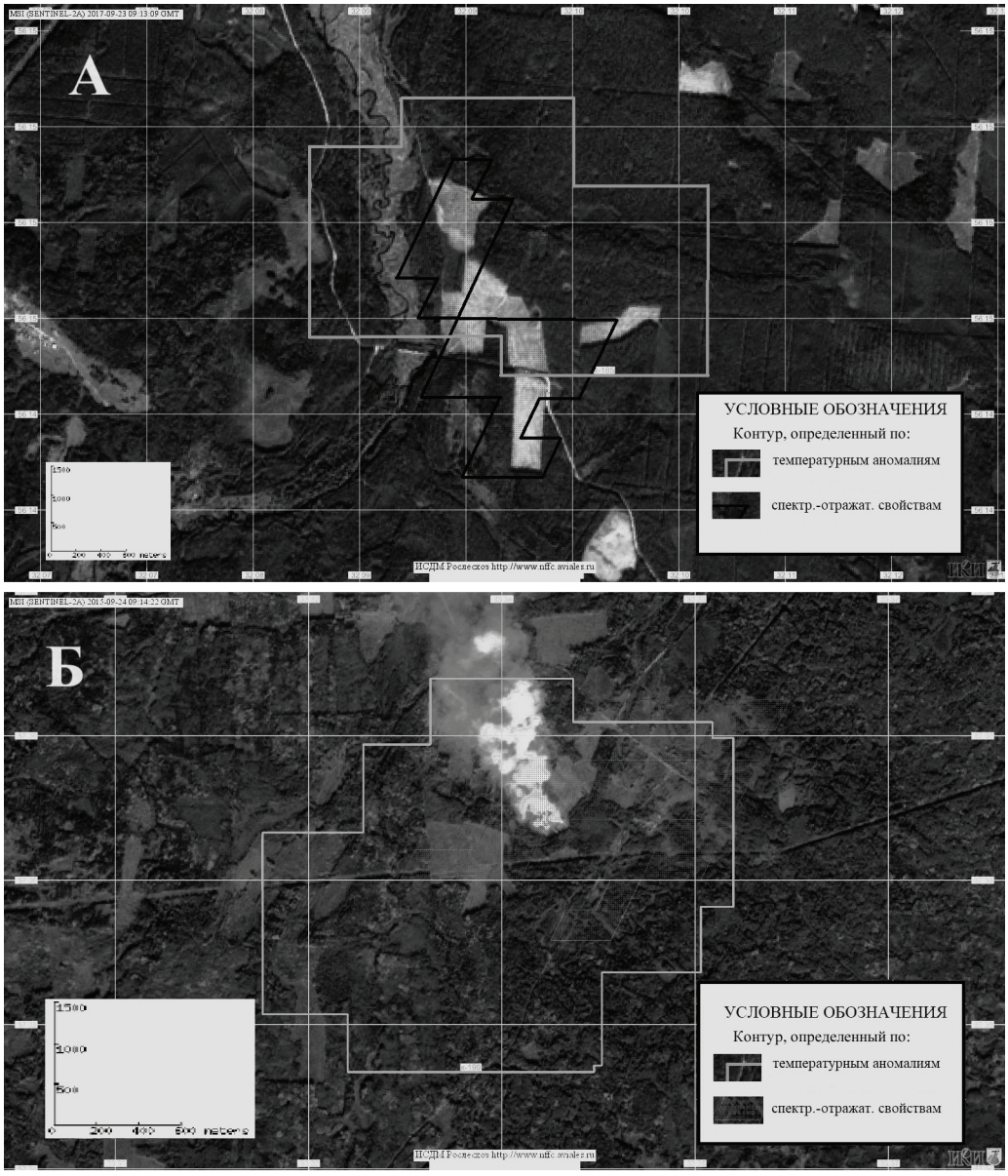


Рис. 2. Детектирование лесных пожаров на местах вырубок: А – Западнодвинское лесничество, дата детектирования пожара 12.09.2017; Б – Фировское лесничество, дата детектирования пожара 23–24.09.2015

Fig. 2. Detection of forest fires at clearing sites:
A – Zapadnodvinskoye forest district, date of fire detection 12.09.2017; Б – Firovskoye forest district, date of fire detection 23–24.09.2015

Минимальный размер относительной ошибки измерений площади отмечается для участков, выделенных в границах Бежецкого, Западнодвинского, Тверского и Удомельского лесничеств. Значительная величина погрешности измерений (более 100%) отмечается для участков, выделенных в границах Кашинского, Краснохолмского, Осташковского лесничеств (рис. 3). Однако на территории Удомельского лесничества 100% контуров имеют площадь до 300 га (в данной группе 61% контуров имеет погрешность 100% и более), а на территории Кашинского лесничества есть пожары со значительной площадью.

Взаимосвязь точности определения границ поврежденных огнем территорий от породного состава произрастающих на них деревьев не выявлена (табл.).

В лесничествах, на территории которых абсолютно преобладают мягколиственные породы деревьев, относительная ошибка измерений составляет от 37 до 74%. Территории, на которых произрастают деревья с высокой долей (от 4,3 до 4,8 единиц) в породном составе хвойных насаждений, – от 20 до 358%.

Поскольку характер повреждений лесных территорий зависит от вида пожара и его интенсивности, достоверность дистанционной определяемости границ площадей и автоматическими, и экспертными

методами имеет вариабельность. В связи с чем гипотетически пожары высокой интенсивности, действовавшие на небольших площадях вне зависимости от их видов, в значительной мере повреждают лесные территории и, как следствие, достаточно точно детектируются. Пожары низкой интенсивности, действовавшие на значительных площадях, несущественно повреждают лесные территории и, как следствие, провоцируют возникновение затруднений в определении их контуров. Вполне вероятно, что выявленные пространственные вариации ошибок измерений пройденных огнем площадей размером менее 900 га в значительной степени зависят от вида и интенсивности действовавших на данных территориях пожаров, что требует натурных исследований, которые не предусматриваются данной работой.

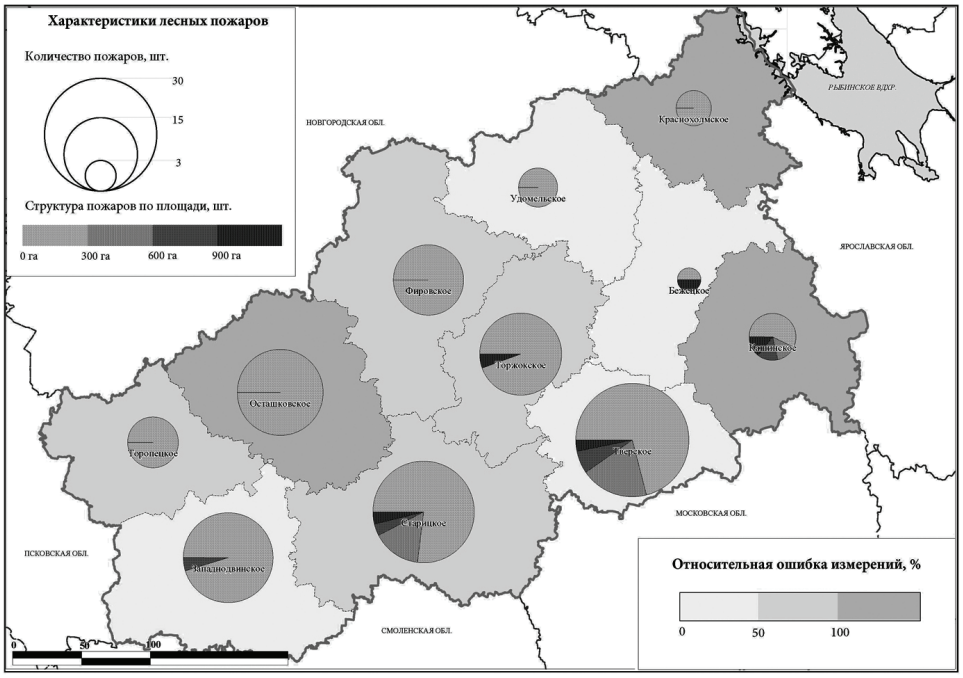


Рис. 3. Территориальная дифференциация погрешности измерений

Fig. 3. Territorial differentiation of measurement error

Таблица

Зависимость ошибки измерений от породного состава древостоев

Лесничество	Относительная ошибка измерений, %	Средний породный состав древостоев [Лесохозяйственные…, 2023]
Бежецкое	47	3.4Б2.2С1.7Ос1.5Е0.9Олс0.3Олч
Западнодвинское	37	3.3Б1.9Ос1.8Е1.8С0.6Олс0.6Олч
Кашинское	161	3Б3С1.8Е1.5Ос0.5Олс0.2Олч
Краснохолмское	274	3.2Е2.9Б1.6С1.4Ос0.8Олс0.1Олч
Осташковское	358	3.2Б2.8Е1.9С1.4Ос0.6Олс0.1Олч
Старицкое	51	3.8Б2.4Ос2Е1.3Олс0.5С
Тверское	21	3.4Б3.1С1.5Е1.3Ос0.4Олс0.3Олч
Торжокское	58	3.4Б2.2Е1.9Ос1.3С1.2Олс
Торопецкое	74	3.3Б2.7Е1.6Ос1.4С0.7Олс0.3Олч
Удомельское	20	3.3Б2.3С2Е1.6Ос0.6Олс0.2Олч
Фировское	64	3.1Б2.6Е2.3С1.4Ос0.5Олс0.1Олч
Итого		*3.2Б2.1Е1.9С1.9Ос0.7Олс0.2Олч*

ВЫВОДЫ

Полученные результаты показали, что погрешность определения площадей, пройденных огнем, на основе данных ИСДМ-Рослесхоз для территории Тверской области в целом выше значений, определенных в отношении всей территории России (рис. 4). Аналогично установленным для всей России показателям, для Тверской области погрешность измерений относительно небольших по площади территорий значительна. Погрешность измерения покрытой лесом площади имеет незначительное уменьшение по мере возрастания площади участков, в то время как общая площадь имеет заметные вариации (до 100%) и достигает значения 20% при площади детектирования более 1000 га.

Исследование показало, что в регионе относительная средняя ошибка измерений общей площади лесных пожаров размером >100 га выше, чем значение погрешности по всей территории России, на 65%, а лесной – на 20%. Для площади пожара размером 1000 га и более – на 10%, а для покрытой лесом территорий – на 40%.

Ввиду того что фактически значительная часть детектируемых случаев не является лесными пожарами, а подавляющее большинство случаев имеет большую неточность измерений в силу их площадей (средняя расчетная площадь одного пожара на участках, подтвержденных снимками высокого пространственного разрешения, по данным MODIS составляет 295 га), использование показателей пройденных огнем площадей, детектируемых по алгоритму изменений спектрально-отражательных свойств поверхности на основе данных прибора MODIS не позволяют достоверно оценивать в регионе масштабы повреждений растительности пожарами за пожароопасный сезон. Для пожаров, площадь которых значительна (более 900 га), применение результатов космического мониторинга допустимо с учетом использования показателя вероятной относительной средней ошибки.

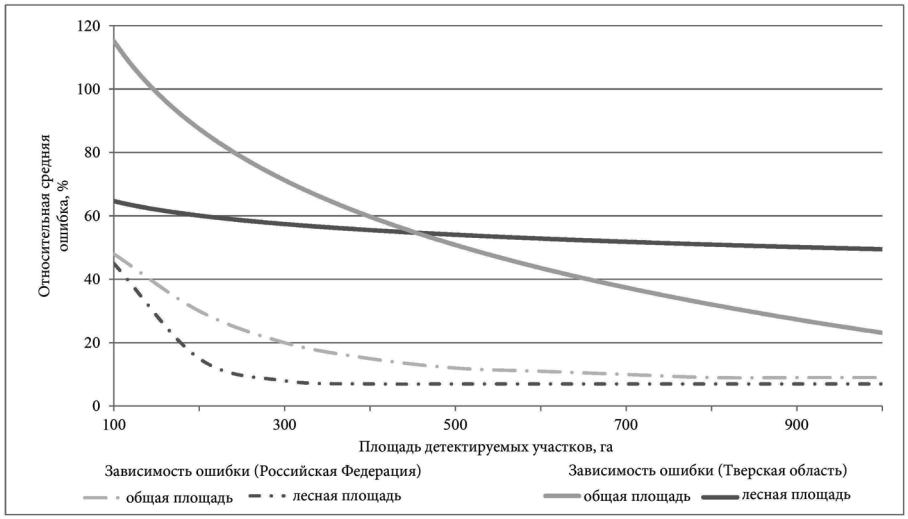


Рис. 4. Зависимость относительной средней ошибки оценки площади поврежденных пожарами участков от их размеров, по данным MODIS [Руководство…, 2014]

Fig. 4. Dependence of the relative average error in estimating the area of fire-damaged localities according to MODIS data on their size [Rukovodstvo…, 2014]

Благодарность. Исследование выполнено в рамках программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды», темы государственного задания кафедры рационального природопользования «Устойчивое развитие территориальных систем природопользования», государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0009 № 1023032700199-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е.В. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–26.

Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Хвостиков С.А., Лупян Е.А. Методология мониторинга и прогнозиро-

вания пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 176–193. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.

Богданов А.П., Алешко Р.А. Разработка методики мониторинга состояния лесов на основе использования данных мультиспектральной космосъемки, ПЭММЭ. 2017. Т. XXVIII. № 1. С. 98–110. DOI: 10.21513/0207-2564-2017-1-98-110.

Вик К.В., Друки А.А., Григорьев Д.С., Спицын В.Г. Применение нейронных сетей глубокого обучения для решения задачи сегментации лесных пожаров на спутниковых снимках // Вестник Томского гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 55. С. 18–25. DOI: 10.17223/19988605/55/3.

Руководство пользователя информационной системы дистанционного мониторинга ИСДМ-Рослесхоз для определения пожарной опасности в лесах Российской Федерации. Пушкино, 2014. 399 с.

Шихов А.Н., Зарипов А.С. Многолетняя динамика потерь лесов от пожаров и ветровалов на северо-востоке Европейской России по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 114–128. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-114-128. URL: http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=1926.

Arino O., Plummer S., Defrenne D. Fire Disturbance: The ten years time series of the ATSR World Fire Atlas, *Proceedings of the MERAS-AATSR Symposium*, ESA publication, 2005, p. 597.

Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Uvarov I.A. Multi-year circumpolar assessment the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-Vegetation, *International Journal of Remote Sensing*, 2007, vol. 28, no. 6, p. 1397–1404, DOI: 10.1080/01431160600840978.

Fraser R.H., Li Z., Cihlar J. Hotspot and NDVI Differencing Synergy (HANDS): a new technique for burned area mapping over boreal forest, *Remote Sens. Environ*., 2000, vol. 74, p. 362–376.

Giglio L., Descloitres J., Justice Ch.O. et al. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 2003, vol. 87, p. 273–282, DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00184-6.

Gregoire J.M., Tansey K., Silva J.M.N. The GBA2000 initiative: developing a global burned area database from SPOT-VEGETATION imagery, *Int. J. Remote Sens*., 2003, vol. 24, p. 1369.

Li Z., Kaufman Y.J., Ichoku C. et al. A review of AVHRR-based fire active fire detection algorithm: Principles, limitations, and recommendations, *Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space, Planning and Coordinated International Effort*, 2001, p. 199–225.

Roy D.P., Boschetti L., Justice C.O. et al. The Collection 5 MODIS Burned Area Product – Global Evaluation by Comparison with the MODIS Active Fire Product, *Remote Sens. Environ*., 2008, vol. 112, p. 3690, DOI: 10.1016/j.rse.2008.05.013.

Sukhinin A.I., French N.H.F., Kasischke E.S. et al. Satellite-based Mapping of Fires in Russia: New Products for Fire Management and Carbon Cycle Studies, *Remote Sens. Environ*., 2005, vol. 94, p. 428, DOI: 10.1016/j.rse.2004.08.011.

Электронный ресурс

Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз). URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения 13.02.2023).

Лесохозяйственные регламенты лесничеств Тверской области. URL: https://les.tver.ru/np-baza/np-dokumenty/lesnoy-plan-i-reglamenty/ (дата обращения 05.06.2023).

Поступила в редакцию 10.05.2023
После доработки 15.09.2023
Принята к публикации 06.10.2023

ASSESSMENT OF PYROGENIC IMPACT ON FOREST AREAS IN THE TVER REGION

S.N. Zharinov[1], E.I. Golubeva[2], M.V. Zimin[3]

[1] *SCANEX, Forest Project Department*
[2, 3] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*
[3] *Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Department of cartography and remote sensing of the Earth*

[1] *Head; e-mail: snzharinov@mail.ru*
[2] *Department of Environmental Management, Prof., Dr.Sc. in Biology; e-mail: egolubeva@gmail.com*
[3] *Laboratory of Aerospace Methods, Leading Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ziminmv@mail.ru*

We consider the potential and limitations of widely accepted remote sensing algorithms for detecting forest areas damaged by fires, which allow the monitoring systems to automatically form data about the fire areas and the areas where death of tree stands is subsequently recorded. The resulting size of the detected areas has a measurement error, which is typically determined on the basis of a one-time survey for a large territory and one forest fire season. Depending on the geographical features of the territory, forest fires have specific spatiotemporal and qualitative characteristics, and are accompanied by specific heterogeneous damage to forests, which affect the accuracy of remote detection of a burnt area or fire-damaged forest. Hence the use of the unified

large-area error estimate for local-level surveys could lead to inaccurate results. The analysis of space images of forest fund lands in the Tver region for the period 2007–2022 demonstrated the need to establish regional values of the measurement error for fire-impacted areas. By comparing the medium spatial resolution data with the data of high spatial resolution we identify a regional bias, which is significant given the relatively small size of the detected areas. The study demonstrates the expediency of establishing regional error values for measurements of pyrogenic impact on forest areas. By implementing the suggested changes we could improve the accuracy of remotely-sensed estimates of fire-impacted areas and the amount of associated damage to forests.

Keywords: remote sensing, space images, forest fires, measurement error

Acknowledgements. The study was performed according to the Development program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University "Future of the Planet and Global Environmental Change" and topics of the state assignment of the Department of Environmental Management "Sustainable development of territorial nature management systems", the state assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences FMWS-2024-0009 no. 1023032700199-9.

REFERENCES

Arino O., Plummer S., Defrenne D. Fire Disturbance: The ten years time series of the ATSR World Fire Atlas, *Proceedings of the MERAS-AATSR Symposium*, ESA publication, 2005, p. 597.

Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Lupyan E.A., Styitsenko F.V., Flitman E.V. Otsenka ploschadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovyh dannyh p[azlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS Landsat-TM/ETM+ [Integrated burnt area assessment based on combined use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa,* 2012, vol. 9, no. 2, p. 9–26. (In Russian)

Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Uvarov I.A. Multi-year circumpolar assessment the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-Vegetation, *International Journal of Remote Sensing*, 2007, vol. 28, no. 6, p. 1397–1404, DOI: 10.1080/01431160600840978.

Bartalev S.A., Styitsenko F.V., Hvostikov S.A., Lupyan E.A. Metodologiya monitoring i prognozirovaniya pirogennoj gibeli lesov na osnove dannyh sputnikovyh nablyudenij [Methodology for monitoring and forecasting pyrogenic forest loss based on satellite observations], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa,* 2017, vol. 14, no. 6, p. 176–193, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193. (In Russian)

Bogdanov A.P., Aleshko P.A. Development of methodology for forest monitoring based on use of data of multispectral space imagery, *Problemy ekologicheskogo monitoringa and modelirovaniya ekosistem,* 2017, vol. XXVIII, no. 1, p. 98–110, DOI: 10.21513/0207-2564-2017-1-98-110.

Fraser R.H., Li Z., Cihlar J. Hotspot and NDVI Differencing Synergy (HANDS): a new technique for burned area mapping over boreal forest, *Remote Sens. Environ*, 2000, vol. 74, p. 362–376.

Giglio L., Descloitres J., Justice Ch.O. et al. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS, *Remote Sensing of Environment,* 2003, vol. 87, p. 273–282, DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00184-6.

Gregoire J.M., Tansey K., Silva J.M.N. The GBA2000 initiative: developing a global burned area database from SPOT-VEGETATION imagery, *Int. J. Remote Sens*., 2003, vol. 24, p. 1369.

Li Z., Kaufman Y.J., Ichoku C. et al. A review of AVHRR-based fire active fire detection algorithm: Principles, limitations, and recommendations, *Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space, Planning and Coordinated International Effort*, 2001, p. 199–225.

Roy D.P., Boschetti L., Justice C.O. et al. The Collection 5 MODIS Burned Area Product – Global Evaluation by Comparison with the MODIS Active Fire Product, *Remote Sens. Environ*., 2008, vol. 112, p. 3690, DOI: 10.1016/j.rse.2008.05.013.

Rukovodstvo polzovatelya informatsionnoj sistemy distantsionnogo monitoring ISDM-Rosleshoz dlya opredeleniya pozharnoj opasnosti v lesah Rossijskoj Federatsii [User's Guide for the remote monitoring information system ISDM-Rosleskhoz for determining fire danger in the forests of the Russian Federation], Pushkino, 2014, 399 p. (In Russian)

Shihov A.N., Zaripov A.S. Mnogoletnyaya dinamika poter' lesov ot pozharov i vetrovalov na severo-vostoke Evropejskoj Rossii po sputnikovym dannym [Long-term dynamics of forest losses from fires and windfalls in the north-east of European Russia according to satellite data], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [*Current problems in remote sensing of the Earth from space*], 2018, vol. 15, no. 7, p. 114–128, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-114-128. (In Russian)

Sukhinin A.I., French N.H.F., Kasischke E.S. et al. Satellite-based Mapping of Fires in Russia: New Products for Fire Management and Carbon Cycle Studies, *Remote Sens. Environ*., 2005, vol. 94, p. 428, DOI: 10.1016/j.rse.2004.08.011.

Vik K.V., Druki A.A., Grigoriev D.S., Spicyn V.G. Application of deep learning neural networks to solve the problem of segmentation of forest fires on satellite images, *Vestnik Tomskogo gos. Un-ta, Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2021, no. 55, p. 18–25, DOI: 10.17223/19988605/55/3. (In Russian)

Web sources

Informatsionnaya sistema distantsionnogo monitoring Federalnogo agentstva lesnogo hozyajstva [Information system for remote monitoring of the Federal Forestry Agency] (ISDM-Rosleskhoz), URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (access date 13.02.2023). (In Russian)

Lesohozyajstvennye reglamenty lesnichestv Tverskoj oblasti [Forestry regulations of forest districts of the Tver region], URL: https://les.tver.ru/np-baza/np-dokumenty/lesnoy-plan-i-reglamenty/ (access date 05.06.2023). (In Russian)

Received 10.05.2023
Revised 15.09.2023
Accepted 06.10.2023

Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2024. Т. 79. № 1. С. 133–140

УДК 911.372.93

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ РЕВИТАЛИЗАЦИИ СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ «БЕЗ НАСЕЛЕНИЯ»

А.А. Смирнова

Тверской государственный университет, факультет географии и геоэкологии, кафедра социально-экономической географии и территориального планирования, доцент, канд. геогр. наук; e-mail: alpresents@mail.ru

В статье предложена методика выявления «оживающих» сельских населенных пунктов (СНП). На примере Тверской области показано, какие особенности географического положения поселений определяют их возможности для ревитализации. Проведенная ранее типология, построенная на анализе космических снимков, показала большую дифференциацию в степени деградации СНП, отнесенных по переписи 2010 г. к категории «без населения». Дальнейшая работа по определению ведущих факторов ревитализации была построена на изучении тех СНП, где в наибольшей степени сохранились дома и хозяйственные постройки, идентифицируемые по космическим снимкам. В качестве ключевых черт географического положения, влияющих на перспективы оживления территории, выбраны близость к рекам и водоемам, положение относительно федеральных и региональных автодорог, нахождение вблизи областного и/или районного центра. Признаками, свидетельствующими о ревитализации СНП, стали наличие зарегистрированных жителей (по данным текущего учета) и отмежеванных кадастровых участков.

Исследование показало, что треть всех СНП, которые в 2010 г. были отражены в статистике как пункты «без населения», в настоящее время могут считаться «оживающими». Для Тверской области ключевым фактором ревитализации СНП является его близость к реке, главным образом к Волге. Другой важный фактор – нахождение в зоне влияния основных центров, в первую очередь Твери. Основной функцией является рекреационное (дачное) использование таких деревень.

Ключевые слова: сельское расселение, заброшенные сельские населенные пункты, Тверская область

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.11

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы депопуляции сельской местности, ее деградации и маргинализации характерны для многих стран и регионов, различных по численности и плотности населения, хозяйственному укладу и уровню развития экономики, истории и культурным традициям [Knight, 1994; Liu et al., 2010; Vaishar et al., 2021]. Населенные пункты исчезали во все времена и по разным причинам. Урбанизация стала главной причиной современной поляризации сельского пространства, которая, в свою очередь, проявляется в интенсивном социально-экономическом развитии одних мест и в полном опустении других. При этом в каждой стране есть свои примеры, практики и механизмы по оживлению сельских территорий. При описании имеющегося опыта по возвращению конкретных населенных пунктов «в строй» используется концепция «возрождающейся (оживающей) деревни» (reviving village) [Latocha et al., 2021].

Термин *revival* – «возрождение» («оживление») – продолжает ряд «ре-терминов», встречающихся в литературе и осмысленных в работе М.С. Гунько с соавторами [Гунько и др., 2019]. Приведенные в указанной статье понятия различаются, в первую очередь, масштабом изменений, для описания которых они служат – от точечной реконструкции до комплексной регенерации. Они используются, главным образом, в исследованиях городских трансформаций, однако также применимы и для кейсов, демонстрирующих позитивные перемены в сельской местности.

Возрождение (revival) можно трактовать как возобновление чего-либо, прекратившего свое существование [Возрождение, 1999]. Этот термин употребляется некоторыми авторами по отношению к небольшим, сильно депопулировавшим или даже исчезнувшим населенным пунктам. В литературе встречается и широко известный в других отраслях знания термин «ренессанс» (renaissance), но его использование скорее связано с привлечением внимания к проблеме, а не с научной концептуализацией и терминологическими поисками.

Несмотря на то что по смысловому значению в отношении рассматриваемых сельских населенных пунктов «без населения» ближе термин revival, в силу особенностей русскоязычного перевода так же, как и в упомянутой выше работе [Гунько и др., 2019], выбран термин «ревитализация», который обозначает «возвращение к жизни» и зачастую ис-

пользуется в исследованиях заброшенных сельских мест [Knight, 1994; Di Figlia, 2016].

Понятие ревитализации используется довольно часто и в разных контекстах. Наибольшее осмысление в литературе получили проблемы ревитализации городских территорий – исторических центров [Орлова и др., 2020] и промышленных площадок [Бердник, Еременко, 2021]. Есть исследования демографической [Antipova, Fakeyeva, 2013], экономической [Мальцев, Мордвинова, 2019] и экологической [Крамер и др., 2012] ревитализации, где анализируются позитивные изменения в соответствующей сфере в том или ином регионе. Некоторые аспекты ревитализации сельских территорий находят отражение в исследованиях, и одно из ярких подтверждений этому – тематическая секция на Форуме полевых интервьюеров [Божков, 2019]. Однако вопросы возрождения конкретных сельских населенных пунктов, рассматриваемые не на отдельных примерах, а для большого числа случаев, в отечественной науке практически не исследованы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика отнесения сельского населенного пункта к числу «оживающих» у каждого автора своя. Часто в основании этой процедуры лежит оценка степени депопуляции или забрасывания СНП. Так, в исследовании Ntassiou [2021] предложено три стадии опустения деревень – малые убывающие, заброшенные и исчезнувшие. Далее с помощью разных данных, зависящих от особенностей национального статистического учета и используемых методов сбора информации, из перечня деревень выбираются те пункты, которые отвечают авторским критериям «оживающего» СНП.

В данном исследовании работа по выявлению «оживающих» СНП строилась по следующей методике (рис. 1). В качестве исходного массива выбраны сельские населенные пункты Тверской области, в которых, согласно переписи 2010 г., постоянно проживающее население отсутствовало. Степень их деградации была оценена ранее на основе данных космических снимков [Румянцев и др., 2021]. К ведущим факторам, влияющим на возможности ревитализации, отнесены особенности географического положения СНП. Признаками, свидетельствующими о его оживлении, стали наличие зарегистрированных жителей (по данным сайта «Открытый бюджет Тверской области») и отмежеванных участков (по данным Публичной кадастровой карты). Адекватность предложенной методики была оценена путем полевых наблюдений в нескольких деревнях, выбранных из итогового списка «оживающих» СНП.

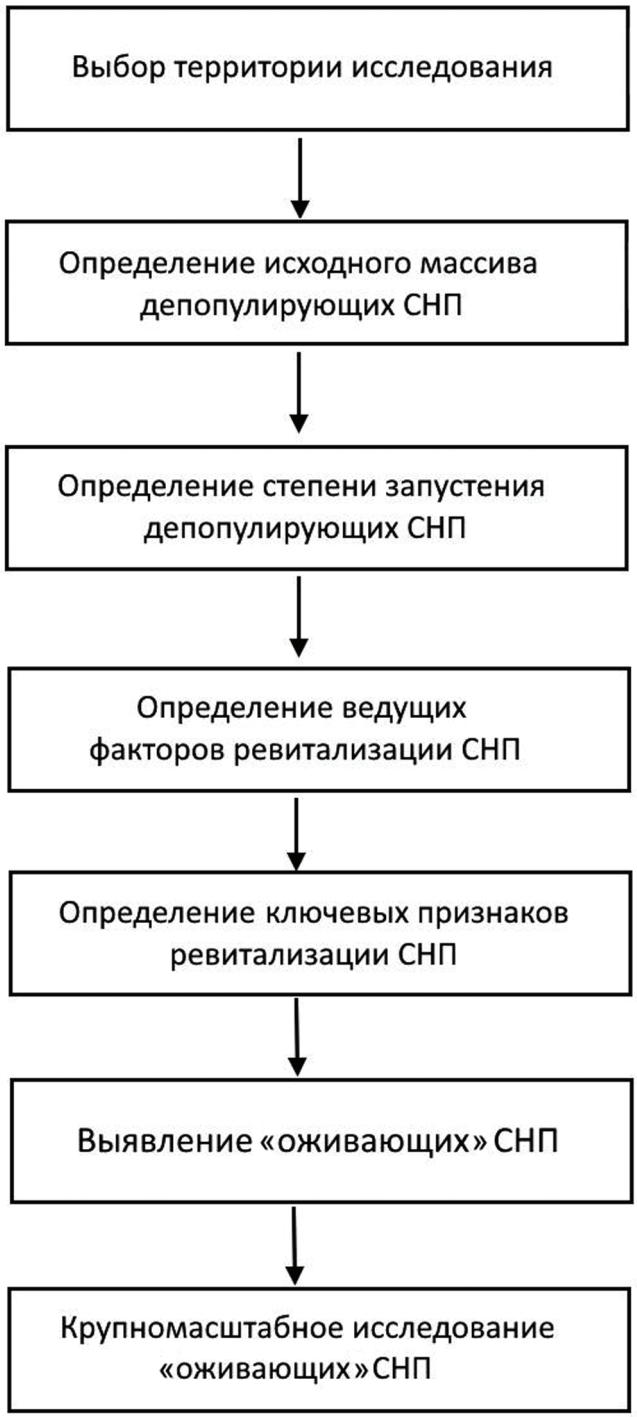


Рис. 1. Методика выявления «оживающих» СНП

Fig. 1. Technique for identifying “reviving” rural settlements

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее [Румянцев и др., 2021] было показано, что, несмотря на фиксируемое переписью отсутствие населения и попадание СНП в одну категорию «без населения», между ними существует сильная дифференциация в их внешнем облике и использовании.

Согласно проведенному анализу космических снимков, из 2230 СНП «без населения» (по переписи 2010 г.) каждый пятый (472) может быть назван обитаемым. Такие СНП трудно отличить от деревень с населением. В них хорошо просматриваются дома, постройки вокруг, заборы и др. На снимках можно разглядеть обрабатываемые земельные участки – огороды и сады. В деревнях, расположенных на берегах рек и озер, можно различить пристани и лодки. Поскольку крыши домов в таких СНП зачастую сделаны из современных материалов, то и на снимках заметны яркие пятна. Еще треть СНП (735) названы «оставленными». Их внешний облик чуть хуже, чем у обитаемых, – вокруг домов часто отсутствуют заборы и хозяйственные постройки, также нельзя распознать обрабатываемые участки, дороги не так легко различимы. Суммарно на эти две группы приходится более половины всех рассматриваемых СНП. Именно они подлежат более подробному рассмотрению с точки зрения возможных перспектив их повторного (или продолжающегося) использования (рис. 2). Остальные пункты, поделенные между двумя типами – «исчезнувшие» (где не осталось построек или сохранилось небольшое их количество) и «пустоши» (где нет ни дорог, ни строений), – не представляют интереса для анализа их перспектив, так как, вероятно, выйдут из перечня населенных мест.

Факторами, определяющими перспективы СНП без населения, выбраны следующие – близость к районному центру, транспортная доступность, нахождение вблизи крупных рек и водоемов.

В выборку по положению из 1207 обитаемых и оставленных СНП попали 679 пунктов (рис. 3), среди которых преобладают приречные СНП, на втором месте – смешанные, для которых выполняются два любые критерии по положению (самые распространенные – приречно-придорожные), на третьем – прицентровые (табл. 1). Самая малочисленная группа – комплексные, географическое положение которых наиболее благоприятно – недалеко от центра, вблизи трассы, у реки или водоема.

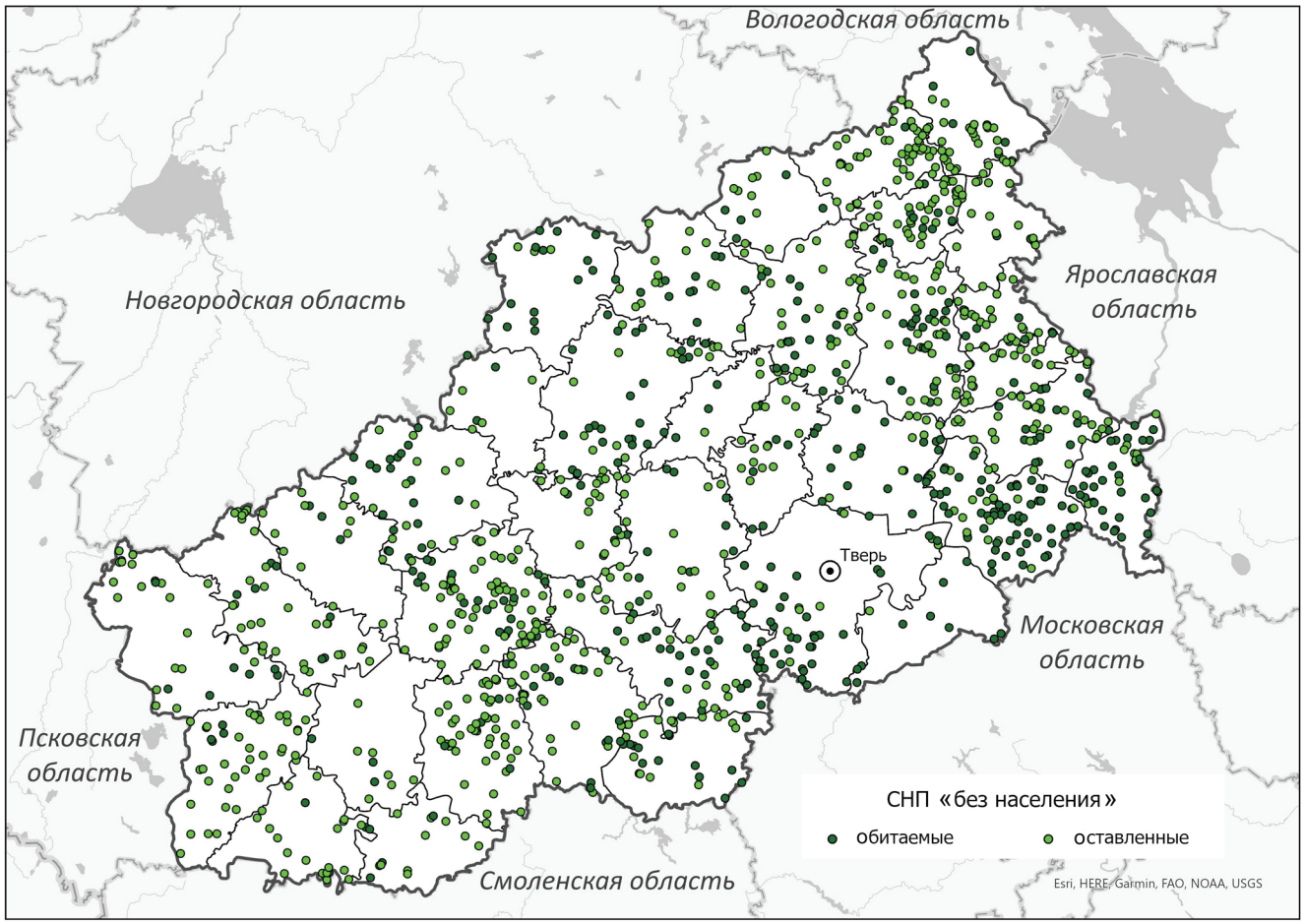


Рис. 2. Обитаемые и оставленные СНП «без населения»

Fig. 2. Inhabited and abandoned rural settlements “without population”

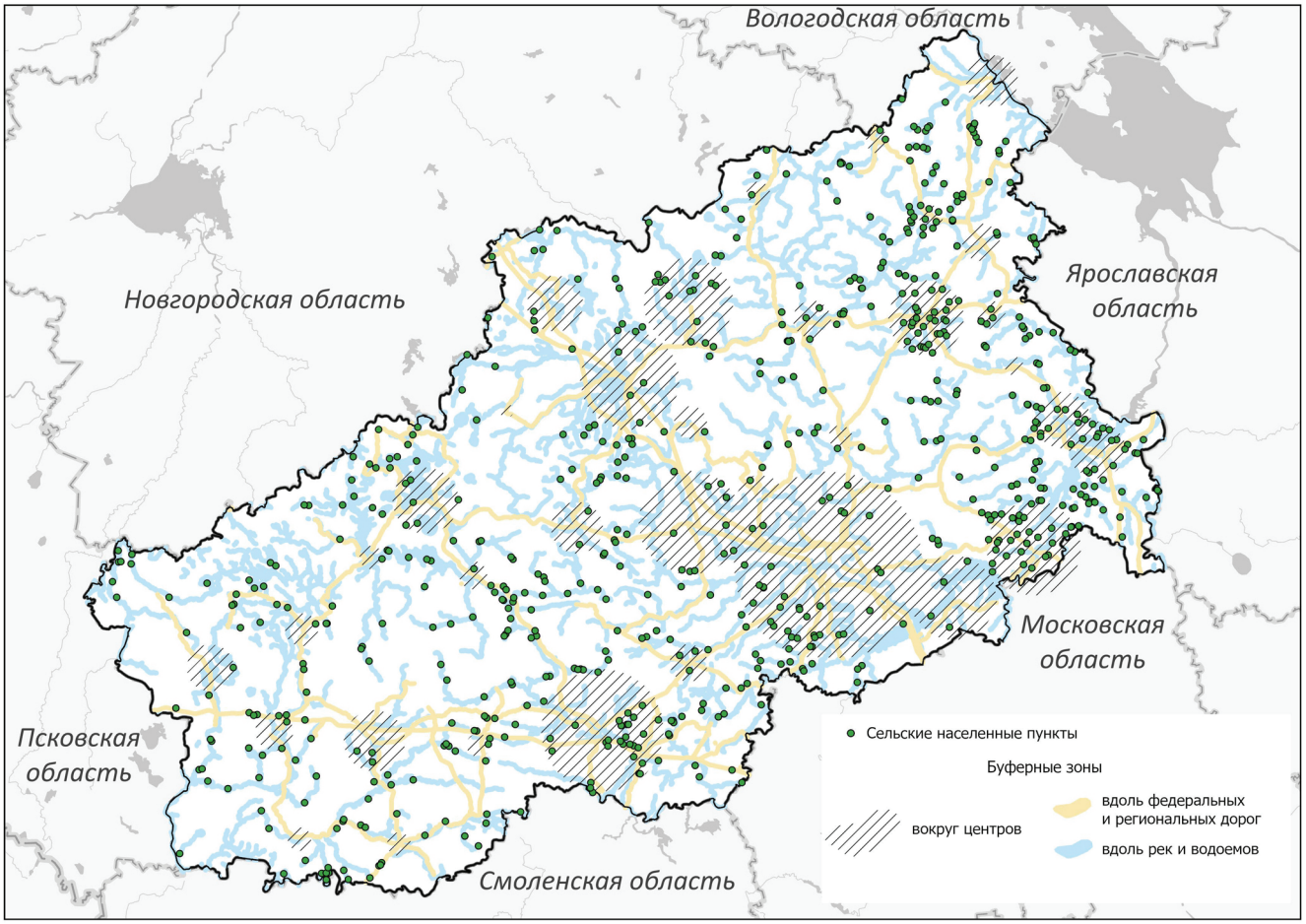


Рис. 3. СНП, отобранные для дальнейшего рассмотрения

Fig. 3. Rural settlements selected for further consideration

Таблица 1

Группировка выбранных СНП без населения по положению

Группа	Число СНП
Приречные	386
Притрассовые	42
Прицентровые	104
Смешанные, в т. ч.	139
приречно-придорожные	29
приречно-прицентровые	91
придорожно-прицентровые	18
Комплексные	9
Всего	*679*

Для того чтобы оценить, какие условия по местоположению являются наиболее значимыми для ревитализации населенного пункта, были рассмотрены его текущая людность и наличие отмежеванных кадастровых участков. Первый признак, хоть и может искажать картину, показывая зачастую «мертвые души» – зарегистрированное, но не проживающее население, в любом случае отражает интерес к СНП, потому что даже временные жильцы выбирают определенные деревни. Второй признак показывает потенциал повторного освоения – если проведено межевание, значит, владельцы рассматривают участки для собственного использования или продажи.

По данным публичной кадастровой карты, в половине исследуемых СНП (349 из 679) есть зарегистрированные участки, предназначенные для индивидуального жилищного строительства или ведения личного подсобного хозяйства. Еще в шести пунктах есть отмежеванные земли для других видов деятельности (предпринимательской, лечебно-оздоровительной, ритуальной). В 209 СНП есть участки, которые имеют статус «ранее учтенный», т. е. право на них было зарегистрировано до 1 марта 2008 г. – даты, когда вступил в силу новый правовой акт, регулирующий вопросы, связанные с недвижимостью. Наличие такого статуса, с одной стороны, не дает оснований в полной мере считать населенный пункт повторно освоенным. С другой стороны, есть много сложностей, препятствующих регистра-

ции земли в сельской местности – незнание самих процедур, финансовая сторона вопроса, укрупнение сельских поселений и передача полномочий на уровень района, утрата документов. В связи с этим СНП с ранее учтенными участками рассматриваются в качестве «оживающих» населенных мест в том случае, если там есть зарегистрированное на данный момент население. Число таких пунктов – 61.

По данным текущего учета, в 240 СНП, бывших по переписи 2010 г. без населения, зафиксированы проживающие. В подавляющем большинстве пунктов современная людность не превышает 10 человек, но есть 12 деревень, где зарегистрировано более 10 проживающих.

Деревни, где отмечено наличие двух признаков – и текущего населения, и зарегистрированной земли – можно отнести к «оживающим». Их оказалось 227 (рис. 4), это каждый десятый из всех пунктов «без населения». Это треть всех пунктов, отобранных по типу и положению (рис. 5).

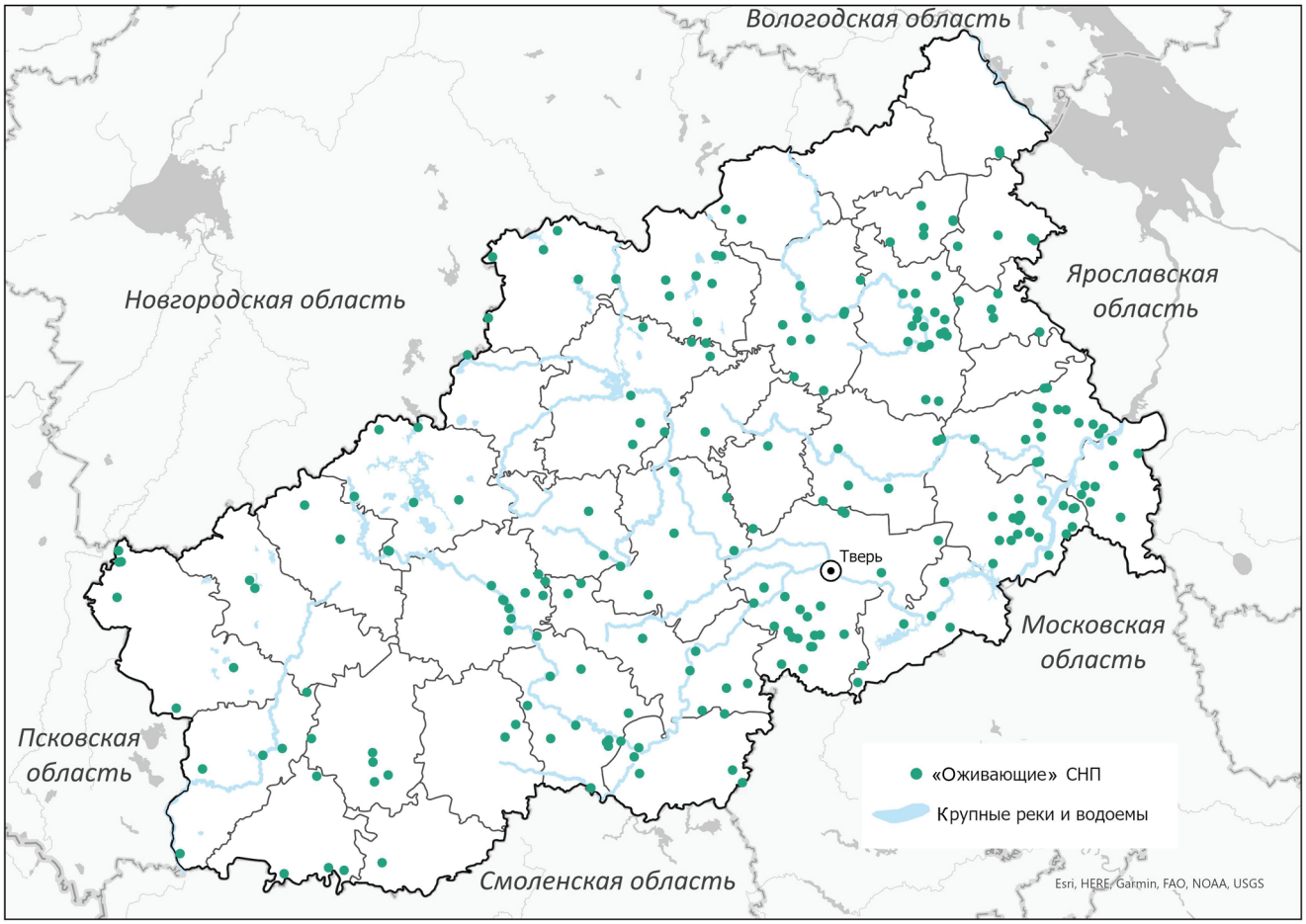


Рис. 4. «Оживающие» СНП

Fig. 4. Reviving rural settlements

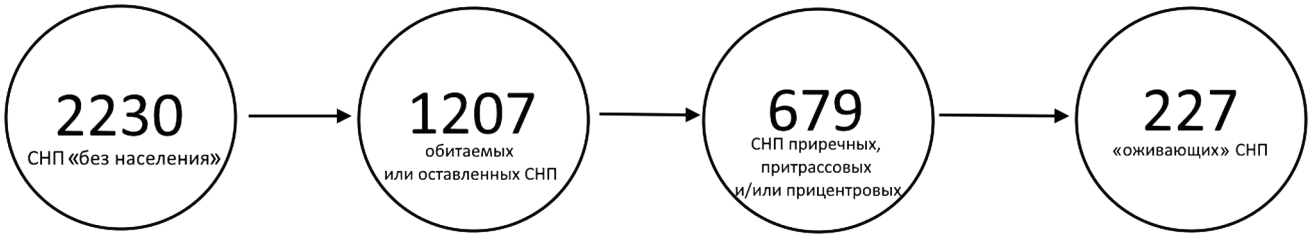


Рис. 5. Исследуемое число СНП на разных этапах отбора

Fig. 5. The studied number of rural settlements at different stages of selection

Анализ местоположения «оживающих» СНП (табл. 2) показал, что главным фактором ревитализации обезлюдевшей деревни Тверской области является рекреационное использование, потому что большая часть таких СНП расположена вдоль рек, привлекательных для отдыха горожан. Суммарно на долю приречных СНП (включая те, которые расположены также вблизи дорог и центров) приходится 52% всех пунктов. Главной осью, концентрирующей вдоль себя устойчивые СНП, выступает Волга и цепь созданных на ней водохранилищ. Семь из девяти СНП, имеющих комплексное расположение (и вблизи центров, и у дорог, и вдоль рек), попали в число «оживающих», что говорит о важности совокупности этих факторов для устойчивости сельского расселения в целом.

Таблица 2

Группировка «оживающих» СНП по положению

Группа	Число СНП
Приречные	104
Притрассовые	13
Прицентровые	50
Смешанные, в т. ч.	53
приречно-придорожные	9
приречно-прицентровые	37
придорожно-прицентровые	7
Комплексные	7
Всего	*227*

В силу того, что исследование носит пилотный характер и представленная методика опробована впервые, полевое исследование ограничилось несколькими населенными пунктами. Наблюдения, проведенные в нескольких деревнях Калининского и Торжокского районов, подтвердили наличие рекреационного (дачного) населения в «оживающих» СНП. Деревни, официально «без населения», не выглядели таковыми. Оживление особенно заметно в начале летнего сезона, когда активизируется работа по приведению в порядок домов и участков. Кейсы деревень Доншино, Малое Избрижье и Гудково (рис. 6) показали работоспособность предложенной методики, наглядно демонстрируя своим обликом, что было бы ошибочным относить их к обезлюдевшим. Еще один яркий пример оживления и подтверждения значимости факторов местоположения – деревня Шапкино, где второй год активно работает семейная ферма «12 дубов» (https://12dubov.ru/), организующая экскурсии для знакомства с хозяйством и по запросу предлагающая обеды из фермерских продуктов для всех желающих. Безусловно, такие положительные примеры оживления периферийных территорий в Нечерноземье не носят массовый характер, это скорее отдельные феномены или аномалии [Аверкиева, 2018].

ВЫВОДЫ

Наряду с широким освещением проблем заброшенных и опустевших деревень появляется все больше работ, где исследуются возможности и результаты возрождения сельских населенных мест. Несмотря на различия в методиках, с помощью которых идентифицируются «оживающие» деревни, принципы их построения довольно схожи – оценка степени деградации сельских территорий в начале, выбор и анализ показателей для определения «оживающих» на следующем этапе, полевое исследование для подтверждения действенности выбранной стратегии в конце.

Для Тверской области в силу ее межстоличного положения рекреационное (особенно – дачное) возрождение многих деревень без населения выглядит наиболее реалистичным сценарием. Среди факторов, выбранных с учетом основных направлений трансформации сельского расселения и отражающих особенности географического положения населенного пункта, главным условием оживления деревни оказалось положение по берегам основных рек.

Рис. 6. Примеры домов в «оживающих» СНП:
А – Доншино (Торжокский район); Б – Малое Избрижье; В – Гудково (оба – Калининский район)

Fig. 6. Examples of houses in reviving rural settlements:
A – Donshino (Torzhoksky district); Б – Maloye Izbrizhie; B – Gudkovo (both – Kalininsky district)

Расположенные в агломерационной зоне Твери населенные пункты, несмотря на утрату постоянного населения, также имеют потенциал оживления – за счет развития как дачной, так и спальной функций.

Исследование показало, что каждый десятый из официального перечня пунктов без населения в Тверской области может быть отнесен к оживающим. Это свидетельство того, что, несмотря на небольшое число таких СНП, их игнорирование искажает представление о реальной сети сельского расселения в регионе.

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ, проект 27-17-00112.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аверкиева К.В. Восток Вологодской области как социально-экономическая и культурная аномалия // Проблемы развития территории. 2018. № 6(98). С. 131–148. DOI: 10.15838/ptd.2018.6.98.9.

Бердник Т.О., Еременко Ю.И. Ревитализация промышленных территорий в контексте сохранения объектов культурного наследия // Декоративное искусство и предметно-пространственная среда. Вестник РГХПУ им. С.Г. Строганова. 2021. № 2. Ч. 2. С. 179–185.

Божков О.Б. Форум полевых интервьюеров в Петербурге // Телескоп: журнал социологических и маркетинговых исследований. 2019. № 5. С. 77–79.

Возрождение // Словарь русского языка. Т. 1: А–Й. М.: Рус. яз.; Полиграфресурсы, 1999. С. 203.

Гунько М.С., Пивовар Г.А., Аверкиева К.В. Ревитализация в малых городах Европейской России (на примере Боровичей, Выксы, Ростова) // Известия РАН. Сер. географическая. 2019. № 5. С. 18–31.

Крамер Д.А., Неруда М., Тихонова И.О. Европейский опыт ревитализации малых рек // Научный диалог. 2012. № 2. С. 122–128.

Мальцев А.А., Мордвинова А.Э. Ревитализация старопромышленных регионов: зарубежный опыт // Мировая экономика и международные отношения. 2019. Т. 63. № 7. С. 40–48.

Орлова Н.А., Орлов Д.Н., Гаршина А.А. Ревитализация исторического квартала. Опыт применения контекстуального подхода // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10. № 4. С. 108–118. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.04.14.

Румянцев И.Н., Смирнова А.А., Ткаченко А.А. Сельские населенные пункты «без населения» как географический и статистический феномен // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 1. С. 29–37.

Antipova E.A., Fakeyeva L.V. Demographic revitalization of Belarusian towns in the XXI century, *Problemy Rozwoju Miast*, 2013, no. 1, p. 113–122.

Di Figlia L. Turnaround: abandoned villages, from discarded elements of modern Italian society to possible resources, *International Planning Studies*, 2016, vol. 21, no. 3, p. 278–297.

Knight J. Rural Revitalization in Japan: Spirit of the Village and Taste of the Country, *Asian Survey*, 1994, vol. 34, no. 7, p. 634–646.

Latocha A., Szmytkie R., Sikorski D. et al. Reviving villages – a proposal for a concept and identification. A methodological approach, *Geographia Polonica*, 2021, vol. 94, iss. 1, p. 5–27.

Liu Y., Liu Y., Chen Y., Long H. The process and driving forces of rural hollowing in China under rapid urbanization, *J. of Geographical Sciences*, 2010, vol. 20, iss. 6, p. 876–888.

Ntassiou K. Studying abandoned settlements' renaissance in the context of rural geography: perspectives for Prespes, Greece, *European Planning Studies*, DOI: 10.1080/09654313.2021.1957085.

Vaishar A., Vavrouchová H., Lešková A., Peřinková V. Depopulation and Extinction of Villages in Moravia and the Czech Part of Silesia since World War II, *Land*, 2021, vol. 10, 333, DOI: 10.3390/land10040333.

Поступила в редакцию 27.06.2023
После доработки 02.08.2023
Принята к публикации 06.10.2023

GEOGRAPHICAL FACTORS OF REVITALIZATION OF RURAL SETTLEMENTS "WITHOUT POPULATION"

A.A. Smirnova

Tver State University, Faculty of Geography and Geoecology, Department of Socio-Economic Geography and Territorial Planning, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: alpresents@mail.ru

The article proposes a method for identifying "reviving" rural settlements (RS). Case studies of the Tver region RS revealed what features of the geographical location determine a settlement opportunities for revitalization. The previous typology, based on the analysis of satellite images, showed a considerable differentia-

tion in the degree of RS degradation, classified according to the 2010 census as "without population". Further work to determine the leading factors of revitalization was based on the study of those RS where the houses and outbuildings, identified by satellite images, have been preserved to the greatest extent. Nearness to rivers and water bodies, position relative to federal and regional highways, and location near the regional and/or district center were chosen as key features of the geographical location that have an effect on the prospects for revitalization of a territory. The presence of registered residents (according to current records) and demarcated cadastral plots are indicators of the RS revitalization.

The study showed that one third of all RS, which fell into the category "without population" according to 2010 statistics, could now be considered "reviving". A key factor in the revitalization of rural settlements of the Tver region is their nearness to the river, mainly to the Volga River. Another important factor is the location in the zone of influence of main centers, primarily the city of Tver. The main function is the recreational (dacha) use of such villages.

Keywords: rural settlement pattern, abandoned rural settlements, Tver region

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 27-17-00112).

REFERENCES

Antipova E.A., Fakeyeva L.V. Demographic revitalization of Belarusian towns in the XXI century, *Problemy Rozwoju Miast*, 2013, no. 1, p. 113–122.

Averkieva K.V. Vostok Vologodskoj oblasti kak sotsialno-ekonomicheskaya i kulturnaya anomaliya [East of the Vologda Oblast as a Socio-Economic and Cultural Anomaly], *Problemy razvitija territorii*, 2018, no. 6(98), p. 131–148, DOI: 10.15838/ptd.2018.6.98.9. (in Russian)

Berdnik T.O., Eremenko Y.I. Revitalizacija promyshlennyh territorij v kontekste sohranenija ob'ektov kul'turnogo nasledija [Revitalization of industrial territories in the context of preservation of objects of cultural heritage], *Dekorativnoe iskusstvo i predmetno-prostranstvennaja sreda, Vestnik RGHPU im. S.G. Stroganova,* 2021, no. 2(2), p. 179–185. (in Russian)

Bozhkov O.B. Forum polevyh interv'juerov v Peterburge [Forum of field interviewers in St. Petersburg], *Teleskop: zhurnal sociologicheskih i marketingovyh issledovanij,* 2019, no. 5, p. 77–79. (in Russian)

Di Figlia L. Turnaround: abandoned villages, from discarded elements of modern Italian society to possible resources, *International Planning Studies*, 2016, vol. 21, no. 3, p. 278–297.

Gun'ko M.S., Pivovar G.A., Averkieva K.V. Revitalizacija v malyh gorodah Evropejskoj Rossii (na primere Borovichej, Vyksy, Rostova) [Revitalization of Small Cities in European Russia (Case Studies of Borovichi, Vyksa and Rostov)], *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk, Seriya Geograficheskaya*, 2019, no. 5, p. 18–31. (in Russian)

Knight J. Rural Revitalization in Japan: Spirit of the Village and Taste of the Country, *Asian Survey*, 1994, vol. 34, no. 7, p. 634–646.

Kramer D.A., Neruda M., Tikhonova I.O. Evropejskij opyt revitalizacii malyh rek [European experience of small rivers revitalization], *Nauchnyj dialog,* 2012, no. 2, p. 122– 128.

Latocha A., Szmytkie R., Sikorski D. et al. Reviving villages – a proposal for a concept and identification. A methodological approach, *Geographia Polonica*, 2021, vol. 94, iss. 1, p. 5–27.

Liu Y., Liu Y., Chen Y., Long H. The process and driving forces of rural hollowing in China under rapid urbanization, *J. of Geographical Sciences*, 2010, vol. 20, iss. 6, p. 876–888.

Mal'tsev A.A., Mordvinova A.E. Revitalizacija staropromyshlennyh regionov: zarubezhnyj opyt [Old Industrial Areas Revitalization: Foreign Experience], *Mirovaja ekonomika i mezhdunarodnye otnoshenija,* 2019, vol. 63, no. 7, p. 40–48. (in Russian)

Ntassiou K. Studying abandoned settlements' renaissance in the context of rural geography: perspectives for Prespes, Greece, *European Planning Studies*, DOI: 10.1080/09654313.2021.1957085.

Orlova N.A., Orlov D.N., Garshina A.A. Revitalizacija istoricheskogo kvartala. Opyt primenenija kontekstual'nogo podhoda [Revitalization of a Historical Quarter. Experience of the Contextual Approach Application], *Gradostroitel'stvo i arhitektura,* 2020, vol. 10, no. 4, p. 108–118. (in Russian)

[Revival], *Slovar' russkogo jazyka* [Dictionary of the Russian language], vol. 1, "А–Й", Moscow, Poligrafresursy Publ., 1999, p. 203. (in Russian)

Rumjancev I.N., Smirnova A.A., Tkachenko A.A. Sel'skie naselennye punkty "bez naselenija" kak geograficheskij i statisticheskij fenomen [Rural settlements "without a population" as a geographical and statistical phenomenon], *Vestnik Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr*., 2019, no. 1, p. 29–37. (in Russian)

Vaishar A., Vavrouchová H., Lešková A., Peřinková V. Depopulation and Extinction of Villages in Moravia and the Czech Part of Silesia since World War II, *Land*, 2021, vol. 10, p. 333, DOI: 10.3390/land10040333.

Received 27.06.2023
Revised 02.08.2023
Accepted 06.10.2023

Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2024. Т. 79. № 1. С. 141–148

УДК 551.465.45

ОБЪЕМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИХООКЕАНСКИХ ВОД В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ

Ж.М. Куликова[1], **С.А. Добролюбов**[2]

[1, 2] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии*

[1] *Аспирант; e-mail: kulikovazh9@gmail.com*
[2] *Зав. кафедрой, д-р геогр. наук; e-mail: science@geogr.msu.ru*

На основании данных океанографических экспедиций Международного полярного года 2007–2008 гг. (617 станций) были рассчитаны объемные характеристики и время обновления тихоокеанских вод (ТВ) на акватории Северного Ледовитого океана. Установлены характерные изопикнические поверхности, соответствующие их верхней и нижней границам (соответственно 25,5 и 27,5 кг/м^3), рассчитана толщина между изопикнами и эквивалентная толщина (т. е. условная толщина нетрансформированной «чистой» водной массы), границы распространения по исчезновению максимума силикатов в выбранном интервале плотностей. Воды тихоокеанского происхождения распространяются на север вплоть до приполюсного района (толщина до 40–50 м), на западе прослеживаются вплоть до северной части моря Лаптевых (толщины 20–30 м), на востоке сохраняются в малотрансформированном виде (толщина более 100 м) вплоть до Канадского Арктического архипелага, для них характерны глубины 50–150 м. Наибольшая толщина ТВ (более 150 м) характерна для круговорота Бофорта. Был оценен общий объем «чистых» (нетрансформированных) тихоокеанских вод на акватории Северного Ледовитого океана, он составил (197 ± 19) ·10^3 км^3, или около 1,1% от всего объема Северного Ледовитого океана. Объем тихоокеанских вод с учетом их перемешивания с окружающими водами между выбранными изопикническими поверхностями составил (313 ± 16) · 10^3 км^3, что составляет около 1,7% объема Северного Ледовитого океана. С учетом характерного потока ТВ через Берингов пролив их время обновления в Арктическом бассейне оценено в 5–6 лет.

Ключевые слова: тихоокеанские воды, концентрация силикатов, эквивалентная толщина, время обновления

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.12

ВВЕДЕНИЕ

Воды Тихого океана – самые богатые воды в Мировом океане по содержанию биогенных элементов. Они поступают в акваторию Северного Ледовитого океана через неглубокий (около 50 м) и узкий (около 85 км) Берингов пролив и, несмотря на небольшой по сравнению с другими границами океана расход вод (около 1 Свердрупа, т. е. 10^6 м^3/с, или 11% от общего поступления вод), обеспечивают более половины растворенных силикатов, попадающих в этот бассейн [Torres-Valdés et al., 2013].

Для акватории Берингова пролива и восточных морей Северного Ледовитого океана выделяются различные водные массы тихоокеанского происхождения. Из Берингова моря в Чукотское поступают аляскинская прибрежная, беринговоморская шельфовая и анадырская водные массы [Coachman et al., 1975]. Некоторые авторы в западной части Чукотского моря, помимо трех водных масс, поступающих через Берингов пролив, отмечают наличие атлантической, сибирской прибрежной и остаточной зимней тихоокеанской водных масс, отдельно рассматривая водную массу таяния льдов. На удалении от Берингова пролива в западной части Чукотского моря выделяют также летнюю беринговоморскую водную массу, которая является продуктом перемешивания беринговоморской шельфовой и анадырской водных масс [Pisareva et al., 2015, Кодрян и др., 2023]. Для ядра каждой отдельной водной массы тихоокеанского происхождения характерны определенные значения температуры, солености и биогенных элементов, но стоит отметить, что абсолютные значения концентрации силикатов, фосфатов и нитратов различных вод тихоокеанского происхождения в глубоководной части Северного Ледовитого океана в разы больше, чем характерные значения для вод, сформировавшихся непосредственно в Северном Ледовитом океане или пришедших из Атлантики [Torres-Valdés et al., 2013; Русанов и др., 1979]. По этой причине в данной работе для оценки объемных характеристик на основании гидрохимических параметров под «тихоокеанскими водами» подразумеваются все водные массы тихоокеанского происхождения

(беринговоморская летняя, зимняя тихоокеанская и т. д.) без разделения.

Воды тихоокеанского происхождения, поступающие через Берингов пролив, распространяются в Чукотском море несколькими путями: основной поток направлен на север, а затем при продвижении он разделяется на несколько ветвей: на северо-восток, северо-запад и запад [Brugler et al., 2014]. Ветви восточного направления прослеживаются вдоль побережья Аляски, тихоокеанская водная масса на этом пути вовлекается в круговорот Бофорта, после циркуляции в котором распространяется на север, попадая в трансполярный дрейфовый поток [Hu et al., 2019]. Стоит отметить, что в отдельные годы может наблюдаться выход тихоокеанских вод на акваторию Евразийского суббассейна к северу от пролива Фрама [Falck et al., 2005].

В условиях меняющегося климата особенно актуальны количественные оценки объемных характеристик и границ распространения тихоокеанских вод в Арктическом бассейне. В последние десятилетия наблюдается явление «бореализации» Северного Ледовитого океана: изменение структуры вод при усилении влияния атлантических и тихоокеанских водных масс [Polyakov et al., 2020]. Роль тихоокеанских вод (особенно летней модификации как более теплой) в изменении поверхностного слоя вод Арктики больше, чем атлантических, по причине их более высокого залегания [Bourgain, Gascard, 2012]. К климатическим изменениям, происходящим в акватории Северного Ледовитого океана, относится, например, увеличение водообмена через Берингов пролив: в период с 1990 по 2015 г. наблюдается усиление потока вод в Северный Ледовитый океан (в 2015 г. он составил в 1 Св по сравнению с 0,8 Св в 1990 г.) [Woodgate, 2018]. В результате климатических изменений наблюдается увеличение влияния тихоокеанских вод в целом на акваторию Северного Ледовитого океана, что выражается в увеличении содержания биогенных элементов в слое распространения вод тихоокеанского происхождения восточной части Северного Ледовитого океана [Hennon et al., 2022]. Стоит также отметить, что летние тихоокеанские воды привлекают внимание исследователей по причине того, что они являются источником дополнительного тепла для бассейна Северного Ледовитого океана так же, как и гораздо лучше изученные атлантические воды.

Оценки процентного содержания тихоокеанских вод в Арктическом бассейне по концентрации биогенных веществ (силикаты, фосфаты, нитраты) делались и ранее [Alkire et al., 2015, 2019], но они охватывали отдельные разрезы. Для оценки роли тихоокеанских вод в формировании гидролого-гидрохимической структуры вод Чукотского и Восточно-Сибирского морей и прилежащей части Северного Ледовитого океана важно определить их долю в общем объеме этих акваторий. Количественная оценка объемных характеристик тихоокеанских вод в Северном Ледовитом океане, таких как толщина слоя, эквивалентная толщина вод, их общий объем на исследуемой акватории, а также время их обновления весьма актуальны, поскольку влияние тихоокеанских вод на структуру Северного Ледовитого океана в условиях изменяющегося климата возрастает, изменяется и их роль в бюджете тепла, пресной составляющей и биогенных веществ, росте биологической продуктивности в Арктическом бассейне. Цель предлагаемой работы – оценить объем вод тихоокеанского происхождения и время их обновления в акватории Северного Ледовитого океана.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки объемных характеристик тихоокеанских вод в акватории Северного Ледовитого океана необходимы данные о температуре, солености и гидрохимические параметры (содержание биогенных элементов и растворенного кислорода) по всей исследуемой акватории. В данной работе используются материалы геохимического архива данных, собранные группой ученых Аляскинского университета Фэрбэнкса [Polyakov et al., 2020] с 1 марта 2007 г. по 1 марта 2008 г. Этот период соответствовал четвертому Международному Полярному году, в ходе которого совместными усилиями научных сообществ разных государств было проведено несколько экспедиций в акватории Северного Ледовитого океана и прилежащих морей. Для получения репрезентативных результатов были использованы данные одного года, так как в этот период было выполнено наибольшее число станций в исследуемом районе по сравнению с другими годами. На рис. 1 представлены станции, содержащие данные как по гидрофизическим, так и по гидрохимическим параметрам. Общее количество исследуемых станций составило 617, на каждой станции были измерены температура, соленость, концентрация биогенных элементов (растворенных силикатов, нитратов и фосфатов), а также содержание растворенного кислорода на стандартных горизонтах.

Подготовка данных производилась с помощью программ, написанных на языке программирования Python, после чего с помощью программного обеспечения ArcMap, Ocean Data View и Surfer полученные результаты были представлены в виде графических материалов. Для выявления и отслеживания тихоокеанских вод использовались как гидрофизические (температура, соленость и аномалия потенциальной плотности), так и гидрохимические параметры, среди которых основное внимание

было уделено содержанию растворенных силикатов. Сезонная изменчивость содержания силикатов, вызванная их вовлечением в биологический круговорот, в данной работе не учитывалась. Оценка объемных характеристик вод тихоокеанского происхождения производилась на основании абсолютных концентраций силикатов.

Для оценки объемных характеристик тихоокеанских вод необходимо определить вертикальные и горизонтальные границы их распространения на исследуемой акватории, для этого были применены методы изопикнического анализа и *T*, *S*-анализа [Мамаев, 1987; Добролюбов, Соков, 2002]. Была рассчитана эквивалентная толщина (формула) нетрансформированных тихоокеанских вод по натурным данным для стандартных горизонтов в пределах вертикальных границ слоя исследуемых вод.

$$ET = \frac{\Delta h\left(Si_{mean} - Si_{west}\right)}{Si_{source} - Si_{west}},$$

где ET – эквивалентная толщина, м; Δh – толщина слоя между изопикнами, соответствующими верхней и нижней границам, м; Si_{mean} – среднее значение силикатов в слое, мкмоль/л; Si_{west} – характерное содержание силикатов для вод западной части Северного Ледовитого океана без влияния тихоокеанских вод, мкмоль/л; Si_{source} – содержание силикатов в Беринговом проливе как источнике тихоокеанских вод, мкмоль/л.

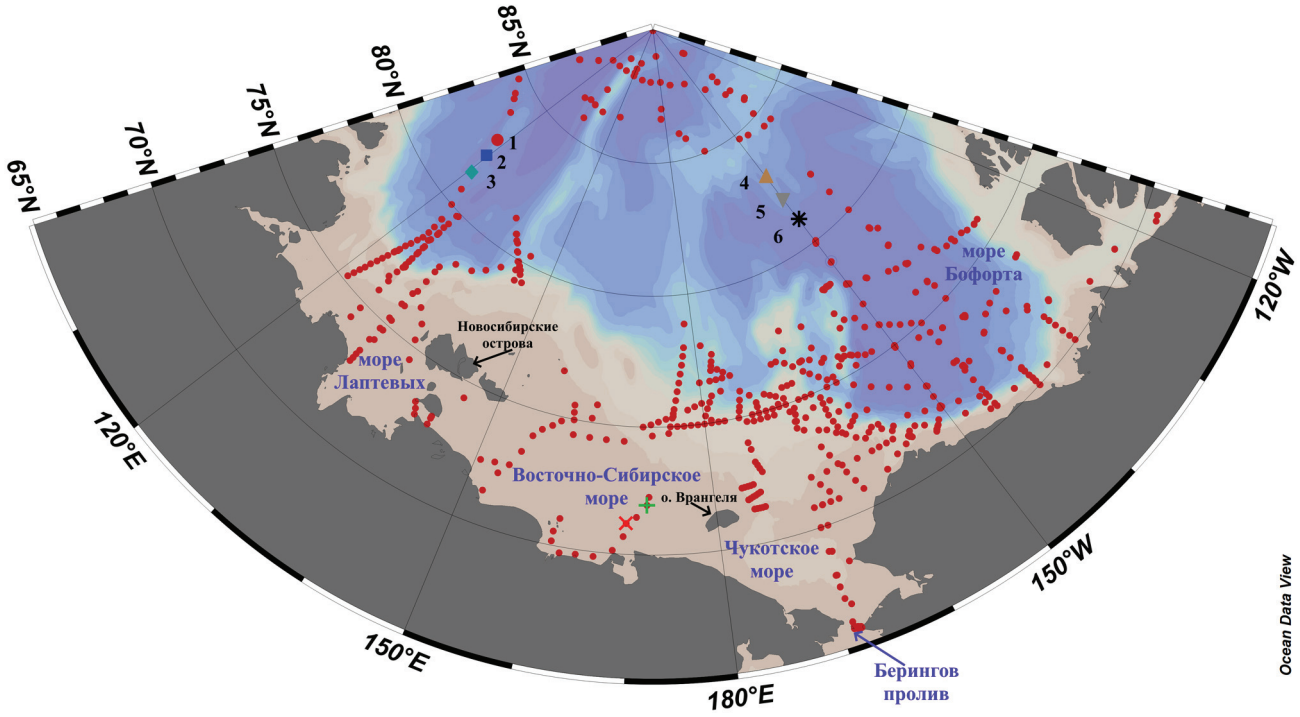


Рис. 1. Карта-схема станций 2007–2008 гг.

Fig. 1. Scheme of the stations in 2007–2008

В районах мелководий, где придонные значения плотности менее выбранных в качестве нижней границы значений, величина Δh определялась между выбранной верхней границей и положением дна.

Для расчета объема нетрансформированных тихоокеанских вод на акватории их распространения эквивалентные толщины умножались на соответствующие каждой станции площади квадратов регулярной сетки. Сравнение объемов тихоокеанских вод со среднегодовым расходом через Берингов пролив дает возможность определить и время их обновления на акватории Северного Ледовитого океана.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эталонные содержания силикатов в акватории Северного Ледовитого океана без влияния тихоокеанских вод (для расчета эквивалентной толщины) Si_{west} были определены с использованием вертикальных распределений растворенных силикатов по изопикническим поверхностям (рис. 2). В источнике с наибольшим количеством нетрансформированных тихоокеанских вод содержание силикатов Si_{source} было определено с помощью анализа станций в Беринговом проливе. Средние значения содержания силикатов в Беринговом проливе экспертно

выбраны по натурным данным и в летний период варьируют от 25 до 35 мкмоль/л, в зимние месяцы – от 30 до 40 мкмоль/л.

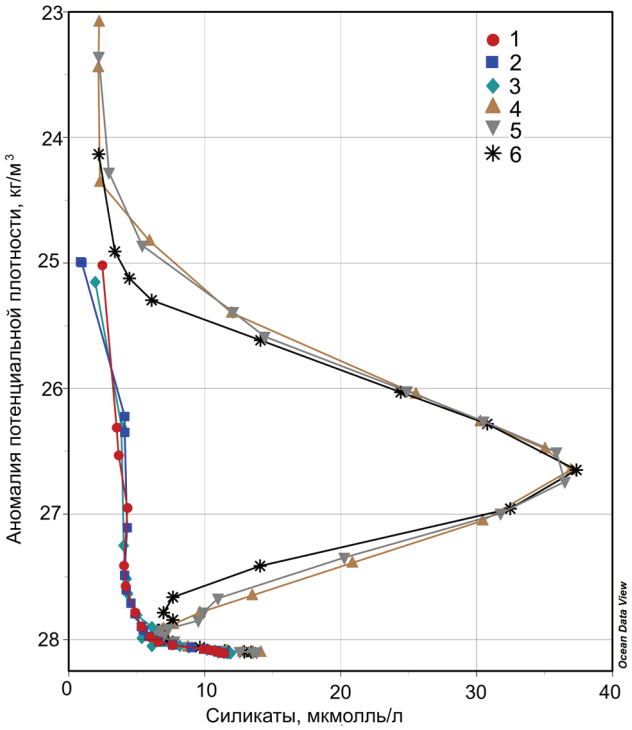


Рис. 2. Вертикальные распределения силикатов по изопикническим поверхностям в западной и восточной частях исследуемой акватории.
Положение станций отмечено более крупными символами и цифрами на разрезах вдоль 120° в. д. и 150° з. д. на рис. 1

Fig. 2. Vertical distributions of silicates on isopycnal surfaces in the western and eastern parts of the Arctic Ocean.
The positions of stations are marked with larger symbols and numbers at the sections along 120° East and 150° W in Fig. 1

Слой вод тихоокеанского происхождения вне источника залегает между изопикническими поверхностями 25,5 и 27,5 кг/м³. В гидрологической структуре вод морей Северного Ледовитого океана эти изопикны примерно соответствуют глубинам от 50 до 150 м. Наибольшее содержание силикатов (35–40 мкмоль/л) отмечается на изопикнической поверхности 26,5 кг/м³, повышенные значения характерны для моря Бофорта, в частности для акватории, прилегающей к круговороту Бофорта.

На первом этапе оценки объемных характеристик был рассчитан общий объем тихоокеанских вод в акватории Северного Ледовитого океана по толщине слоя между изопикническими поверхностями, соответствующими верхней и нижней границам исследуемых вод, соответственно 25,5 и 27,5 кг/м³ (рис. 3). Тихоокеанские воды распространяются на север вплоть до приполюсного района (толщина до 40–50 м), на западе прослеживаются вплоть до северной части моря Лаптевых (толщины 20–30 м), на востоке сохраняются в малотрансформированном виде (толщина более 100 м) вплоть до Канадского Арктического архипелага. Небольшие толщины в южной части акватории вблизи Берингова пролива определяются малыми глубинами акватории. Положение границы распространения этой водной массы восточнее 120° з. д. в рамках съемок 2007–2008 гг. установить весьма затруднительно, но основной объем тихоокеанских вод имеющимися станциями охватывается.

На рис. 4 представлена эквивалентная толщина тихоокеанских вод на акватории Северного Ледовитого океана в 2007–2008 гг. Отношение эквивалентной толщины к толщине слоя вод тихоокеанского происхождения отражает степень трансформации данной водной массы. На более мелководных акваториях, особенно вблизи Берингова пролива, где значения силикатов во всей толще вод близки к наибольшим, она приближается к глубине места. Далее к северу в границах избранных изопикнических поверхностей от 25,5 до 27,5 кг/м³ (что в среднем соответствует глубинам от 50 до 150 м) слой тихоокеанских вод трансформируется до тех пор, пока воды в процессе перемешивания не потеряют свой отличительный признак – наибольшие значения концентрации силикатов. Из сравнения рисунков 3 и 4 видно, что фактическая толщина слоя тихоокеанских вод больше, чем эквивалентная толщина *ET*, поскольку здесь представлена величина Δh из формулы (1), которая при расчете *ET* умножается на величину меньше 1.

По данным 2007–2008 гг. тихоокеанские воды распространяются в восточном направлении вплоть до Канадского Арктического архипелага, а в западном направлении вдоль материкового склона они проникают до 174° з. д. В северном направлении не выделяется какой-либо отчетливой струи распространения тихоокеанских вод, однако стоит отметить, что тихоокеанские воды попадают в круговорот Бофорта и циркулируют в нем, после чего часть вод тихоокеанского происхождения покидает круговорот и распространяется в северном направлении (к полюсу). Наибольшая толщина слоя нетрансформированных тихоокеанских вод также соответствует акватории моря Бофорта в целом и участкам круговорота Бофорта в частности, что обусловлено как рельефом дна акватории, так и вовлечением тихоокеанских вод в круговорот Бофорта. Поскольку в 2007 г. отмечено рекордное сокращение ледового покрова, наблюдались тесно связанные с ним интенсификация круговорота Бофорта и заглубление тихоокеанских вод [Kenigson et al., 2021].

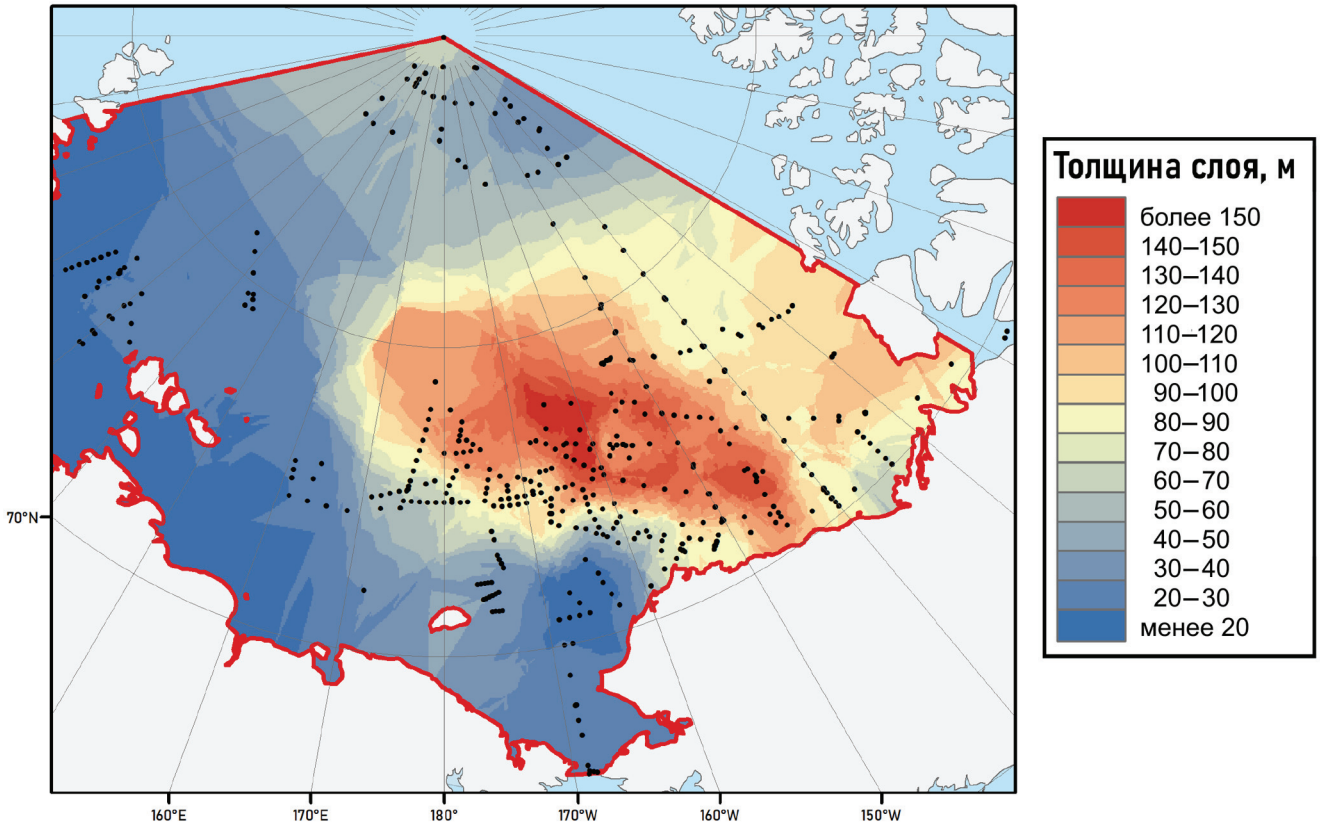


Рис. 3. Карта-схема распределения толщины слоя тихоокеанских вод на акватории Северного Ледовитого океана между изопикническими поверхностями 25,5 до 27,5 кг/м^3

Fig. 3. Distribution of the thickness of Pacific waters in the Arctic Ocean between isopycnal surfaces of 25,5 to 27,5 kg/m^3

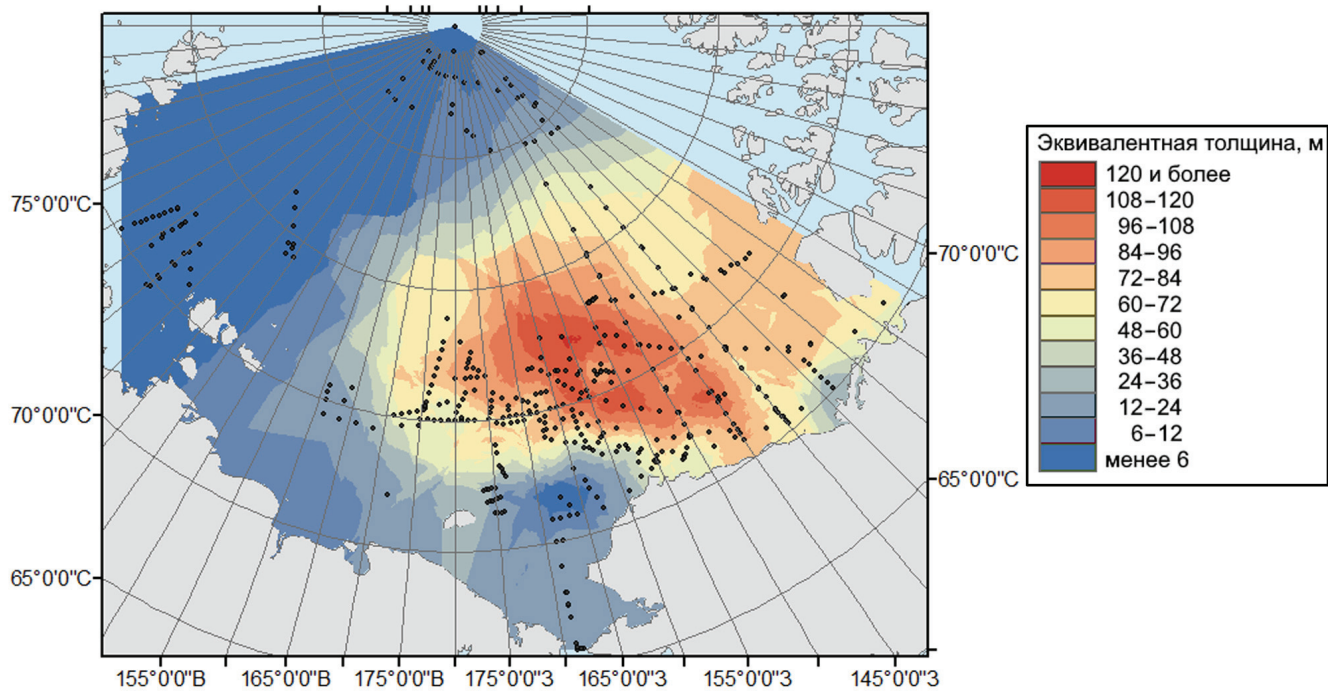


Рис. 4. Карта-схема распределения эквивалентной толщины тихоокеанских вод на акватории Северного Ледовитого океана

Fig. 4. Distribution of the equivalent thickness of Pacific waters in the Arctic Ocean

При использовании полученных эквивалентных толщин также были рассчитаны объемы тихоокеанской водной массы на акватории Северного Ледовитого океана для узлов регулярной сетки с использованием площадей относящихся к ним сферических квадратов. Чтобы оценить ошибку полученных объемов, значения Si_{mean} в формуле (1) проварьированы в пределах ±5 мкмоль/л, значения Si_{west} – ±2 мкмоль/л, а ошибка значений Δh принималась равной половине расстояния между стандартными горизонтами (12,5 м), умноженной на $\sqrt{2}$.

В результате был получен общий объем 100%-ных (нетрансформированных) тихоокеанских вод в акватории Северного Ледовитого океана. Он составил $(197 \pm 19) \cdot 10^3$ км^3, что соответствует 1,1% от всего объема Северного Ледовитого океана. Толщина слоя тихоокеанских вод между изопикническими поверхностями также была использована для расчета объема тихоокеанских вод, подвергшихся трансформации. Их объем равен $(313 \pm 16) \cdot 10^3$ км^3, что составляет около 1,7% объема всего Северного Ледовитого океана.

Полученные объемы можно использовать для расчета примерного времени обновления тихоокеанских вод на акватории Северного Ледовитого океана. Среднегодовой расход через Берингов пролив в период с 1 марта 2007 г. по 1 марта 2008 г. составил 1,0 Св [Woodgate, 2017]. При таких значениях время обновления нетрансформированных тихоокеанских вод в акватории Северного Ледовитого океана составит около шести лет. Однако, учитывая наблюдающееся в последние годы увеличение расхода через Берингов пролив до 1,2 Св, найденный объем «чистой» тихоокеанской воды будет обновляться примерно за пять лет. При дальнейшем увеличении расхода в будущем время обновления также будет сокращаться, однако необходимо учитывать возможное увеличение общего объема тихоокеанских вод в акватории Северного Ледовитого океана, которое может произойти при интенсификации круговорота Бофорта за счет повышения приповерхностной температуры воды в районе исследования и связанного с ним уменьшения объема морского льда.

ВЫВОДЫ

Проведенные по данным подробной океанографической съемки 2007–2008 гг. расчеты позволили оценить границы распространения и объемные характеристики тихоокеанских вод в Северном Ледовитом океане. Поскольку эти воды не имеют выраженных наибольших или наименьших значений температуры и солености, в качестве основного признака их присутствия на рассматриваемой акватории выбрана концентрация растворенных силикатов. Установлены характерные изопикнические поверхности, соответствующие их верхней и нижней границам (соответственно 25,5 и 27,5 кг/м^3), рассчитана толщина между изопикнами и эквивалентная толщина (т. е. условная толщина нетрансформированной «чистой» водной массы), границы распространения по исчезновению максимума силикатов в выбранном интервале плотностей. Наибольшие значения толщины слоя вод тихоокеанского происхождения (как эквивалентной, так и фактической) наблюдаются в районе моря Бофорта и для периода наблюдений составляют до 120 и 160 м соответственно. Благодаря полученным данным по толщине слоя были рассчитаны объемы нетрансформированных и трансформированных тихоокеанских вод. По натурным данным 2007–2008 гг. объем нетрансформированных вод составил $(197 \pm 19) \cdot 10^3$ км^3 (около 1,1% от объема вод Северного Ледовитого океана), период обновления вод тихоокеанского происхождения составил шесть лет. Объем фактических тихоокеанских вод в то же время составил $(313 \pm 16) \cdot 10^3$ км^3 (около 1,7% общего объема океана). С наблюдающимися климатическими изменениями расходов вод в Беринговом проливе время обновления нетрансформированных тихоокеанских вод в акватории Северного Ледовитого океана может сократиться до пяти лет.

Благодарность. Методика оценки эквивалентной толщины вод разработана в рамках гранта РНФ № 23-17-00032 «Взаимодействие Североатлантических глубинных и Антарктических водных масс в тропической части Атлантического океана».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Добролюбов С.А., Соков А.В. Роль глубинных вод Северной Атлантики в изменчивости теплообмена океана и атмосферы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2002. Вып. 6. С. 42–48.

Кодрян К.В., Киввa К.К., Зубаревич В.Л., Педченко А.П. Водные массы западной части Чукотского моря в августе 2019 года и их гидрохимические особенности // Океанология. 2023. Т. 63. № 3. С. 362–374.

Мамаев О.И. Термохалинный анализ вод Мирового океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 296 с.

Русанов В.П., Яковлев Н.И., Буйневич А.Г. Гидрохимический режим Северного Ледовитого океана // Тр. ААНИИ. 1979. Т. 355. С. 144.

Alkire M.B., Morison J., Andersen R. Variability and trends in the meteoric water, sea-ice melt, and Pacific water contributions to the central Arctic Ocean, 2000–2013, *Jour-*

nal of Geophysical Research: Oceans, 2015, vol. 120, p. 1573–1598, DOI: 10.1002/2014JC010023.

Alkire M.B., Rember R., Polyakov I. Discrepancy in the identification of the Atlantic/Pacific front in the central Arctic Ocean: NO versus nutrient relationships, *Geophysical Research Letters*, 2019, vol. 46, p. 3843–3852, DOI: 10.1029/2018GL081837.

Bourgain P., Gascard J.C. The Atlantic and summer Pacific waters variability in the Arctic Ocean from 1997 to 2008, *Geophysical Research Letters*, 2012, vol. 39, no. 5, DOI: 10.1029/2012GL051045.

Brugler E.T., Pickart R.S., Moore G.W.K. et al. Seasonal to interannual variability of the Pacific water boundary current in the Beaufort Sea, *Progress in Oceanography*, 2014, vol. 127, p. 1–20, DOI: 10.1016/j.pocean.2014.05.002.

Coachman L.K., Aagaard K., Tripp R.B. Bering Strait. The Regional Physical Oceanography, University of Washington Press, Seattle and London, 1975, 172 p.

Falck E., Kattner G., Budéus G. Disappearance of Pacific water in the northwestern Fram Strait, *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32, no. 14, DOI: 10.1029/2005GL023400.

Hennon T.D., Danielson S.L., Woodgate R.A. et al. Mooring measurements of Anadyr Current nitrate, phosphate, and silicate enable updated Bering Strait nutrient flux estimates, *Geophysical Research Letters*, 2022, vol. 49, no. 16, e2022GL098908, DOI: 10.1029/2022GL098908.

Hu X., Myers P.G., Lu Y. Pacific Water pathway in the Arctic Ocean and Beaufort Gyre in two simulations with different horizontal resolutions, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, vol. 124, no. 8, p. 6414–6432.

Kenigson J.S., Gelderloos R., Manucharyan G.E. Vertical structure of the Beaufort Gyre halocline and the crucial role of the depth-dependent eddy diffusivity, *Journal of Physical Oceanography*, 2021, vol. 51, no. 3, p. 845–860, DOI: 10.1175/JPO-D-20-0077.1.

Pisareva M.N., Pickart R.S., Spall M.A. et al. Flow of Pacific water in the western Chukchi Sea: Results from the 2009 RUSALCA expedition, *Deep Sea Research, Part I, Oceanographic Research Papers*, 2015, vol. 105, p. 53–73, DOI: 10.1016/j.dsr.2015.08.011.

Polyakov I.V., Alkire M.B., Bluhm B.A. et al. Borealization of the Arctic Ocean in response to anomalous advection from sub-Arctic seas, *Frontiers in Marine Science*, 2020, vol. 7, A491, DOI: 10.3389/fmars.2020.00491.

Torres-Valdés S., Tsubouchi T., Bacon S. et al. Export of nutrients from the Arctic Ocean, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, vol. 118, no. 4, p. 1625–1644, DOI: 10.1002/jgrc.

Woodgate R.A. Increases in the Pacific inflow to the Arctic from 1990 to 2015, and insights into seasonal trends and driving mechanisms from year-round Bering Strait mooring data, *Progress in Oceanography*, 2017, vol. 160, p. 124–154, DOI: 10.1016/j.pocean.2017.12.007.

Поступила в редакцию 05.08.2023
После доработки 10.09.2023
Принята к публикации 06.10.2023

VOLUMETRIC CHARACTERISTICS OF PACIFIC WATERS IN THE ARCTIC OCEAN

Zh.M. Kulikova[1], **S.A. Dobrolyubov**[2]

[1, 2] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology*

[1] *Postgraduate student; e-mail: kulikovazh9@gmail.com*
[2] *Head of Department, D.Sc. in Geography; e-mail: science@geogr.msu.ru*

Volumetric characteristics and renewal time of the Pacific waters (PW) in the Arctic Ocean were calculated based on the data of oceanographic expeditions during the 2007–2008 International Polar Year (617 stations). Isopycnal surfaces of their upper and lower boundaries (25,5 and 27,5 kg/m^3, respectively), the thickness between these limits and the equivalent thickness (i. e. the specific thickness of untransformed "pure" water mass) have been determined, as well as the boundaries where the highest concentrations of silicates in the selected density interval disappears. The Pacific waters extend to the north up to the North Pole region (thickness up to 40–50 m), in the west they can be traced up to the northern part of the Laptev Sea (thickness 20–30 m), in the east they are preserved in a minimally transformed form (thickness of more than 100 m) up to the Canadian Arctic Archipelago. The characteristic depths are between 50 and 150 m. The thickest PW exceeding 150 m were found within the Beaufort Gyre. The total volume of "pure" (untransformed) Pacific waters in the Arctic Ocean was estimated at $(197 \pm 19) \cdot 10^3$ km^3 or about 1,1% of the overall volume of the Arctic Ocean. If their mixing with the surrounding waters between selected isopycnic surfaces is taken into account, the volume of Pacific waters is $(313 \pm 16) \cdot 10^3$ km^3, or about 1,7% of the volume of the Arctic Ocean. Taking into account the total inflow of the PW through the Bering Strait, their renewal time in the Arctic basin is estimated to be about 5–6 years.

Keywords: Pacific waters, concentration of silicates, equivalent thickness, renewal time

Acknowledgement. The methodology for estimating equivalent water thickness was elaborated with financial support of the Russian Science Foundation (grant no. 23-17-00032 "Interaction of North Atlantic deep and Antarctic water masses in the tropical part of the Atlantic Ocean").

REFERENCES

Alkire M.B., Morison J., Andersen R. Variability and trends in the meteoric water, sea-ice melt, and Pacific water contributions to the central Arctic Ocean, 2000–2013, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, vol. 120, p. 1573–1598, DOI: 10.1002/2014JC010023.

Alkire M.B., Rember R., Polyakov I. Discrepancy in the identification of the Atlantic/Pacific front in the central Arctic Ocean: NO versus nutrient relationships, *Geophysical Research Letters*, 2019, vol. 46, p. 3843–3852, DOI: 10.1029/2018GL081837.

Bourgain P., Gascard J.C. The Atlantic and summer Pacific waters variability in the Arctic Ocean from 1997 to 2008, *Geophysical Research Letters*, 2012, vol. 39, no. 5, DOI: 10.1029/2012GL051045.

Brugler E.T., Pickart R.S., Moore G.W.K. et al. Seasonal to interannual variability of the Pacific water boundary current in the Beaufort Sea, *Progress in Oceanography*, 2014, vol. 127, p. 1–20, DOI: 10.1016/j.pocean.2014.05.002.

Coachman L.K., Aagaard K., Tripp R.B. *Bering Strait. The Regional Physical Oceanography*, University of Washington Press, Seattle and London, 1975, 172 p.

Dobrolyubov S.A., Sokov A.V. Rol' glubinnykh vod Severnoi Atlantiki v izmenchivosti teploobmena okeana i atmosfery [The Role of the Deep Waters of the North Atlantic in the Variability of Ocean and Atmospheric Heat Transfer], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.,* 2002, no. 6, p. 42–48. (In Russian)

Falck E., Kattner G., Budéus G. Disappearance of Pacific water in the northwestern Fram Strait, *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32, no. 14, DOI: 10.1029/2005GL023400.

Hennon T.D., Danielson S.L., Woodgate R.A. et al. Mooring measurements of Anadyr Current nitrate, phosphate, and silicate enable updated Bering Strait nutrient flux estimates, *Geophysical Research Letters*, 2022, vol. 49, no. 16, e2022GL098908, DOI: 10.1029/2022GL098908.

Hu X., Myers P.G., Lu Y. Pacific Water pathway in the Arctic Ocean and Beaufort Gyre in two simulations with different horizontal resolutions, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, vol. 124, no. 8, p. 6414–6432.

Kenigson J.S., Gelderloos R., Manucharyan G.E. Vertical structure of the Beaufort Gyre halocline and the crucial role of the depth-dependent eddy diffusivity, *Journal of Physical Oceanography*, 2021, vol. 51, no. 3, p. 845–860, DOI: 10.1175/JPO-D-20-0077.1.

Kodryan K.V., Kivva K.K., Zubarevich V.L., Pedchenko A.P. Water masses in the western part of the Chukchi Sea in august 2019 and their hydrochemical features, *Okeanologia*, 2023, vol. 63, p. 362–374.

Mamayev O.I. *Termokhalinnyi analiz vod Mirovogo okeana* [Thermohaline Analysis of World Ocean Waters], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1987, 296 p. (In Russian)

Pisareva M.N., Pickart R.S., Spall M.A. et al. Flow of Pacific water in the western Chukchi Sea: Results from the 2009 RUSALCA expedition, *Deep Sea Research, Part I, Oceanographic Research Papers*, 2015, vol. 105, p. 53–73, DOI: 10.1016/j.dsr.2015.08.011.

Polyakov I.V., Alkire M.B., Bluhm B.A. et al. Borealization of the Arctic Ocean in response to anomalous advection from sub-Arctic seas, *Frontiers in Marine Science*, 2020, vol. 7, A491, DOI: 10.3389/fmars.2020.00491.

Rusanov V.P., Yakovlev N.I., Buinevich A.G. Gidrohimicheskij rezhim Severnogo Ledovitogo okeana [Hydrochemical regime of the Arctic Ocean], *Tr. AAII*, 1979, vol. 355, p. 144.

Torres-Valdés S., Tsubouchi T., Bacon S. et al. Export of nutrients from the Arctic Ocean, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, vol. 118, no. 4, p. 1625–1644, DOI: 10.1002/jgrc.

Woodgate R.A. Increases in the Pacific inflow to the Arctic from 1990 to 2015, and insights into seasonal trends and driving mechanisms from year-round Bering Strait mooring data, *Progress in Oceanography*, 2017, vol. 160, p. 124–154, DOI: 10.1016/j.pocean.2017.12.007.

Received 05.08.2023
Revised 10.09.2023
Accepted 06.10.2023

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 5. ГЕОГРАФИЯ»

Общие требования к статье

Журнал «Вестник Московского университета. Серия 5. География» публикует результаты оригинальных исследований в различных областях географической науки, теоретические, методические и обзорные статьи, представляющие интерес для мирового научного сообщества. Представленные копубликованию материалы должны соответствовать формальным требованиям журнала, пройти процедуру слепого рецензирования и получить рекомендацию к публикации на заседании редколлегии журнала. Решение о публикации принимается на основе научной значимости и актуальности представленных материалов. Статьи, отклоненные редакционной коллегией, повторно не принимаются и не рассматриваются.

Объем статьи (текст, таблицы, список литературы, рисунки, перевод на английский) не должен превышать 1 а. л. (40 тыс. печатных знаков, включая пробелы, 5 рисунков), не более 50 тыс. знаков для обзорных статей. Объем кратких сообщений составляет 0,25 а. л. Рекомендуемый список литературы – до 30 наиболее актуальных работ по рассматриваемому вопросу. В обзорных статьях список литературы не должен превышать 60 источников. Для кратких сообщений список литературы может быть до 10 источников. Самоцитирований в списке литературы не должно быть более 10% от общего числа использованных источников.

Статья должна быть четко структурирована ивключать рубрики: введение; материалы и методы исследований; результаты исследований и их обсуждение; выводы; список литературы.

Все материалы статьи компонуются ***в единый сводный файл в формате Word*** и размещаются в нем в следующей последовательности:

1. УДК;
2. Название статьи;
3. Инициалы и фамилия автора(ов);
4. Для каждого автора приводится полное название учреждения, в котором выполнялось исследование, подразделение (кафедра, лаборатория и т. п.), уч. степень, должность, *e-mail*;
5. Аннотация статьи;
6. Ключевые слова;
7. Текст статьи;
8. Благодарности, в том числе – финансирование;
9. Список литературы;
10. Таблицы;
11. Подрисуночные подписи;
12. Рисунки;
13. Перевод на английский язык пунктов 2–6, 8–9, 11. В пункте 4 просьба использовать в переводе официальное наименование организации на английском языке (а не собственный вариант перевода).

Подготовка текста

Текст набирается 12 кеглем через один интервал, поля слева, сверху и снизу – 2 см, справа – 1,5 см. Не допускается использование табулятора или пробелов для обозначения абзаца, ручных переносов в словах, переносов строк клавишей Enter в рамках одного предложения, разрывов страниц и разделов. В тексте статьи возможно использование полужирного шрифта и курсива для смысловых выделений, однако не должно использоваться подчеркивание. Десятичная часть чисел отделяется запятой.

Формулы набираются в редакторе формул в отдельную строку и имеют сквозную нумерацию по всей статье, выровненную по правому краю строки.

Таблицы набираются в Word, не допускается разделение ячеек косой линией. Ручные переносы не допускаются.

Рисунки представляются отдельными файлами, названными по их номерам (например: рис.1.tiff, рис.2.jpg), в графическом формате (eps, tif, jpg) разрешением не менее 300 dpi для полутоновых и 600 dpi для черно-белых изображений и графиков. Для графиков, выполненных в Excel, дополнительно прикладываются соответствующие файлы Excel. Картинки должны быть полностью готовы к изданию. Представление рисунков в виде схем Word или набранного текста с добавлением графических элементов, наложенных сверху, **не допускается**.

Ссылка на источник в тексте документа указывается в квадратных скобках. В тексте ссылки через запятую указывается фамилия автора и год издания. Если ссылок несколько – они отделяются друг от друга точкой с запятой. Ссылка на источник на иностранном языке указывается на языке оригинала. Список русскоязычной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1–2003, 7.82–2001 и 7.0.5–2008. DOI (при наличии) указывается в конце ссылки. Ссылка на источник на английском языке оформляется единообразно и в русскоязычном, и в переведенном на английский язык списке литературы. **При наличии у русскоязычного издания, которое фигурирует в списке литературы, оригинальной или переводной англоязычной версии в ссылке должна быть указана именно она, а не русскоязычный вариант.**

Более подробные инструкции по подготовке статей для авторов можно найти на сайте журнала https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index. Статьи, оформленные не по правилам, будут возвращаться автору на переработку.

Статьи принимаются на географическом факультете в редакции, через сайт журнала и по электронной почте.

Редакция: комната 2108а, тел. +7(495)9392923. Сайт журнала https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index. Электронная почта: vestnik_geography@mail.ru.

Плата за публикацию не взимается

У Ч Р Е Д И Т Е Л И :

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
географический факультет МГУ

Р Е Д А К Ц И О Н Н А Я К О Л Л Е Г И Я :

С.А. ДОБРОЛЮБОВ, доктор географических наук, профессор, академик РАН (главный редактор)
В.С. ТИКУНОВ, доктор географических наук, профессор (зам. главного редактора)
Е.А. ЕРЕМЕНКО, кандидат географических наук (ответственный секретарь)
А.И. АЛЕКСЕЕВ, доктор географических наук, профессор
С.И. БОЛЫСОВ, доктор географических наук, профессор
А.Н. ГЕННАДИЕВ, доктор географических наук, профессор
К.Н. ДЬЯКОНОВ, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН
С.С. ЗИЛИТИНКЕВИЧ, доктор географических наук, профессор (Метеорологический институт Финляндии)
О.Г. ЗОЛИНА, профессор (Университет Ж. Фурье, г. Гренобль, Франция)
В.Ю. ИВАНОВ, профессор (Мичиганский университет, США)
Н.С. КАСИМОВ, доктор географических наук, профессор, академик РАН
А.В. КИСЛОВ, доктор географических наук, профессор
В.А. КОЛОСОВ, доктор географических наук, профессор
К.П. КОЛТЕРМАНН, профессор
М. КОНЕЧНЫ, профессор (Университет г. Брно, Чешская Республика)
С.Б. КРООНЕНБЕРГ, профессор (Технологический университет г. Делфт, Нидерланды)
С.М. МАЛХАЗОВА, доктор географических наук, профессор
Г. МОУРИ, профессор (Университет г. Токио, Япония)
С.А. СОКРАТОВ, кандидат географических наук, PhD
П.Е. ТАРАСОВ, доктор наук, профессор (Берлинский Свободный университет, Германия)
Н.Л. ФРОЛОВА, доктор географических наук, профессор
В.Е. ШУВАЛОВ, кандидат географических наук, доцент
Т.А. ЯНИНА, доктор географических наук, профессор
В.В. ЯНКО-ХОМБАХ, доктор геолого-минералогических наук, профессор (Институт прикладных исследований Авалон, г. Виннипег, Канада)

E D I T O R I A L B O A R D :

S.A. DOBROLUBOV, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor (Editor-in-chief)
V.S. TIKUNOV, doctor of science, professor (Deputy Editor-in-chief)
E.A. EREMENKO, candidate of science (Secretary-General)
A.I. ALEKSEEV, doctor of science, professor
S.I. BOLYSOV, doctor of science, professor
A.N. GENNADIYEV, doctor of science, professor
K.N. D'YAKONOV, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor
S.S. ZILITINKEVICH, doctor of science, professor (Finnish Meteorological Institute, Finland)
O.G. ZOLINA, professor (Fourier University, Grenoble, France)
V.YU. IVANOV, professor (Michigan University, USA)
N.S. KASIMOV, doctor of science, academician of the Russian Academy of Sciences, professor
A.V. KISLOV, doctor of science, professor
V.A. KOLOSOV, doctor of science, professor
K.P. KOLTERMANN, professor
M. KONECNÝ, professor (Masaryk University, Faculty of Science, Czech Republic)
S.B. KROONENBERG, professor (Delft University of Technology, Department of Applied Earth Sciences, Netherlands)
S.M. MALKHAZOVA, doctor of science, professor
G. MOURI, professor (University of Tokyo, Japan)
S.A. SOKRATOV, candidate of science, PhD
P.E. TARASOV, professor (Free Berlin University, Germany)
N.L. FROLOVA, doctor of science, professor
V.E. SHUVALOV, candidate of science, associate professor
T.A. YANINA, doctor of science, professor
V.V. YANKO-KHOMBACH, doctor of science, professor (Avalon Institute of Applied Sciences, Winnipeg, Canada)

Номер подготовили члены редколлегии
С.И. БОЛЫСОВ, В.С. ТИКУНОВ

Редактор **Е.С. Повалишникова**

Адрес редколлегии:

119992, Москва, Ленинские горы, МГУ,
географический факультет, комн. 2108а. Тел. 7(495) 939-29-23

Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ.
Свидетельство о регистрации № 1552 от 14 февраля 1991 г.

Подписано в печать 00.00.2016. Формат 60×90/8.
Гарнитура Times New Roman. Бумага офсет. № 1. Офсетная печать. Усл. печ. л.
Уч.-изд. л. 00. Тираж экз. Изд. № 00000. Заказ №

Типография МГУ.
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 15.