

Вестник Московского университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 1946 г.

Серия 5 ГЕОГРАФИЯ

№ 6 • 2022 • НОЯБРЬ–ДЕКАБРЬ

Издательство Московского университета

Выходит один раз в два месяца

СОДЕРЖАНИЕ

Динамика природных процессов

- Воловинский И.В., Дьяконов К.Н. Влияние климатических факторов на прирост деревьев на мерзлотных буграх пучения севера Западной Сибири 3
- Морозова И.В., Белкина Н.А., Потахин М.С., Гатальская Е.В. Эмиссия метана из донных отложений Выгозерского водохранилища 15
- Малахова Т.В., Будников А.А., Иванова И.Н., Мурашова А.И. Сезонные и суточные закономерности содержания и потоков метана в эстуарии реки Черной (Крым) 27

Методы географических исследований

- Суркова Г.В., Васильчук Ю.К. Сравнение модельных и реконструированных палеотемператур в последний ледниковый максимум в Российской Арктике 40
- Чинилин А.В., Савин И.Ю. Оценка содержания органического углерода в почвах России с помощью ансамблевого машинного обучения 49

География городов

- Варенцов М.И., Репина И.А., Глазунов А.В., Самсонов Т.Е., Константинов П.И., Степаненко В.М., Лыкосов В.Н., Артамонов А.Ю., Дебольский А.В., Печкин А.С., Соромотин А.В. Особенности пограничного слоя атмосферы г. Надыма по данным экспериментальных измерений и вихреразрешающего моделирования 64
- Зырянов А.И., Фирсова Н.В. Асимметрия города: влияние ландшафтных рубежей на структуру поселения и его окружение 79
- Горбаренко Е.В. Экстремумы и основные тенденции в многолетней изменчивости радиационных параметров атмосферы города Москвы 90

Региональные исследования

- Обатнин В.А., Кашин А.А., Пермяков М.А. Литологические особенности как фактор хозяйственного освоения и расселения населения Удмуртской Республики 104
- Аверкиева К.В. Сельская джентрификация в российском Нечерноземье 119
- Пашаев Н.А., Алескарзаде И.И. Цитрусовое хозяйство в Ленкоранском и Астаринском районах Азербайджанской Республики 129

Краткие заметки

- Тюнин Н.А., Беляев В.Р., Лобачева Д.М., Семиколенных Д.В. Дельта Казачьего Ерика – Переволоки (дельта Кубани) в голоцене 140
- Чурюлина А.Г., Бочарников М.В. Картографирование растительных сообществ с участием реликтового вида караганы гривастой в Южном Прибайкалье 149
- Указатель статей и материалов, опубликованных в журнале в 2022 г. 157

CONTENTS

Dynamics of natural processes

<i>Volovinsky I.V., Diakonov K.N.</i> Influence of climatic factors over tree growth on frost mounds in Western Siberia.....	3
<i>Morozova I.V., Belkina N.A., Potakhin M.S., Gatal'skaya E.V.</i> Emission of methane from bottom sediments of the Vygosero reservoir.....	15
<i>Malakhova T.V., Budnikov A.A., Ivanova I.N., Murashova A.I.</i> Seasonal and daily patterns of methane content and emission in the estuary of the Chernaya River (Crimea)	27

Methods of geographical studies

<i>Surkova G.V., Vasil'chuk Yu.K.</i> Comparison of simulated and reconstructed paleotemperatures during the last glacial maximum in Northern Eurasia.....	40
<i>Chinilin A.V., Savin I.Yu.</i> Estimation of organic carbon content in Russian soils using ensemble machine learning.....	49

Urban geography

<i>Varentsov M.I., Repina I.A., Glazunov A.V., Samsonov T.E., Konstantinov P.I., Stepanenko V.M., Lykosov V.N., Artamonov A.Yu., Debolskiy A.B., Pechkin A.S., Soromotin A.V.</i> Special characteristics of the boundary atmosphere in the city of Nadym according to experimental measurements and eddy-resolving modeling.....	64
<i>Zyryanov A.I., Firsova N.V.</i> City asymmetry: the influence of landscape borders on the structure of the settlement and its surroundings.....	79
<i>Gorbarenko E.V.</i> Extremes and general trends in long-term variability of atmospheric radiation parameters in Moscow.....	90

Regional studies

<i>Obatnin V.A., Kashin A.A., Permyakov M.A.</i> Lithological features as a factor of economic development and settlement in the Udmurt Republic.....	104
<i>Averkieva K.V.</i> Rural gentrification in the Non-Chernozem region of Russia.....	119
<i>Pashayev N.A., Aleskerzade I.I.</i> Citrus cultivation in the Lankaran and Astara regions of the Republic of Azerbaijan.....	129

Short communications

<i>Tyunin N.A., Belyaev V.R., Lobacheva D.M., Semikolennykh D.V.</i> The Kazachi Yerik – Perevoloka section (the Kuban River delta) in the Holocene.....	140
<i>Churiulina A.G., Bocharnikov M.V.</i> Mapping of plant communities with the relict species <i>Caragana jubata</i> in the southern Baikal region.....	149
Index of articles and materials published in 2022	157

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 911.2; 911.52 (571.121)

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРИРОСТ ДЕРЕВЬЕВ
НА МЕРЗЛОТНЫХ БУГРАХ ПУЧЕНИЯ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИИ.В. Воловинский¹, К.Н. Дьяконов²^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра физической географии и ландшафтоведения*¹ *Аспирант; e-mail: volovinskiy@gmail.com*² *Зав. кафедрой, проф., чл.-кор. РАН; e-mail: diakonov.geofak@mail.ru*

При решении проблемы взаимосвязи ландшафтного пространства и ландшафтного времени часто используются связи приростов деревьев с климатическими показателями для индикации изменений в функционировании ландшафтов. В статье анализируется влияние климатических факторов на приросты кедров сибирского (*Pinus sibirica*) в последние 140 лет на буграх пучения в основном миграционного типа на севере Западной Сибири в заболоченных ландшафтах подзоны северной тайги. Построены дендрохронологии для 47 площадок опробования, расположенных на буграх пучения разных типов. Установлено, что большая часть дендрохронологий коррелирует между собой, хотя различия между буграми значительны. Наихудшее соответствие модальной дендрохронологии у площадок опробования, примыкающих к термокарстовым провалам. Выявлено, что достоверной связи между средними годовыми температурами и приростами деревьев нет, а наибольшие приросты деревьев наблюдаются в годы с высокими майскими температурами воздуха. Идеальными условиями для прироста деревьев являются холодные малоснежные зимы и теплые и влажные летние сезоны. Обнаружено, что в периоды с аномально высокими температурами воздуха приросты деревьев снижаются, что связано с тем, что при деградации мерзлотных бугров и увеличении сезонно-талого слоя снижается глубина залегания почвенных вод, а верхний горизонт почвы иссушается.

Ключевые слова: дендрохронология, ландшафтоведение, геокриология, бугры пучения, Западно-Сибирская равнина, сосна сибирская

DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-3-14

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений исследований пространственно-временной организации ландшафтов выступает раздел, характеризующий закономерности проявлений внутривековых циклов на разных территориальных уровнях [Дьяконов, 1997; Хорошев и др., 2008]. Без решения проблемы взаимосвязи ландшафтного пространства и ландшафтного времени нельзя решить такие вопросы, как функционирование и динамика мерзлотных форм рельефа и связанные с ними прикладные проблемы устойчивой эксплуатации техногенных объектов в условиях изменения климата. Чаще всего используются связи приростов деревьев с климатическими показателями для индикации изменений в функционировании ландшафтов. Основными факторами, влияющими на ежегодный прирост деревьев, являются средние годовые температуры и количество осадков [Ferguson, 1970; Матвеев, Румянцев, 2013;

Тишин, Чижикова, 2018]. Так, в годы с низкими температурами (в особенности летними) приросты деревьев, как правило, существенно ниже, чем в годы с высокими температурами [Schweingruber, 2012; Ferguson, 1970; Шиятов, 2000]. Экстремально малое или, напротив, большое количество осадков также приводит к низкому ежегодному приросту [Schweingruber, 2012]. Тем не менее мы можем предположить, что на южной границе распространения многолетней мерзлоты, где развиты особые мерзлотные формы рельефа, обладающие высокой степенью подвижности, миграционные бугры пучения, а также плоскобугристые торфяники, связь приростов деревьев со среднегодовой температурой и осадками должна быть сложнее.

В настоящее время Е.А. Вагановым, С.Г. Шиятовым, Р.М. Хантемировым выполнена большая работа по составлению дендрохронологий Северной Евразии [Ваганов, 1998; Хантемиров, 1999; Шиятов, 2002]. По

результатам многолетних исследований дендрохронологий от Северного Урала до Чукотки ими установлена значительная корреляция надрегионального масштаба между дендрохронологиями в разных областях северной части европейской территории России и Сибири. Основным фактором прироста деревьев определены средние месячные температуры июня – июля, при этом к востоку вклад июльских температур уменьшается. Также авторы для всех районов фиксируют вклад малого ледникового периода, который обусловил снижение приростов деревьев до конца XIX в. Высокий прирост деревьев характерен для XX в. При этом на европейской территории России высокий прирост последних десятилетий проявляется более ярко, чем в Сибири [Ваганов, Шиятов, 2005].

Существует также большое количество работ, посвященных приростам деревьев в условиях многолетней мерзлоты [Giddings, 1941; Allard et al., 1996; Lloyd et al., 2003; Beltrami et al., 1995; Huscroft, 2003; Kajimoto, 2003; Vaganov, Kirilyanov, 2010]. Как правило, они посвящены или послепожарной динамике древостоев, или приростам деревьев в условиях естественной деградации многолетней мерзлоты. В этих работах отмечено, что важными факторами, которые определяют рост деревьев, являются температура почв, а также их влажность [Nikolayev, Fyodorov, 2009]. Ранее Ю.Н. Бочкаревым и К.Н. Дьяконовым [Бочкарев, 2006, 2014; Дьяконов, Бочкарев, 2019] исследовались приросты деревьев, произрастающих на буграх пучения. Установлено, что дендрохронологические ряды на буграх пучения разного типа сильно разнятся, что объясняется неравномерностью протаивания, т. е. почвенного климата. В последние годы «фронт» полевых исследований в северотаежной подзоне Западной Сибири расширился.

Цель исследования – выявить значимость климатических факторов для радиальных приростов деревьев за период с доступными метеорологическими данными (1883–2019) на буграх пучения междуречья Надыма и Хейгияхи, расположенного на севере Западно-Сибирской равнины.

Предмет исследования – проверка гипотез о синхронности приростов на урочищах бугров пучения, возможной связи приростов со средними годовыми и месячными температурами воздуха, о связи приростов со средними годовыми и месячными значениями осадков, а также сопоставление вклада температуры воздуха и осадков в прирост деревьев.

ОБЪЕКТ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемая территория – междуречье Надыма, Хейгияхи и Малой Хетты – расположена в 40 км к юго-западу от города Надым в Ямало-Ненецком автономном округе и имеет географические коор-

динаты 65° с. ш., 72° в. д. Территория относится к Полуйской провинции подзоны северной тайги Западной Сибири [Гвоздецкий и др., 1968].

Основная поверхность относится к ландшафтам озерно-аллювиальных равнин с песчаными отложениями с кедровыми лишайниковыми лесами на языковатых подзолах, а также к плоскобугристым и крупнобугристым мерзлым торфяникам (кустарничково-мохово-лишайниковым по буграм и торфяно-моховым по понижениям) [Атлас Тюменской области..., 1971].

Для региона характерен континентальный тип климата с непродолжительным прохладным летом и длинной холодной зимой. Безморозный период продолжается с мая по сентябрь и составляет 90–150 дней. Сумма положительных температур на изучаемой территории составляет 1200–1300°C, а сумма температур выше 10°C – 900°C. Средняя годовая температура равна –5°C, средняя температура января – –23°C с абсолютным минимумом –67°C. Средняя температура июля составляет +16°C с абсолютным максимумом +40°C. Переход через 0°C происходит в середине октября и в конце мая [Атлас ЯНАО..., 2004].

Территория характеризуется избыточным режимом увлажнения. Среднегодовое количество осадков составляет 460 мм, испаряемость – 350 мм. Снежный покров устанавливается в октябре и достигает 60 см; он начинает разрушаться в мае, при этом его плотность сильно увеличивается. Окончательное разрушение снежного покрова происходит в июне. Таким образом, формирование сезонно-талого слоя начинается в конце мая – начале июня. Промерзание сезонно-талого слоя происходит во второй половине октября – начале ноября.

Средняя скорость ветра не превышает 3 м/с. Несмотря на относительно невысокую скорость ветра, на буграх пучения происходит постоянное перераспределение снежного покрова [Геоэкология СССР..., 1989], что приводит к их неравномерному промерзанию.

Большая часть территории занята торфяниками. Их мощность в среднем составляет от 0,5 м на буграх пучения до 2 м в понижениях. Развита островная мерзлота. Характерная черта геоэкологических условий данного района – большие участки на озерно-аллювиальной равнине с несливающейся мерзлотой, на которых кровля многолетнемерзлых пород залегает на глубине 5–20 м. Температура мерзлоты различна. Так, в пределах бугристых торфяников температура составляет –3,5...–4°C, а на залесенных участках – –0,2...1°C. Глубина сезонного протаивания различна и зависит от вмещающих пород. На участках с торфянистым слоем протаивание составляет 60–80 см, на участках с торфянистым слоем менее 20 см – до 200 см [Геоэкология СССР..., 1989].

На территории развиты различные мерзлотные формы рельефа. К ним относятся плоскобугристые и крупнобугристые образования. Плоскобугристые торфяники представляют собой комбинацию торфяных бугров пучения высотой до 2 м и от 50 до 200 м в диаметре и сфагновых периодически обводненных понижений. Расстояние между буграми пучения не превышает 100 м. Зачастую бугры сливаются между собой. Мощность торфа на данном типе урочищ составляет около 2 м. Ниже залегают супеси, постепенно переходящие в пески. Многолетняя мерзлота на плоскобугристых торфяниках залегает на глубине от 50 см, залегание многолетней мерзлоты в обводненных понижениях превышает 2 м, иногда она отсутствует вовсе. Почвенный покров на плоскобугристых торфяниках представлен торфяными олиготрофными почвами.

Крупные миграционные бугры пучения можно разделить на минеральные и торфяно-минеральные. Торфяно-минеральные бугры пучения являются преобладающим типом. Тем не менее происхождение, современное функционирование, почвы и растительность двух типов бугров практически идентичны. Главным различием является залегание торфяных и песчаных линз. В зависимости от растительного покрова на торфяно-минеральных буграх залегают торфяные олиготрофные или торфяные эутрофные почвы, а на минеральных – торфяно-подзолы глеевые с торфяной подстилкой от 20 до 50 см.

Стоит отметить, что бугры пучения распространены не только пятнами, как бугры плоскобугристых торфяников, но и грядами. Зачастую один бугор пучения сливается с другим или плавно переходит в тундровые урочища. Высота подобных бугров достигает 5–10 м, отдельные бугры достигают 15 м в высоту. Их диаметр может превышать 200 м. Торфяно-минеральные бугры пучения имеют относительно крутые склоны (до 20°). В некоторых случаях склоны бугров пучения обваливаются и в таких случаях могут быть отвесными. При этом они не прямые, а с ярко выраженным ступенчатым рельефом.

Рельеф бугров пучения осложнен трещинами, некоторые из которых имеют глубину до 2 м. Помимо трещин на буграх пучения встречаются пятна-медальоны – участки, на которых выдавливается песчано-глинистый материал. Бугры пучения характеризуются многочисленными микропонижениями. Амплитуда микрорельефа может составлять от 30 см до 1,5–2 м.

Сложный микрорельеф обуславливает крайне высокую степень мозаичности данных типов урочищ. В пределах одного бугра пучения залегание многолетней мерзлоты может варьировать от 30–35 см до нескольких метров или даже полного ее отсутствия.

Особым типом урочищ являются термокарстовые котловины, имеющие широкое распространение. Наибольший интерес представляют зарождающиеся термокарстовые котловины, которые, как правило, могут увеличиваться на несколько метров в год. Подобные котловины могут иметь площадь в несколько десятков квадратных метров и диаметр до 100 м. Как правило, такие котловины заняты водой, однако у них может быть большая сплавина из болотных травянистых растений: осок (*Carex*), вахты трехлистной (*Menyanthes trifoliata*).

Нами были использованы данные полевых исследований, включающие в себя ландшафтные описания, керны деревьев, метеорологические данные по станциям Надым и Салехард. Наблюдения на метеостанции Надым начались в 1960 г., а в Салехарде – в 1883 г. По этой причине данные с 1883 по 1960 г. обладают чуть меньшей точностью, тем не менее корреляция между среднегодовыми температурами в Надыме и Салехарде является достоверной и составляет 0,96, что позволяет их использовать.

Полевые данные собраны Ю.Н. Бочкаревым с 2013 по 2019 г., в 2018–2019 гг. – с участием И.В. Волонинского. Ландшафтные описания и отбор кернов кедров сибирского (*Pinus sibirica*) (реже лиственницы сибирской (*Larix sibirica*)) происходили в начале – середине августа. За время экспедиций всего было исследовано 23 бугра пучения различных типов с 47 площадок опробования. Охарактеризован растительный и почвенный покров на склонах и вершинах (видовой состав деревьев, кустарников, кустарничков, мхов и лишайников; мощность горизонтов почв). Использован метод микропрофилирования. Так, в большинстве случаев описывалась сплавина перед грядой, болотные кочки в нижней части склона, склон гряды, основная поверхность и противоположный склон. Для каждой фации было выполнено стандартное физико-географическое описание, в том числе измерена мощность сезонного протаивания. Описание включало и оценку степени разрушения бугра. Для этого использовались такие параметры, как количество микротрещин, расчлененность микрорельефа, наклон деревьев, контрастность условий промерзания.

На каждом описанном бугре пучения были отобраны керны деревьев. В большинстве случаев отбирались керны кедров сибирского, хотя на двух буграх произрастала лиственничная формация лесов. Керны отбирались отдельно для деревьев на склоне и на основной поверхности гряд. Обычно число отобранных кернов на одну площадку составляло 10–15 (всего 512 кернов). Отбор производился буром Пресслера на высоте 1,3 м от уровня земли. При этом образцы отбирались с двух сторон дерева – в сторону наклона и в противоположную сторону.

Анализ кернов деревьев осуществлен на оборудовании Lintab-5 с программным обеспечением TsapWin. При анализе кернов применен метод перекрестного датирования. Для составления обобщенной дендрохронологии для площади опробования использован программный пакет ARSTAN [Cook, Holmes, 1986], который нивелирует биологический возраст дерева и многовековые колебания.

Процесс «удаление трендов». Выполнен первый детрендинг, а именно приведение дендрохронологической шкалы в соответствие отрицательной экспоненциальной кривой или линейной регрессии. Второй детрендинг позволяет сглаживать большие колебания внутри циклов приростов деревьев. Нами были исключены низкочастотные колебания с периодом более 50 лет. Наконец, команда «Список значений в серии» позволяет составить общую хронологию для точки опробования [Cook, Holmes, 1986]. Ниже в работе приводятся не абсолютные значения приростов деревьев, а значения, полученные в пакете ARSTAN после детрендинга.

При анализе климатических и дендрохронологических данных использовался ряд статистических методов, которые были реализованы в программном пакете Statistica 7.0. В первую очередь была выполнена проверка на нормальность распределения дендрохронологий и климатических данных с помощью теста Колмогорова – Смирнова. Корреляции между дендрохронологиями и климатическими показателями рассчитывались с помощью параметрической корреляции Пирсона, поскольку данные удовлетворяют критериям нормального распределения. Для анализа совместного вклада температу-

ры воздуха и количества атмосферных осадков был проведен регрессионный анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Синхронность дендрохронологий с разных участков описывает одинаковый ход событий на них и отвечает нормальному распределению. По этой причине для проверки гипотезы о синхронности приростов на площадках опробования была составлена матрица корреляций Пирсона. Было выяснено, что на большинстве площадок опробования приросты достоверно коррелируют друг с другом. Большая часть корреляций варьирует в диапазоне $R = 0,5–0,8$ при $p < 0,05$. Тем не менее на ряде площадок опробования коэффициенты корреляции близки к нулевым, отрицательные или статистически недостоверные. Речь идет о девяти площадках из 47. Большая часть этих площадок склоны к термокарстовым провалам с угнетенными деревьями. Также не подчиняется общей хронологии ряд разрушающихся бугров пучения с амплитудами микрорельефа более полутора метров.

Рассмотрим график приростов деревьев за последние 40 лет (рис. 1). На графике наглядно видно, что, хотя в некоторые годы приросты деревьев на площадках опробования разнонаправлены, абсолютно большая часть приростов синхронна. Речь идет, например, о 2007, 1997, 1987, 1980 гг. с низкими приростами и о 1998 г. с максимальным приростом. Подобные годы наблюдались и ранее: низкие приросты почти на всех точках опробования зафиксированы в 1961, 1941, 1923 гг., высокие – в 1948, 1909, 1880, 1835 гг.

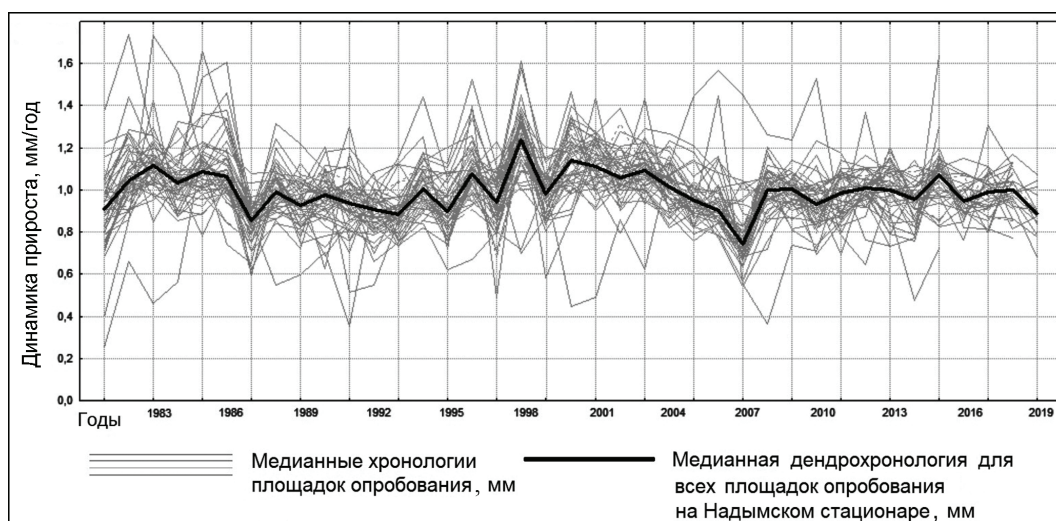


Рис. 1. Динамика приростов за последние 40 лет на площадках опробования. Коэффициент корреляции Пирсона между медианной дендрохронологией для всей исследуемой территории и отдельных площадок опробования является статистически достоверным и составляет от 0,1 до 0,85

Fig. 1. Growth dynamics over the past 40 years at sampling sites. The Pearson correlation coefficient between the median dendrochronology for the entire study area and individual sampling sites is statistically significant ranging from 0,1 to 0,85

Необходимо также отметить, что помимо лет с экстремально высокими или низкими приростами, мы наблюдаем длительные периоды с высокими или низкими приростами, которые могут быть связаны, в том числе, с солнечной активностью [Распоров, 2004]. Так, на графике особенно отчетливо выделяется период высоких приростов с 1865 по 1885 г. и период низких приростов с 1962 по 1981 г. (рис. 2).

В результате выделены периоды, приведенные в табл. 1.

Таким образом, выдвинутая гипотеза о синхронности приростов на площадках опробования подтверждена частично, поскольку приросты на площадках опробования, обращенных к термокарстовым провалам или на разрушающихся буграх, не коррелируют с остальными дендрохронологиями. Этот результат свидетельствует о том, что, хотя ведущими являются региональные климатические вклады, локальные факторы (различия урочищ) также имеют важное значение.

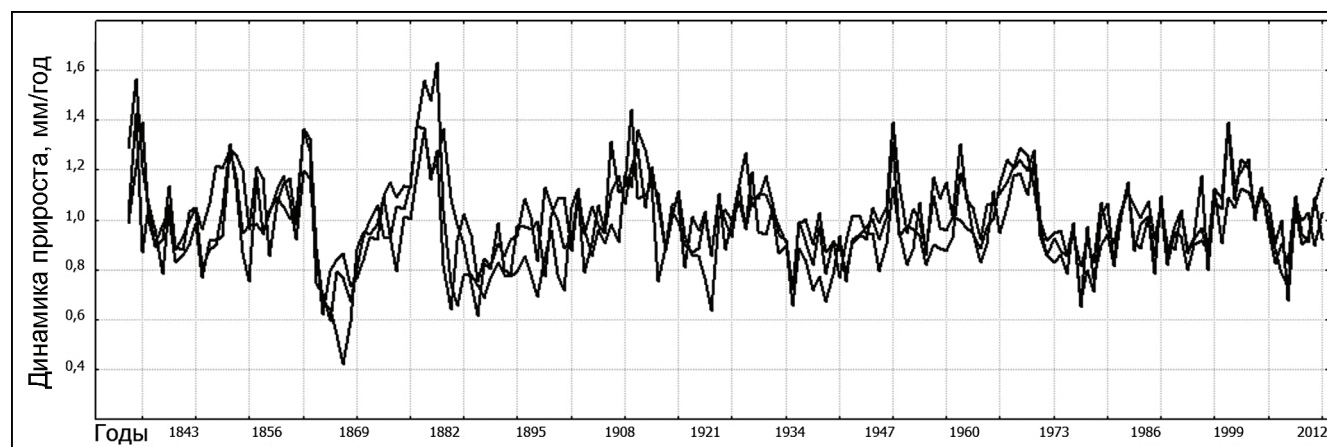


Рис. 2. Динамика приростов за последние 190 лет на примере трех площадок опробования.

Коэффициент корреляции Пирсона между выбранными дендрохронологиями 13–8, 19–6 и 19–10 составляет от 0,7 до 0,8

Fig. 1. Growth dynamics over the past 190 years on the example of three sampling sites.

The Pearson correlation coefficient between the selected dendrochronologies 13–8, 19–6 and 19–10 is from 0.7 to 0.8

Таблица 1

**Периоды прироста деревьев и их соотношение с солнечной активностью
на Надымском стационаре**

Период, год	Величина прироста, мм	Средние месячные числа Вольфа
1841–1863	0,7–1,4	3,2–131,9
1863–1875	0,5–1,1	5,2–97,3
1875–1881	0,9–1,7	2,2–140,3
1881–1892	0,3–1,1	2,7–74,6
1892–1906	0,7–1,4	1,5–87,9
1906–1913	0,8–1,6	1,5–64,2
1913–1931	0,7–1,4	3,5–105,4
1931–1940	0,5–1,1	7,7–119,2
1940–1949	0,7–1,5	3,4–151,8
1949–1962	0,6–1,4	3,4–201,3
1962–1968	0,8–1,6	9,6–110,6
1968–1980	0,5–1,1	12,2–164,5
1980–1986	0,7–1,7	12,3–118,5
1986–1996	0,4–1,4	8,0–158,5
1996–2019	0,55–1,6	0,4–120,8

Связь приростов с температурой воздуха. Основной тенденцией, которая прослеживается практически на всех точках опробования, является несоответствие средних годовых температур и приростов деревьев, что противоречит гипотезе о том, что между ними существует положительная связь. Так, с 1980 по 2020 г. наблюдается значительное увеличение средних годовых температур от -6 до -3°C [Специализированные..., 2020], однако величина среднего годового прироста деревьев уменьшается на всех площадках опробования (рис. 3). Подобная картина была в 1930–1947 гг., когда также наблюдались низкие приросты деревьев и близкая к современной средняя годовая температура. Например, в 1943 г. на метеостанции Салехард наблюдались самые высокие средние годовые температуры за историю метеонаблюдений – $-3,0^{\circ}\text{C}$. Этот рекорд был побит только в 2016 г., когда средняя годовая температура составила $-2,9^{\circ}\text{C}$ [Специализированные..., 2020].

Для того чтобы выявить вид зависимости между температурой воздуха и годичными приростами де-

ревьев, была построена матрица корреляций Пирсона. Бралась такие параметры, как средняя годовая температура воздуха, температура летнего периода с мая по сентябрь, когда возможна вегетация, а также зимние температуры предыдущего сезона (с октября прошедшего по апрель рассматриваемого года). Помимо этого, мы рассматривали каждый месяц по отдельности. Так, май – июнь, когда начинается вегетационный период, должны быть более важными месяцами для прироста, нежели август или сентябрь.

Согласно построенной матрице корреляций Пирсона, достоверные связи между средними годовыми температурами и приростами деревьев прослеживаются на 16 точках из 47, причем они имеют отрицательный характер. На большинстве остальных площадок опробования взаимосвязи хотя и статистически недостоверны, но также имеют отрицательный характер. Таким образом, в холодные годы наблюдается больший прирост. Наглядно подобное несоответствие видно на рис. 3.

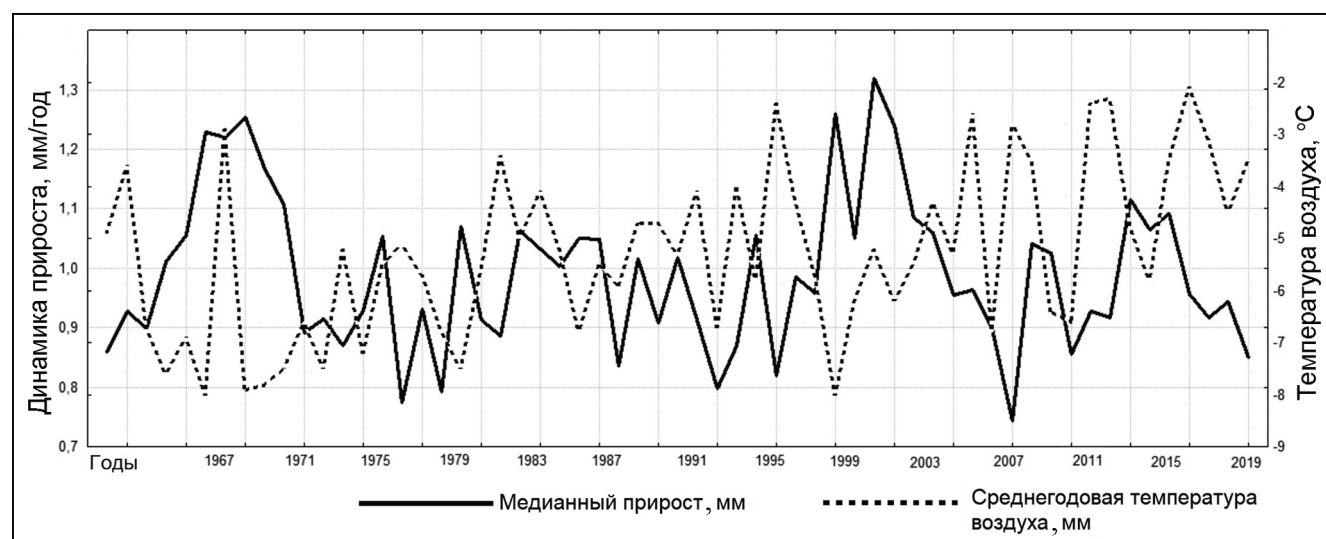


Рис. 3. Несоответствие медианного значения приростов деревьев на торфяно-минеральном бугре пучения (H19t10-верш) и хода среднегодовых температур (1960–2019). $R = -0,30$, $p < 0,05$

Fig. 3. Discrepancy between the median value of tree growth on the peat-mineral frost mound (H19m10-top) and the course of mean annual temperatures (1960–2019). $R = -0,30$, $p < 0,05$

Рассмотрим отдельно влияние на приросты зимних и летних температур. В обоих случаях достоверные взаимосвязи выявлялись относительно редко (7 из 49 для зимних температур и 20 из 49 для летних). Получившиеся недостоверные взаимосвязи между приростами и зимними температурами в основном отрицательные. Взаимосвязи между приростами и летними температурами также чаще отрицательные.

Также была проверена гипотеза о взаимосвязи между приростами деревьев и средними месячными

температурами отдельных месяцев. По матрице корреляций установлено, что наиболее значимыми месяцами для прироста являются май и сентябрь. Так, корреляция между майскими температурами и приростами в большинстве случаев положительна, хотя достоверно положительные связи наблюдаются лишь на пяти площадках из 47. Отсутствие достоверных корреляций на остальных площадках может быть объяснено большим вкладом локальных факторов (динамикой бугра, особенностями залегания многолетней мерзлоты). Корреляции

между сентябрьскими температурами и приростами, напротив, почти всегда отрицательны, при этом достоверно отрицательные взаимосвязи прослеживаются уже на восьми площадках, которые относятся, как правило, к стабильным буграм. Возможно, отрицательную корреляцию между приростами и сентябрьскими температурами можно объяснить чувствительностью деревьев к резким заморозкам. Так, после теплого сентября температура может резко переходить через нуль, что сказывается на снижении приростов.

Одно из объяснений отрицательных корреляций между средней годовой, а также средними летними и средними зимними температурами воздуха и приростами деревьев – крайняя инерционность мерзлотных геосистем. Для деревьев, произрастающих в условиях многолетней мерзлоты, более значимым фактором являются не температуры воздуха, а залегание многолетнемерзлых толщ [Nikolayev, 2009]. Стоит также учесть, что мощность сезонно-талого слоя зависит не только от температуры воздуха, но и от теплоизоляционных свойств торфа. Даже не-

смотря на то, что многие площадки опробования не имеют многолетней мерзлоты на глубине до 2 м, благодаря теплоизоляционным свойствам торфа на этих площадках почвенная температура все равно существенно ниже, чем температура воздуха. Так, согласно данным Г.В. Матышака, средняя температура торфяных почв на глубине 50 см на исследуемой территории в июле составляет 8,5°C [Бобрик и др., 2015]. По этой причине корректнее рассматривать не конкретные годы, а более продолжительные циклы. При этом рассматривались данные более отдаленной метеостанции Салехард, поскольку в масштабе 120 лет можно выделить большее количество климатических циклов. В большинстве случаев мы находим соответствие между графиком средних годовых температур и ежегодными приростами. Исключением являются периоды с 1930 по 1947 г. и с 1999 по 2019 г., когда аномально высокие температуры (до -3°C) не предопределили высокий прирост деревьев (рис. 4). Возможно, что в эти годы происходила активная деградация многолетней мерзлоты, что повлекло снижение годовичного прироста деревьев.



Рис. 4. Сравнение средней годовой температуры на метеостанции Надым в 1962–2019 гг. (тонкая линия) с медианным приростом деревьев на 47 площадках опробования (жирная линия)

Fig. 4. Comparison of mean annual temperature at the Nadym weather station in 1962–2019 (thin line) with the median tree growth at 47 sampling sites (thick line)

Затем по нескольким моделям было рассмотрено, есть ли запаздывание на 1, 2, 3 года и 5 лет между температурами воздуха и приростами деревьев. Были построены матрицы корреляций Пирсона между приростами деревьев за рассматриваемый год и температурами воздуха за предыдущий год. Затем подобные матрицы корреляций были построены для приростов и температур воздуха за 2, 3 и 5

лет до рассматриваемого года. Этот анализ не дал достоверных корреляций, таким образом, выделить запаздывание невозможно. Стоит также повторить, что подавляющая часть деревьев имеет относительно синхронные приросты (см. рис. 2, 3), при этом они произрастают в разных условиях.

Связь приростов с количеством осадков. Количество атмосферных осадков – крайне важный

фактор для ежегодного прироста деревьев. Так, в годы с экстремально низким или, наоборот, экстремально высоким количеством осадков прирост деревьев должен быть низким. Также количество осадков играет важную роль для состояния многолетнемерзлых толщ и развития бугров пучения, что опять же важно для прироста деревьев, произрастающих на этих буграх. Так, Матти Сеппеля было доказано, что важнейшим фактором для развития бугров пучения является высота снежного покрова, которая напрямую зависит от количества осадков в зимний период [Seppälä, 1982]. В годы с менее мощным снежным покровом происходит более активное промерзание бугра, благодаря которому активизируется его рост. В снежные годы из-за недостаточного промерзания бугра, напротив, происходит его деградация. Однако Н.А. Шполянской доказано (2010), что в северной тайге Западной Сибири более важным фактором становится весенне-летнее увлажнение территории. Высокая интенсивность испарения предопределяет зависимость температуры грунтов от их влажности. На более влажных участках фиксируется менее высокая температура грунта. Таким образом, высокая влажность сезонного слоя способствует сохранению высокого положения многолетней мерзлоты [Шполянская, 2010].

Следует также сказать, что количество осадков и температура воздуха – взаимозависимые величины, – в снежные зимы при господстве циклонического типа погоды температуры, как правило, выше, а в дождливое лето, напротив, ниже. Так, выпадение осадков в летний период на территории исследо-

вания в основном связано с холодными арктическими вторжениями [Орлова, 1962]. Тем не менее корреляции между температурой воздуха и количеством осадков на метеостанции Надым за 60-летний период наблюдений не очень строгие и составляют $R = 0,29$ при $p = 0,04$ для зимнего периода и $R = -0,16$ при $p = 0,24$ для летнего периода, из чего следует, что величину прироста следует рассматривать в совокупности двух факторов.

Нами была построена матрица корреляций между приростами деревьев на точках опробования и количеством осадков. Отдельно рассматривались осадки в зимний и летний периоды (октябрь – апрель и май – сентябрь, соответственно), а также осадки за каждый месяц. Достоверных корреляций между приростами деревьев и осадками в зимний период не обнаружено, встречаются и положительные, и отрицательные корреляции с крайне низким уровнем достоверности, что соответствует данным Н.А. Шполянской. В летний период, напротив, для многих точек опробования обнаружена достоверная прямая корреляция (до $R = 0,30$ при $p < 0,05$) между количеством осадков и приростами деревьев, т. е. чем больше выпадает осадков летом, тем выше приросты деревьев. Особенно много достоверных положительных корреляций между количеством осадков и приростами наблюдается в июле и августе, при этом в сентябре и октябре взаимосвязи отрицательны (табл. 2), что можно объяснить тем, что холодные осадки в сентябре и октябре не вовлекаются в транспирацию деревьями, зато способствуют анаэробным условиям в почве.

Таблица 2

Корреляции между приростом деревьев на отдельных площадках опробования и среднемесячным количеством осадков ($p < 0,05$)

Номер точки	Н18т1- верш	Н18т2- верш	Н18т2- склон	Н18т5- верш	Н13т4- верш	Н13т8- верш	Н19т2- верш	Н19т6- верш	Н19т7- верш
Корреляция июль (R)	0,19	0,29	0,26	0,08	0,19	0,14	0,15	0,20	0,31
Корреляция август (R)	0,27	0,18	0,14	0,28	0,14	0,07	0,14	0,09	0,18
Корреляция сентябрь (R)	-0,22	-0,31	-0,33	-0,31	-0,28	-0,27	-0,35	-0,35	-0,12

Результат можно объяснить несколькими способами: теплые осадки способствуют увеличению сезонного талого слоя в летний период, таким образом, с увеличением протаивания повышаются приросты деревьев. Торфяно-минеральный характер бугров пучения обуславливает быструю фильтрацию осадков в грунт. Подобная фильтрация происходит с большей

интенсивностью в провалах и трещинах, не занятых мерзлотой. Далее влага может как стекать в нижележащий водоем (болото или термокарстовое озеро), так и застаиваться. Данный процесс, однако, зависит от индивидуальных характеристик бугров пучения. Стоит также отметить, что кедр сибирский является влаголюбивым видом, он не произрастает в районах,

в которых средняя влажность воздуха составляет менее 45%. В некоторых случаях кедр может произрастать на переувлажненных участках. Таким образом, повышенная влажность почв на буграх пучения скорее положительно влияет на величину приростов данного вида [Крылов, Таланцев, 1983].

ВЫВОДЫ

Радиальные приросты деревьев на большей части фаций, в которых осуществлено опробование, синхронны. Исключения составляют фации, примыкающие к термокарстовым провалам.

Достоверной связи между средними годовыми температурами и приростами деревьев не выявлено. Корреляции между этими параметрами чаще отрицательные.

Выявлена отрицательная связь между приростами деревьев и зимними температурами воздуха. Вероятно, в холодные зимы бугры более стабильны, что объясняется более глубоким промерзанием почв и грунтов, благодаря чему не происходит активной деградации бугров пучения.

Наиболее важный месяц для прироста деревьев – май (положительная взаимосвязь), поскольку в середине – конце мая начинается вегетационный период, а его сдвиг на июнь при прочих равных погодных условиях снижает прирост.

В периоды с аномально высокими температурами воздуха приросты снижаются, что может быть связано с тем, что при деградации мерзлотных бугров и увеличении сезонно-талого слоя снижается глубина залегания почвенных вод, а верхний горизонт почвы иссушается.

Установлена положительная взаимосвязь между летними осадками и приростами деревьев, что, скорее всего, связано с экологией кедра сибирского (*Pinus sibirica*).

Наиболее благоприятные условия для произрастания деревьев в заболоченных ландшафтах подзоны северной тайги Западной Сибири – малоснежная зима, теплый май и лето при повышенных атмосферных осадках в этот период. Самым негативным фактором для приростов является позднее наступление лета.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-05-00786). Авторы выражают благодарность канд. геогр. наук Ю.Н. Бочкареву за предоставленные материалы дендрохронологии и дистанционного зондирования и за консультации; А.В. Хорошева, О.Е. Пономареву (ИКЗ СО РАН, Тюмень) за организацию полевой практики на Надымском стационаре СО РАН; студентов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова Н.В. Ильинову и О.М. Подгорного за помощь при сборе полевых данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Тюменской области. Вып. 1. Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1971. 198 с.
- Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа / под ред. С.И. Ларина. Омск: ФГУП «Омская картографическая фабрика», 2004. 303 с.
- Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Рыжова И.М., Москаленко Н.Г., Пономарева О.Е., Огнева О.А. Взаимосвязь геокриологических условий и гидротермических параметров почв плоскобугристых торфяников севера Западной Сибири (стационар Надым) // Криосфера Земли. 2015. Т. 19. № 4. С. 31–38.
- Бочкарев Ю.Н. Изучение внутривековой динамики ландшафтов северной тайги Западной Сибири методами дендрохронологии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2006. № 3. С. 62–67.
- Бочкарев Ю.Н. Многолетняя динамика бугров пучения на севере Западной Сибири по данным дендрохронологии // Вопросы географии. 2014. Т. 138. С. 251–270.
- Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Хантемиров Р.М., Наурзбаев М.М. Изменчивость летней температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария за последние 1,5 тыс. лет: сравнительный анализ данных годовичных колец деревьев и ледовых кернов // Доклады РАН. 1998. Т. 358. № 5. С. 681–684.
- Ваганов Е.А., Шиятов С.Г. Дендроклиматические и дендрохронологические исследования в Северной Евразии // Лесоведение. 2005. № 4. С. 18–27.
- Гвоздецкий Н.А. Физико-географическое районирование СССР. М.: МГУ, 1968. 576 с.
- Дьяконов К.Н. Функционально-динамическое направление в экспериментальных ландшафтных исследованиях // Известия РАН. Сер. геогр. 1997. № 2. С. 62–75.
- Геокриология СССР. Западная Сибирь / под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 454 с.
- Крылов Г.В., Таланцев Н.К., Козакова Н.Ф. Кедр. М.: Лесная промышленность, 1983. 216 с.
- Матвеев С.М., Румянцев Д.Е. Дендрохронология. Воронеж: ВГЛТА, 2013. 140 с.
- Орлова В.В. Климат СССР. Западная Сибирь. Л.: Гидрометеоздат, 1962. 144 с.
- Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 416 с.
- Тишин Д.В., Чижикова Н.А. Дендрохронология. Казань: Казанский университет, 2018. 34 с.
- Хантемиров Р.М. Древесно-кольцевая реконструкция летних температур на севере Западной Сибири за последние 3248 лет // Сибирский экологический журнал. 1999. Т. 6. № 2. С. 185–191.

- Хорошев А.В., Артемова О.А., Матасов В.М., Коцеева А.С. Иерархические уровни взаимосвязей между рельефом, почвами и растительностью в среднетаежном ландшафте // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2008. № 1. С. 66–72.
- Шиятов С.Г., Хантемиров Р.М., Горланова Л.А. Тысячелетняя реконструкция температуры лета на Полярном Урале: данные древесных колец можжевельника сибирского и лиственницы сибирской // Археология, этнография и антропология Евразии. 2002. Т. 1. № 9. С. 2–5.
- Шполянская Н.А. Вечная мерзлота и глобальные изменения климата. М.: Ин-т компьютерных исследований; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2010. 199 с.
- Allard M., Caron S., Bégin Y. Climatic and ecological controls on ice segregation and thermokarst: the case history of a permafrost plateau in northern Quebec, *Permafrost and Periglacial Processes*, 1996, vol. 7, no. 3, p. 207–227.
- Beltrami H., Chapman D.S., Archambault S., Bergeron Y. Reconstruction of high resolution ground temperature histories combining dendrochronological and geothermal data, *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, vol. 136, no. 3–4, p. 437–445.
- Cook E.R., Holmes R.L. Program ARSTAN user's manual, Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, 1984, 15 p.
- Giddings J.L. Dendrochronology in northern Alaska. The University of Arizona, 1941, 162 p.
- Ferguson C.W. Concepts and techniques of dendrochronology, *Scientific methods in medieval archaeology*, 1970, p. 183–200.
- Huscroft C.A., Lipovsky P.S., Bond J.D. Permafrost and landslide activity: Case studies from southwestern Yukon Territory, *Yukon exploration and geology*, 2003, p. 107–119.
- Kajimoto T., Matsuura Y., Osawa A., Prokushkin A.S., Abaimov A.P. Root system development of *Larix gmelinii* trees affected by micro-scale conditions of permafrost soils in central Siberia, *Roots: The Dynamic Interface between Plants and the Earth*, Springer, Dordrecht, 2003, p. 281–292.
- Lloyd A.H., Yoshikawa K., Fastie C.L., Hinzman L., Frazer M. Effects of permafrost degradation on woody vegetation at arctic treeline on the Seward Peninsula, Alaska, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, vol. 14, no. 2, p. 93–101.
- Nikolaev A.N., Fedorov P.P., Desyatkin A.R. Influence of climate and soil hydrothermal regime on radial growth of *Larix cajanderi* and *Pinus sylvestris* in Central Yakutia, Russia, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2009, vol. 24, no. 3, p. 217–226.
- Raspopov O.M., Dergachev V.A., Kolström T. Periodicity of climate conditions and solar variability derived from dendrochronological and other palaeoclimatic data in high latitudes, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, vol. 209, no. 1–4, p. 127–139.
- Schweingruber F.H. Tree rings: basics and applications of dendrochronology. Springer Science & Business Media, 2012, 275 p.
- Seppälä M. An experimental study of the formation of palsas, *Proceedings of the Fourth Canadian Permafrost Conference*, National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, 1982, p. 36–42.
- Tech R. TSAP-Win: Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications (Version 0), Heidelberg, Germany, 2010.
- Vaganov E.A., Kirilyanov A.V. Dendrochronology of larch trees growing on Siberian permafrost, *Permafrost Ecosystems*, Springer, Dordrecht, 2010, p. 347–363.

Электронный ресурс

Специализированные массивы для климатических исследований. ВНИИГМИ-МЦД. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml> (дата обращения 15.05.2020).

Поступила в редакцию 18.03.2021

После доработки 25.12.2021

Принята к публикации 13.05.2022

INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS OVER TREE GROWTH ON FROST MOUNDS IN WESTERN SIBERIA

I.V. Volovinsky¹, K.N. Diakonov²

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science

¹ Postgraduate Student; e-mail: volovinskiy@gmail.com

² Head of the Department, Professor, Corresponding Member of the RAS; e-mail: diakonov.geofak@mail.ru

When solving the problem of the relationship between landscape space and landscape time, we often use the relationships between tree growth and climatic parameters to indicate changes in landscape functioning. The article analyzes the influence of climatic factors during recent 140 years on the growth of Siberian stone pine (*Pinus sibirica*) on frost mounds in the north of Western Siberia within bog landscapes of the northern taiga subzone. Dendrochronologies were constructed for 47 sampling sites located on various types of frost mounds. It was found that most of dendrochronologies correlate with each other, although the mounds are significantly different. Sampling sites adjacent to thermokarst sinkholes are the least consistent with the modal

dendrochronology. It was found that there is no reliable relationship between mean annual temperatures and tree growth; the most considerable tree growth is observed in years with high May air temperatures. The ideal conditions for tree growth are cold winters with little snow and warm and humid summers. It was found that during periods with abnormally high air temperatures tree growth decreases. It happens due to the degradation of permafrost mounds and the increasingly thicker seasonally thawed layer. So the depth of soil water decreases, and the upper soil horizon dries up.

Keywords: dendrochronology, landscape science, permafrost studies, frost mounds, West Siberian plain, Siberian pine

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 19-05-00786). The authors express their gratitude to Yu.N. Bochkareva, Ph.D., for materials in dendrochronology and remote sensing and for consultations; to A.V. Khoroshev and O.E. Ponomareva, Institute of the Earth's Cryosphere, for organization of field training at the Nadym station of the RAS Siberian Branch; to N.V. Il'ina and O.M. Podgorny, students of the MSU Faculty of Geography for their assistance in field data collection.

REFERENCES

- Allard M., Caron S., Bégin Y. Climatic and ecological controls on ice segregation and thermokarst: the case history of a permafrost plateau in northern Quebec, *Permafrost and Periglacial Processes*, 1996, vol. 7, no. 3, p. 207–227.
- Atlas Tyumenskoy oblasti, vyp. 1* [Atlas of the Tyumen oblast, iss. 1], Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii pri Sovete Ministrov SSSR, 1971, 198 p. (In Russian)
- Atlas Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga* [Atlas of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug], S.I. Larin (ed.), FGUP "Omsk cartographic factory", 2004, 303 p. (In Russian)
- Beltrami H., Chapman D.S., Archambault S., Bergeron Y. Reconstruction of high resolution ground temperature histories combining dendrochronological and geothermal data, *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, vol. 136, no. 3–4, p. 437–445.
- Bobrik A.A., Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Ryzhova I.M., Moskalenko N.G., Ponomareva O.E., Ogneva O.A. Vzaimosvyaz' geokriologicheskikh usloviy i gidrotermicheskikh parametrov pochv ploskobugrystykh torfyanikov severa Zapadnoy Sibiri (statsionar Nadym) [Interrelation of geocryological conditions and hydrothermal parameters of peatland soils in the north of Western Siberia (Nadym station)], *Kriosfera Zemli*, 2015, vol. 19, no. 4, p. 31–38. (In Russian)
- Bochkarev Yu.N. Izucheniye vnutriviekovoi dinamiki landshaftov severnoi taigi Zapadnoi Sibiri metodami dendrokronologii [Intracentennial dynamics of the northern taiga landscapes of Western Siberia using dendrochronological methods], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2006, no. 3, p. 62–67. (In Russian)
- Bochkarev Yu.N. Mnogoletnyaya dinamika bugrov pucheniya na severe Zapadnoi Sibiri po dannym dendrokronologii [Long-term dynamics of frost mounds in the north of Western Siberia according to dendrochronology data], *Voprosy geografii*, vol. 138, Moscow, Kodeks Publ., 2014, p. 251–270. (In Russian)
- Cook E.R., Holmes R.L. *Program ARSTAN user's manual*, Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, 1984, 15 p.
- Dyakonov K.N. Funktsional'no-dinamicheskoe napravlenie v eksperimental'nykh landshaftnykh issledovaniyakh [Functional-dynamic course in experimental landscape research], *Izvestiya RAN, Ser. geogr.*, 1997, no. 2, p. 62–75. (In Russian)
- Ferguson C.W. Concepts and techniques of dendrochronology, *Scientific methods in medieval archaeology*, 1970, p. 183–200.
- Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir'* [Geocryology of the USSR. Western Siberia], E.D. Ershov (ed.), Moscow, Nedra Publ., 1989, 454 p. (In Russian)
- Giddings J.L. *Dendrochronology in northern Alaska*, The University of Arizona, 1941, 162 p.
- Gvozdeckij N.A. *Fiziko-geograficheskoe rajonirovanie SSSR* [Physical-geographical zoning of the USSR], Moscow, MGU Publ., 1968, 576 p. (In Russian)
- Huscroft C.A., Lipovsky P.S., Bond J.D. Permafrost and landslide activity: Case studies from southwestern Yukon Territory, *Yukon exploration and geology*, 2003, p. 107–119.
- Kajimoto T., Matsuura Y., Osawa A., Prokushkin A.S., Abaimov A.P. Root system development of Larix gmelinii trees affected by micro-scale conditions of permafrost soils in central Siberia, *Roots: The Dynamic Interface between Plants and the Earth*, Springer, Dordrecht, 2003, p. 281–292.
- Khantemirov R.M. Drevesno-kol'tsevaya rekonstruktsiya letnikh temperatur na severe Zapadnoi Sibiri za poslednie 3248 let [Tree-ring-based reconstruction of summer temperatures in the north of Western Siberia for the last 3248 years], *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 1999, vol. 6, no. 2, p. 185–191. (In Russian)
- Khoroshev A.V., Artemova O.A., Matasov V.M., Koshcheeva A.S. Ierarkhicheskie urovni vzaimosvyazei mezhdu rel'efom, pochvami i rastitel'nost'yu v srednetaezhnom landshafte [Hierarchical levels of interrelations between relief, soils and vegetation within a middle taiga landscape], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2008, no. 1, p. 66–72. (In Russian)
- Krylov G.V., Talancev N.K., Kozakova N.F. *Kedr* [Cedar], Moscow, Lesnaja promyshlennost', 1983, 216 p. (In Russian)
- Lloyd A.H., Yoshikawa K., Fastie C.L., Hinzman L., Frazer M. Effects of permafrost degradation on woody vegetation at arctic treeline on the Seward Peninsula, Alaska, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, vol. 14, no. 2, p. 93–101.
- Matveev S.M., Rumyantsev D.E. *Dendrokronologiya* [Dendrochronology], Voronezh, VGLTA Publ., 2013, 140 p. (In Russian)
- Nikolaev A.N., Fedorov P.P., Desyatkin A.R. Influence of climate and soil hydrothermal regime on radial growth

- of *Larix cajanderi* and *Pinus sylvestris* in Central Yakutia, Russia, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2009, vol. 24, no. 3, p. 217–226.
- Orlova V.V. *Klimat SSSR. Zapadnaja Sibir'* [Climate of the USSR. Western Siberia], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1962, 144 p. (In Russian)
- Puzachenko Yu.G. *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh* [Mathematical Methods in Environmental and Geographic Studies], Moscow, Akademiya Publ., 2004, 410 p. (In Russian)
- Raspopov O.M., Dergachev V.A., Kolström T. Periodicity of climate conditions and solar variability derived from dendrochronological and other palaeoclimatic data in high latitudes, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, vol. 209, no. 1–4, p. 127–139.
- Schweingruber F.H. *Tree rings: basics and applications of dendrochronology*, Springer Science & Business Media, 2012, 275 p.
- Seppälä M. An experimental study of the formation of palsas, *Proceedings of the Fourth Canadian Permafrost Conference*, National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, 1982, C. 36–42.
- Shiyatov S.G., Khantemirov R.M., Gorlanova L.A. Tysyacheletnyaya rekonstruktsiya temperatury leta na Polyarnom Urale: dannye drevesnykh kolets mozhzhevel'nika sibirskogo i listvennitsy sibirskoi [Millennial reconstruction of summer temperature in the Polar Urals: tree ring data of Siberian juniper and Siberian larch], *Arkheologiya, etnografiya i antropologiya Evrazii*, 2002, vol. 1, no. 9, p. 2–5. (In Russian)
- Shpolyanskaya N.A. *Vechnaya merzlota i global'nye izmeneniya klimata* [Permafrost and global climate change], Izhevsk, Regul'nyy i Khaotich. Dinamika Publ., 2010, 199 p. (In Russian)
- Tech R. TSAP-Win: *Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications* (Version 0), Heidelberg, Germany, 2010.
- Tishin D.V., Chizhikova N.A. *Dendrokhnologiya* [Dendrochronology], Kazan, Kazan Univ. Publ., 2018, 34 p. (In Russian)
- Vaganov E.A., Shiyatov S.G. Dendroklimaticheskie i dendrokhnologicheskie issledovaniya v Severnoi Evrazii [Dendroclimatic and dendrochronological studies in Northern Eurasia], *Lesovedenie*, 2005, no. 4, p. 18–27. (In Russian)
- Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Khantemirov R.M., Naurzbaev M.M. The variability of summer air temperature at high latitudes in the Northern Hemisphere for the last 1,5 ka: a comparative analysis of the data on annual tree rings and ice cores, *Doklady Earth Sciences*, 1998, vol. 359, no. 2, p. 267–270.
- Vaganov E.A., Kirdyanov A.V. Dendrochronology of larch trees growing on Siberian permafrost, *Permafrost Ecosystems*, Springer, Dordrecht, 2010, p. 347–363.
- Web source*
Spetsializirovannye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy, VNIIGMI-MTsD [Specialized arrays for climate research VNIIGMI-MTsD], URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml> (access date 15.05.2020). (In Russian)

Received 18.03.2021

Revised 25.12.2021

Accepted 13.05.2022

ЭМИССИЯ МЕТАНА ИЗ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВЫГОЗЕРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

И.В. Морозова¹, Н.А. Белкина², М.С. Потахин³, Е.В. Гатальская⁴

^{1–4} *Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр РАН», Институт водных проблем Севера, группа исследований донных отложений*

¹ *Мл. науч. сотр.; e-mail: irinamorozova1502@gmail.com*

² *Руководитель группы, д-р геогр. наук; e-mail: bel110863@mail.ru*

³ *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: mpotakhin@mail.ru*

⁴ *Мл. науч. сотр.; e-mail: katusha9210@yandex.ru*

Представлены результаты исследования распределения метана в придонных водах и донных отложениях в различных районах Выгозерского водохранилища, которые были выделены в соответствии с морфологией котловины и различными условиями формирования донных отложений: юго-восточный район – в прошлом затопленные болота, устьевые участки рек и оз. Бобровое, центральный район – оз. Выгозера до затопления и северный район – зона развития течений под влиянием р. Сегежи, испытывающая воздействие сточных вод Сегежского ЦБК.

Выявлено, что содержание метана в Выгозерском водохранилище сопоставимо с данными, полученными при исследовании других водоемов умеренного климата. Показан неравномерный характер распределения газа (от $0,75 \cdot 10^{-3}$ до $1,7 \cdot 10^{-3}$ мг/л в придонной воде и от 0,1 до 1,2 мг/л в донных отложениях). Наиболее высокие концентрации зафиксированы в юго-восточном районе, минимальные – в северном, что определяется качественным составом органического вещества (фульватный характер гумуса в юго-восточном районе в отличие от преобладания гуминовых кислот в других районах, а также высокое содержание серы в осадках северного района) и термическими условиями (более прогреваемый мелководный юго-восточный район).

Скорость поступления газа из донных отложений варьировала от 6,36 до 14,16 мгCH₄/(м² · сут) в зависимости от района: максимум отмечен в юго-восточной части, минимум – в северной части водохранилища. Суммарный поток метана из донных отложений составил более 11 т/сут. Доказано, что пространственная неоднородность распределения метана в водохранилище связана с морфологией котловины, неравномерным распределением речного стока и антропогенной нагрузки в настоящем, а также во многом определяется историей водоема, а именно захоронением органического вещества разного генезиса при формировании нового ложа водохранилища после его затопления.

Ключевые слова: парниковые газы, концентрация метана, поток метана на границе вода – дно

DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-15-26

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальна проблема влияния парниковых газов на климат Земли. Парниковыми газами называют целый ряд газообразных веществ, способных задерживать тепловое излучение небесных тел. Основные природные газы Земли по разным оценкам (в порядке влияния на тепловой баланс) – водяной пар, двуокись углерода, метан, озон. Естественный парниковый эффект необходим для поддержания жизни. Без него средняя температура на Земле составила бы -18°C . Сбалансированное природное количество газов пропускает солнечную радиацию, поглощая инфракрасное излучение, отражающееся от поверхности земли. В результате почва и воздух нагреваются до комфортной для жизни температуры. Метан является вторым по значимости парниковым газом. До последнего времени считалось, что парниковый эффект от метана в 25 раз сильнее, чем от углекислого газа [Forster et al., 2007]. Однако меж-

правительственная группа экспертов по изменению климата ООН (IPCC) на основе базовых сценариев расчета выбросов парниковых газов утверждает, что «парниковый потенциал» метана опаснее, чем оценивалось раньше. В расчете на 100 лет парниковая активность метана в 28 раз сильнее, чем у углекислого газа, а в 200-летней перспективе – в 84 раза, поэтому даже небольшие изменения концентрации метана могут значительно повлиять на климат Земли [IPCC..., 2014]. Источники поступления метана в атмосферу разделяют на две большие группы: естественные и антропогенные [Scientific Assessment..., 1994, 2010; Deemer et al., 2016].

Важнейшим естественным источником эмиссии метана в атмосферу являются водоемы. Метан в водоемах продуцируют метанотрофные археи, развивающиеся строго в анаэробных зонах осадочных отложений и в водной толще в так называемых анаэробных микронизмах. Существует также термоген-

ный метан, образующийся при длительной метаморфизации органического вещества при повышенных температурах и давлении в ограниченных местах глубоко в недрах Земли [Леин, Иванов, 2009]. По результатам анализов изотопного состава углерода метана, образовавшегося при микробном метаногенезе в донных отложениях (ДО) пресноводных и морских водоемов, показано, что в пресных водоемах основным процессом является ацетокластический метаногенез, в котором метан образуется из метильных групп ацетата, метанола, метиламинов и метансульфидов (метилотрофный метаногенез): $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$; $4\text{HCOOH} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$; в морских осадках преобладает гидрогенотрофный метаногенез по реакции: $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$. Многие представители метаногенов могут получать энергию в процессах анаэробного окисления СО: $4\text{CO} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2$. Некоторые наиболее детально исследованные виды *Methanobacterium* используют в качестве доноров электронов первичные и вторичные спирты, окисляя их в соответствующие кислоты и кетоны [Louis et al., 2008; Леин, Иванов, 2009; Черницына и др., 2016].

Биогеохимический цикл метана в биосфере включает не только процесс образования метана – метаногенез, но и окисление метана – метаноокисление, происходящие при участии различных групп микроорганизмов. В группу облигатных метанотрофов входят разнообразные по морфологии аэробные грамотрицательные бактерии, которые выступают в качестве катализаторов окисления по реакции: $\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{биомасса} + \text{экзометаболиты}$. Эта реакция универсальна для метана любого генезиса (микробного, термогенного, абиогенного). В результате процесса микробного метаноокисления увеличивается пул CO_2 , происходит синтез *de novo* органического вещества (ОВ). Окисление метана может происходить и в отсутствии кислорода анаэробными метанотрофными археями и сульфатредуцирующими бактериями [Леин, Иванов, 2009]. Процесс метаноокисления в водной толще нивелирует поток CH_4 , поступающий из ДО и глубоких недр Земли. Например, в Азовском море поток метана из водной толщи в атмосферу составил $223\,228\text{ м}^3/\text{сут}$ ($\sim 4,22 \cdot 10^{-9}\text{ мгCH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$), а из ДО в воду – $792\,378\text{ м}^3/\text{сут}$ ($\sim 1,50 \cdot 10^{-5}\text{ мгCH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) [Гарькуша и др., 2016]. В Черном море эмиссия CH_4 из водной толщи в атмосферу составляла 0,48 млн $\text{м}^3/\text{сут}$ ($\sim 8,20 \cdot 10^{-10}\text{ мгCH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$), ДО – 2914,20 млн $\text{м}^3/\text{сут}$ ($\sim 4,99 \cdot 10^{-6}\text{ мгCH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) [Гарькуша, Федоров, 2020]. Большинство работ по изучению эмиссии метана проводилось в морских экосистемах [Стрелецкая и др., 2017; Малахова и др., 2020].

Отдельный интерес представляет изучение содержания и эмиссии метана из ДО в водохранили-

щах. Водохранилища являются искусственно созданными водоемами, в силу своего происхождения и функционально зависят от деятельности человека. В то же время протекание биологических процессов в водохранилищах идентично процессам в экосистемах естественных водоемов. В ходе различных исследований, которыми было охвачено порядка 100 водохранилищ более чем в 24 странах мира, были зафиксированы выбросы парниковых газов [Louis et al., 2000]. Метан в водохранилищах является как продуктом метаболизма при минерализации легкоокисляемых ОВ в водной толще, так и конечным продуктом деструкции ОВ в донных отложениях анаэробными бактериями.

С помощью теоретической модели и по материалам Международной комиссии по крупным дамбам (International Commission On Large Dams (ICOLD)) Всемирного реестра плотин (World register of dams) обнаружено, что крупнейшие водохранилища мира ежегодно выбрасывают в атмосферу около $104 \pm 7,2\text{ Тг CH}_4$ [Lima et al., 2008; IPCC..., 2014]. По предварительной оценке, основанной на базе данных натурных наблюдений на водохранилищах мира, расположенных в различных природно-климатических условиях, эмиссия с поверхности искусственных водоемов России составила 0,53–0,72 Тг $\text{CH}_4/\text{год}$ [Гречушникова, Школьный, 2019]. По сведениям [Гречушникова и др., 2019], удельная плотность потока метана для водохранилищ умеренного климата, в том числе расположенных на территории РФ, составила для олиго- и мезотрофных $0,1\text{--}8,5\text{ мгCH}_4\text{-C}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, мезотрофных и эвтрофных со средней глубиной 25 м – $10\text{--}180\text{ мгCH}_4\text{-C}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, с глубинами менее 2 м – $1623\text{ (1720) мгCH}_4\text{-C}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, все с коэффициентом водообмена более 2; олиготрофных, преимущественно глубоководных со средней глубиной 44 м – $0,1\text{--}3,3\text{ мгCH}_4\text{-C}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, мезотрофных и эвтрофных – $4,5\text{--}17\text{ мгCH}_4\text{-C}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, все с коэффициентом водообмена менее 2.

Совсем мало исследований на водохранилищах посвящено изучению содержания метана и потока газа непосредственно из ДО. В зарубежной литературе подобные данные есть для ряда водохранилищ США, Канады, Польши, Финляндии, Бразилии [Lima et al., 2008; IPCC..., 2014]. На территории России такие исследования проводились всего на нескольких десятках водохранилищ (в стране их более 2500). Было оценено содержание метана в ДО Иваньковского $\sim 0,56 \cdot 10^{-4} - 0,36 \cdot 10^{-2}\text{ мг/л}$; Рыбинского $\sim 0,42 \cdot 10^{-4} - 128,57\text{ мг/л}$; Кубанского $\sim 0,15 \cdot 10^{-3} - 0,33 \cdot 10^{-2}\text{ мг/л}$ и других водохранилищ Волги и Камы (в среднем $\sim 0,98 \cdot 10^{-4} - 0,02\text{ мг/л}$). [Дзюбан, 2009; Гарькуша и др., 2014]. Наблюдения за эмиссией метана из донных отложений прове-

дены на Можайском водохранилище: содержание метана в летний период в ДО составляло $\sim 0,05$ – $1,79$ мг/л [Ломов и др., 2018], поток газа из илов изменялся от 56 до $196 \text{ мгCH}_4\text{-C}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ [Гречушникова и др., 2019]. Очевидно, что данных содержания метана в ДО водохранилищ недостаточно. Нами была поставлена цель: изучить содержание метана и оценить эмиссию метана из ДО на границе дно – вода в Выгозерском водохранилище.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выгозерское водохранилище расположено в восточной части Балтийского щита, является одним из крупнейших в России, находится в Сеgezском районе Республики Карелия. Принадлежит бассейну Белого моря – водосбор Беломорско-Балтийского канала (ББК – р. Нижний Выг). Координаты центра: $63^\circ 30'$ с. ш., $34^\circ 49'$ в. д. Сток зарегулирован (1933 г.), через водоем проходит ББК. Площадь зеркала составляет 1251 км^2 , длина береговой линии – 658 км , объем – $7,2 \text{ км}^3$, длина – $89,2 \text{ км}$, ширина: средняя – $12,8 \text{ км}$, наибольшая – $28,5 \text{ км}$, глубина: средняя – $5,8 \text{ км}$, наибольшая – $25,0 \text{ км}$. Высота над уровнем моря 89 м БС [Озера Карелии..., 2013]. В водохранилище впадают реки Выг (Верхний Выг), Сеgezжа, Викша, Шоба и др., вытекает р. Нижний Выг.

Наблюдения проводились в начале сентября 2017 г. на трех станциях, расположенных в различных районах Выгозерского водохранилища, которые были выделены в соответствии с морфологией котловины и динамикой вод: юго-восточный район – затопленные устьевые участки рек Верхний Выг и Вожма и оз. Бобровое (станция 1706), центральный район – дно оз. Выгозера до затопления (станция 1715); северный район – зона влияния р. Сеgezжи и сточных вод Сеgezжского ЦБК (станция 1721) (рис. 1) [Белкина, 2014; 2015].

Пробоотбор воды выполняли батометром Рутнера. Отбор проб донных отложений и воды над осадком (ВНО, слой 10 см) для определения содержания метана производился из гравитационной трубки (модифицированный вариант стратометра Алексонсона [Nakanson, Jansson, 1983]). Предварительно в ней были сделаны отверстия с шагом 10 см , которые герметично заклеивались монтажной лентой. При отборе осадка из трубки пробоотборника ленту, закрывающую отверстия, аккуратно надрезали, осадок (1 мл для глинистых фракций, 2 мл для песчаных) отбирали шприцами с обрезанными носиками. В качестве флаконов использовали стеклянные виалы объемом 30 см^3 с полипропиленовыми накручивающимися крышками с септой PTFE/SILICONE. Пробу ДО выдавливали в виалы, заранее заполнен-

ные дистиллированной водой так, чтобы оставалось 5 см^3 воздушного пространства, добавляли 2–3 капли 50%-й H_2SO_4 и закрывали крышкой. Шприц, которым отбирали пробу, обратно вставляли в отверстие, используя его как заглушку.

Отбор ВНО в виалы объемом 30 см^3 проводили *in situ* с помощью сифона, опуская шланг в трубу пробоотборника почти до границы вода – осадок, немедленно в пробу добавляли консервант (50%-ю H_2SO_4) и герметично закрывали. Виалы заранее калибровали, так чтобы объем пробы воды составил 25 см^3 . Таким способом отбора удалось сохранить как растворенный, так и пузырьковый метан.

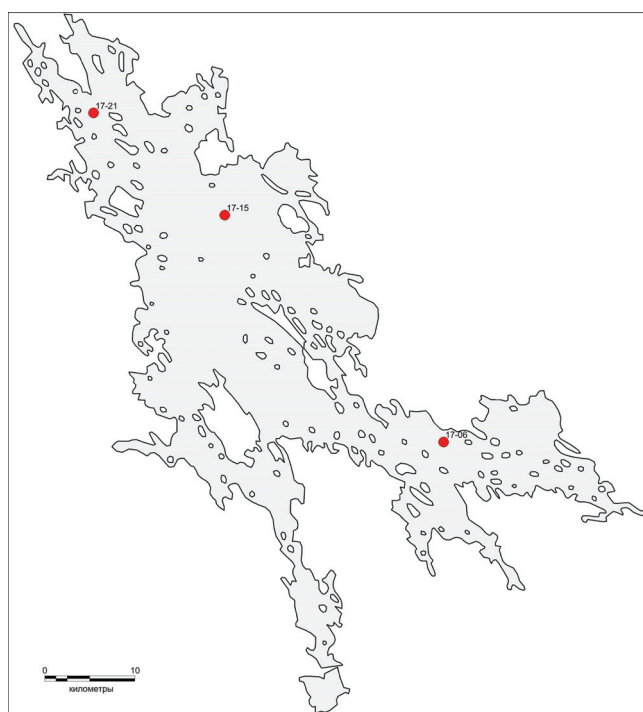


Рис. 1. Карта-схема отбора проб в Выгозерском водохранилище

Fig. 1. Schematic map of sampling points in the Vygozero reservoir

Использовали следующие методы анализа ДО и ВНО: pH – потенциометрический метод; Eh – потенциометрический метод с Pt электродами и медиатором Трилоном-Б, O_2 в ВНО – титрование по Винклеру, O_2 в ДО – потенциометрический метод, портативным газоанализатором. В ДО также определяли $\text{C}_{\text{орг}}$ – метод Тюрина; $\text{N}_{\text{орг}}$ – метод Кьельдаля с титриметрическим окончанием по методу Конвея; $\text{P}_{\text{общ}}$ – фотометрический метод после окисления персульфатом калия; $\text{P}_{\text{мин}}$ – фотометрическое определение с молибдатом аммония; Fe, Mn – атомно-абсорбционная спектрометрия; фульвовые (ФК) и гуминовые кислоты (ГК) – фотометрический метод после щелочной экстракции [Lorenzen, 1967;

Аринушкина, 1982], все определения выполнены в Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН. Гранулометрический анализ ДО выполнен на базе Центра коллективного пользования (ЦКП) Института геологии КарНЦ РАН, анализ серы был выполнен модифицированным методом Ринькиса со спектрофотометрическим окончанием в ЦКП Института леса КарНЦ РАН.

Массовую долю метана в донных отложениях и в надилловой воде измеряли газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара [РД 52.24.512-2012; РД 52.24.511-2013]. Анализ метана проводили совместно на научном оборудовании ЦКП Института леса КарНЦ РАН.

Для определения эмиссии метана из ДО в воду использовали два варианта расчета:

– уравнение регрессии, аппроксимирующее зависимость между концентрацией метана в верхнем слое ДО и потоком из них, полученное на основе серии натурных замеров потоков метана на различных водных объектах, в том числе расположенных на территории Республики Карелия [Гарькуша и др., 2016]:

$$\lg F \text{ CH}_4 = 1,03891 \cdot \lg C \text{ CH}_4 + 1,4631 \\ (r = 0,84; n = 46; P < 0,01),$$

где $\lg F \text{ CH}_4$ – логарифм потока метана из отложений в воду, (нл/м²)/сутки; $\lg C \text{ CH}_4$ – логарифм концентрации метана в отложениях влажного осадка, нл/дм³;

– закон Фика, утверждающий, что плотность потока вещества при диффузии пропорциональна градиенту концентрации диффундирующего компонента:

$$J = -D \cdot dc/dx,$$

где J – количество вещества, проходящего перпендикулярно через единицу площади поверхности за единицу времени, м³/(м²с); D – коэффициент диффузии, м²/с ($1,9 \cdot 10^{-9}$ м²/с [Wise, Houghton, 1966]); dc/dx – градиент концентраций. Знак «минус» указывает на то, что диффузия происходит в направлении, обратном увеличению концентраций. В пористой среде диффузионные процессы замедляются, так как увеличивается путь молекул и ионов в жидкой фазе в результате их движения по извилистым поровым каналам, вокруг отдельных частиц. Кроме того, на снижение скорости диффузии оказывает влияние наличия тупиковых пор. Для того чтобы учесть влияние этих факторов вводят эффективный коэффициент диффузии: $D^* = por \cdot D$, где por – пористость ДО. Градиент концентрации можно представить как $dc/dx \approx (c_1 - c_2)/L$, где c_1 – концентрация растворенного в поверхностном слое ДО метана, c_2 – концентрация растворенного в ВНО метана, L – толщина слоя, м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температура воды в водной толще Выгозерского водохранилища находилась в диапазоне $10 \pm 1^\circ\text{C}$. В придонных горизонтах в заливах на станциях 1706 и 1721 температура воды составила $6,7^\circ\text{C}$, в центральной части водохранилища – $9,4^\circ\text{C}$. К концу лета вся водная толща Выгозерского водохранилища уже перемешалась и к моменту установления осенней гомотермии была достаточно хорошо насыщена кислородом, содержание кислорода в воде изменялось в пределах 70–86% ($8,08$ – $9,92$ мгО₂/л). Самое низкое содержание кислорода по всему водному профилю было отмечено в центральном районе ($8,08$ – $8,55$ мгО₂/л), самое высокое – в северном районе ($9,54$ – $10,64$ мгО₂/л). От поверхностных к нижележащим слоям воды насыщение кислородом понижалось на всех станциях, особенно значительно на станции 1706.

Содержание СО₂ в воде составило 3–5 мг/л. Самое высокое значение обнаружено в придонных горизонтах на станции 1706. В северном районе на станции 1721 было замечено повышение содержания СО₂ на глубинах 15–22 м. На станции 1715 различий уровня СО₂ не наблюдалось.

Исследованные ДО Выгозерского водохранилища представлены алевроитовыми осадками коричневого цвета (юго-восточный и центральный районы) и черного цвета (северный район) (табл. 1). Фракции с размером частиц 0,05–0,1 и 0,25–0,1 (соответствующие размеру песка (0,05–1–2 мм) по классификации [Blott, Pye, 2001]), являлись преобладающими. Большая доля песчаной фракции (в среднем 67%) свидетельствует о продолжающихся абразионных процессах, особенно в северной части водоема, где в отличие от донных отложений других районов в поверхностном слое присутствует фракция крупного песка (диаметр 0,5–2,0 мм; от 0,06 до 5%). В ДО центральной части водохранилища (ст. 1715) присутствие этой фракции зафиксировано в нижележащих слоях (11–12 и 21–22 см), где содержание крупного песка оказалось самым высоким (1–2 и 5–9% соответственно).

По своим физико-химическим свойствам ДО Выгозерского водохранилища относятся к слабовосстановленным Eh ($-75 + 75$ мВ), pH преимущественно нейтральный ($6,50$ – $7,56$) (табл. 2). Отличительной чертой ДО являлось высокое содержание ОВ – 37–48% (в среднем – 45%) (табл. 3). Доля $C_{\text{орг}}$ в отложениях значительная и составляла 17–20% (в среднем – 18%). Доминирующей частью ОВ в поверхностных слоях ДО юго-восточной части являлись ФК, что указывает на высокую подвижность гумуса и преобладание растительной органики (ФК/ГК = 1,8). В центральной и северной частях превалируют ГК, образующие

медленный пул (медленно разлагающееся) ОВ, отношение $ФК/ГК = 0,2–0,4$. Подобное ОВ физически защищено от разложения посредством связи с микроагрегатами, к нему относят фракции окклюдированного (внутриагрегатного) органического вещества, а также гидролизующееся ОВ, связанное с глинистыми частицами [Холодова и др., 2020]. Концентрация $N_{орг}$ в осадках низкая (0,27–0,86%). Величина отношения $C/N = 24–79$ указывает на крайне низкое содержание азота в ОВ осадков. Концентрации фосфора, как валового, так и минерального, в осадках сравнительно невысокие ($P_{мин} =$

0,008–0,17%, $P_{общ} = 0,14–0,21\%$), с максимумом в поверхностном слое на всех станциях. По величине отношения $C/P = 221–407$, очевидно, что фосфор в отложениях не накапливается, а в процессе минерализации ОВ поступает в поровые и придонные слои воды. Концентрации пигментов в осадках станций 1706, 1715 и 1721 варьировали: хлорофилл А – 110–227 мкг/г, хлорофилл В – 11–54 мкг/г, хлорофилл С – 28–111 мкг/г и феофитин – 171–343 мкг/г. Превалирование феофитина в осадках указывает на интенсивное разложение всех растительных пигментов.

Таблица 1

Гранулометрический состав донных отложений Выгозерского водохранилища

Район озера, № станции	Горизонт отбора, см	Размер частиц, мм							
		2,0–1,0	1,0–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	<0,005
Юго-восточный район, ст. 1706	1–2	0,00	2,81	12,88	27,84	25,48	27,58	3,22	0,19
	11–12	0,00	0,00	8,33	38,43	20,59	26,65	5,76	0,25
Центральный район, ст. 1715	1–2	0,00	0,00	2,60	37,42	24,34	30,29	5,17	0,19
	11–12	1,04	5,20	12,12	29,72	22,83	24,27	4,03	0,20
	21–22	2,48	8,64	13,73	25,93	19,38	24,17	4,25	0,19
Северный район, ст. 1721	1–2	0,45	5,46	10,80	22,52	21,67	35,19	3,72	0,18
	11–12	0,06	3,98	12,81	31,34	20,04	27,01	4,54	0,23

Валовые концентрации железа в ДО повсеместно высокие – 7–19%. Наибольшее содержание его обнаружено в поверхностных слоях ДО. Ниже 10 см слоя концентрация железа уменьшалась на порядок на всех станциях. Наличие железосодержащих озерных руд в водоеме отмечалось и ранее [Потахин и др., 2018]. Содержание серы в осадках относительно низкое – 0,09–0,20%. Максимальный уровень серы в осадках выявлен на ст. 1721 – 0,14–0,20% (табл. 3).

Содержание метана в ВНО Выгозерского водохранилища изменялось в диапазоне – $0,75 \cdot 10^{-3} – 0,17 \cdot 10^{-2}$ мг/л, в ДО 0,13–1,17 мг/л (см. табл. 2).

В юго-восточной части концентрация метана в ДО достаточно высокая и варьировала от 0,27 до 0,61 мг/л. Осадки этого района относятся к слабавосстановленным, Eh в верхних слоях имел отрицательное значение, pH слабощелочной (7,65), вниз по колонке – нейтральный (7,01). На ст. 1706 обнаружено высокое содержание детрита в поверхностных слоях осадков, частицы детрита представляют собой осевшие на дно фрагменты ОВ, поступающего с заболоченного водосбора рек Верхний Выг, Вожа, Тянука, Шигеренджа. Это, на наш взгляд, основная причина максимального содержания метана в поверхностном слое осадков по сравнению с теми же горизонтами на двух других станциях. Также во всех исследованных слоях осадков этой станции

зафиксированы высокие показатели $C_{орг}$ (18–19%), пигментов и феофитина до 325 мкг/г, вглубь ила концентрация $C_{орг}$ повышалась. В ОВ ДО преобладали лабильные ФК – 1,35%.

В ДО центральной части водохранилища концентрация метана изменялась в пределах 0,13–1,17 мг/л. Содержание CH_4 в подповерхностном слое в девять раз выше, чем в поверхностном слое. Вниз по колонке слабощелочная (7,56) среда осадков сменялась нейтральной (7,14), Eh варьировал – 8–64 мВ. Содержание ОВ ($C_{орг}$, $N_{орг}$, $P_{мин}$), Fe, Mn в верхних слоях было выше, чем в осадках двух других станций, вглубь ила концентрации $N_{орг}$, $P_{мин}$, Fe, Mn понижались, количество $C_{орг}$ – увеличивалось. Содержание хлорофилла А и феофитина вниз по колонке понижалось, хлорофилла В и С – незначительно повышалось. В ДО преобладали ГК. В силу гидродинамических особенностей именно в центральной части в период формирования новой чаши водоема преимущественно происходило накопление продуктов эрозии водосбора и продуктов размыва берегов [Белкина, 2015], в результате в ДО в этой части водохранилища к моменту формирования устойчивого абразионного профиля оказались законсервированы существенные объемы углерода, которые, в свою очередь, служат источником выбросов метана.

Таблица 2

Физико-химические условия, содержание метана в воде над осадком (ВНО) и донных отложениях (ДО), эмиссия метана в Выгозерском водохранилище

№ станции	Глубина станции, м	Объект	Горизонт отбора, см	Местонахождение станции, описание осадков	t, °C	Eh, mv	pH	d, г/мл	Пористость, por	Содержание CH ₄ , мг/л	Эмиссия, мгCH ₄ /(м ² · сут)	
											по ГАРЬКУША и др., 2016]	по Фику
1706	14	ВНО	0–30	Юго-восточный район	6,7	–*	6,63	–	–	0,17·10 ⁻²	14,16	2,27
		ДО	1–2	Коричневый плотный ил	–	–75	7,84	1,02	0,95	0,27		
			11–12	Коричневый плотный ил	–	59	7,01	1,06	0,95	0,61		
1715	16	ВНО	0–30	Центральный район	9,4	–	6,59	–	–	0,75·10 ⁻³	6,75	1,13
		ДО	1–2	Коричневый ил	–	8	7,56	1,02	0,96	0,13		
			11–12	Коричневый ил	–	64	7,14	1,06	0,91	1,09		
			21–22	Коричневый ил	–	35	6,96	1,09	0,9	1,17		
1721	23,5	ВНО	0–30	Северный район	6,7	–	6,87	–	–	0,96·10 ⁻³	6,36	1,05
		ДО	1–2	Черный жидкий ил	–	75	6,88	1,01	0,95	0,13		
			11–12	Черный жидкий ил	–	11	6,50	1,07	0,88	0,29		

Примечание. * Исследования не проводились.

Таблица 3

Химический состав ДО Выгозерского водохранилища

Химический состав ДО	Юго-восточный район, ст. 1706		Центральный район, ст. 1715			Северный район, ст. 1721	
	Горизонт отбора, см		Горизонт отбора, см			Горизонт отбора, см	
	1–2	11–12	1–2	11–12	21–22	1–2	11–12
мгО ₂ /л	0,2	3,8	1,0	3,8	2,0	1,9	3,7
C, %	18,3	19,8	18,4	19,4	18,8	17,8	17,1
ППП, %	44,0	44,8	46,1	43,4	41,0	40,4	34,6
N _{орг} , %	0,27	0,76	0,82	0,78	0,60	0,86	0,68
N(NH ₄), %	0,009	0,009	0,008	0,008	0,008	0,008	0,007
P _{мин} , %	0,15	0,12	0,17	0,10	0,08	0,16	0,12
P _{общ} , %	0,21	0,17	0,21	0,14	0,12	0,21	0,16
C/N	79	30	26	29	36	24	29
C/P	221	297	224	363	407	217	281
S, %	0,09	0,10	0,12	0,16	0,07	0,14	0,20
Fe, %	12,62	6,63	18,87	6,99	6,66	10,51	7,25
Mn, %	–	–	1,69	0,60	0,48	0,37	0,34
ChlA, мкг/г	198	131	194	155	137	227	110
ChlB, мкг/г	20	17	26	25	31	54	19
ChlC, мкг/г	28	31	47	42	50	111	28
Fe _{орг} , мкг/г	325	190	300	235	189	343	171
ФК, %	1,350	–	0,440	0,207	–	0,594	0,317
ГК, %	0,770	–	1,788	0,567	–	1,868	1,148
ФК/ГК	1,8	–	0,2	0,4	–	0,3	0,3

На всех исследованных станциях наблюдалась отчетливая закономерность между распределением $S_{орг}$, концентрацией метана и гранулометрическим составом ДО: с увеличением в осадках мелких фракций содержание $S_{орг}$ и CH_4 увеличивалось. Максимальные концентрации газа обнаружены в осадках глубоководной центральной части, с преобладающим содержанием мелких частиц фракций и повышенным содержанием ОВ (см. табл. 2). Полученные данные согласуются с данными литературы, так в восстановленных осадках оз. Байкал содержание метана выше в более мелкозернистых фракциях ДО (преимущественно алевритовой и пелитовой размерности). Увеличение концентрации газа наблюдалось в направлении пески – алевриты сильнопесчаные и песчаные – алевриты глинисто-песчаные и песчано-глинистые – алевриты глинистые. В этом же направлении увеличивалось и количество ОВ [Гарькуша и др., 2019].

В более восстановленных осадках северного района содержание метана минимальное как в поверхностных (1–2 см), так и в подповерхностных (11–12 см) слоях. ДО окрашены в черный цвет (черный цвет осадков, по-видимому, обусловлен наличием в них сульфидов металлов). Сверху вниз по колонке

нейтральные условия среды сменялись слабокислыми, значения Eh закономерно уменьшались. Содержание $S_{орг}$, $N_{орг}$, $P_{мин}$, Fe ниже, чем в других районах водохранилища, вглубь ила их концентрации также снижались. Причиной относительно низкого содержания метана в ДО этого района являлась выраженная конкуренция метанообразования и сульфатредукции. Разнообразные по составу сернистые органические соединения (лигнин, металмеркаптан, диметилсульфид, тиофенол и др.), являющиеся источником сульфата для сульфатредукторов, поступают в этот район водохранилища со сточными водами ЦБК [Лозовик, 2015] и частично осаждаются на дне. Также снижению метаногенеза способствовало образование дополнительного сероводорода при гниении ОВ и более интенсивное протекание анаэробного метаноокисления сообществом сульфатредуцирующих бактерий и метанотрофных архей, о чем свидетельствует специфический запах разлагающейся органики и повышенная доля серы в ДО, по сравнению с другими районами водохранилища.

Концентрация метана в поверхностном слое (1–2 см) всех изученных осадков на два-три порядка больше, чем в надилловой воде. Такая зависимость свидетельствует об активной диффузии

метана, обусловленной градиентом концентрации на границе вода – дно, что согласуется с данными, полученными при исследовании других водных объектов [Федоров и др., 1999; Дзюбан, 2002; Гарькуша и др., 2014; Ломов и др., 2018; Гречушникова и др., 2019; Гарькуша, Федоров, 2020].

Величина потока метана из ДО в воду прямо пропорциональна его концентрации в верхнем слое ДО (рис. 2). Расчеты по [Гарькуша и др., 2016] показали, что суммарная эмиссия метана из ДО Выгозерского водохранилища составила 11,4 т/сут. Максимум потока метана из ДО обнаружен в юго-восточной части – 14,16 мгCH₄/(м² · сут). В центральной части скорость эмиссии газа – 6,75 мгCH₄/(м² · сут). Минимальная скорость потока метана на границе дно – вода обнаружена в северной части водохранилища – 6,36 мгCH₄/(м² · сут). Согласно расчету эмиссии метана (по модели Фика) поток газа из ДО в воду для всего водоема составил 1,85 т/сут. Он, также как по модели [Гарькуша и др., 2016], выше в юго-восточной части – 2,27 мгCH₄/(м² · сут). В центральной части скорость потока равна 1,13 мгCH₄/(м² · сут). Минимальный поток газа отмечен в осадках северной части водохранилища – 1,05 мгCH₄/(м² · сут).

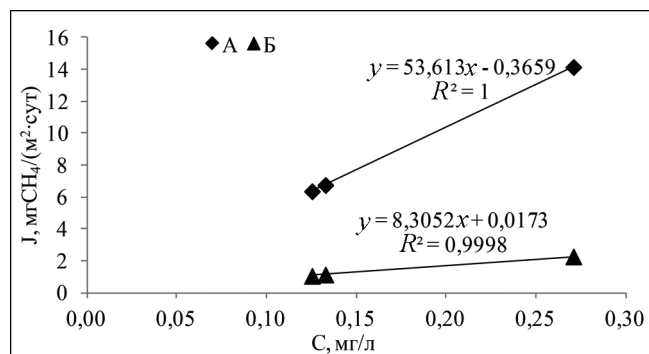


Рис. 2. Зависимость величины потока метана (J , мгCH₄/(м² · сут): А – по формуле [Гарькуша и др., 2016]; Б – по модели Фика от его концентрации (C) в верхнем слое ДО, мг/л, в Выгозерском водохранилище

Fig. 2. Dependence of methane flow values, mgCH₄/(m² · day): А – by the formula of [Garkusha et al., 2016]; Б – by the Fick's model, on its concentration in the upper layer of bottom sediments, mg/l, in the Vygozero reservoir

Полученные нами данные согласуются с данными литературы. Так, значения диффузионных потоков метана на границе ДО – вода для ряда северных водоемов, в мгCH₄/(м² · сут): Rzeszów Reservoir (Польша) 0,16–35,04; Wilcza Wola Reservoir (Польша) 0,16–2,24; Tuusulanjärvi Lake (Финляндия) – 72; Postilampi Lake (Финляндия) – 104,96; Soiviojärvi

Lake (Финляндия) – 8,64; Takajärvi Lake (Финляндия) – 4,8; Luminakajärvi Lake (Финляндия) – 27,04; Ranuajärvi Lake (Финляндия) – 76; Lokka Reservoir (Финляндия) – 0,48; Porttipahta Reservoir (Финляндия) – 24,96; Bled Lake (Словения) – 35,2; Orta Lake (Италия) – 2,08–117,92; Stechlin Lake (Германия) – 0,8–3,2 [Grucza-Rokosz, Tomaszek, 2015; Huttunen et al., 2006].

Разница между расчетами по модели Фика и [Гарькуша и др., 2016], по-видимому, составляет пузырьковую эмиссию метана – 9,55 т/сут, т. е. около 84% от общей эмиссии CH₄. По разным данным вклад пузырьковой эмиссии метана оценивается от 13 до 85%. Пузырьковый транспорт обеспечивает существенно более быстрый перенос метана, чем диффузия, и его необходимо учитывать в расчетах [Саломатин и др., 2014; Langenegger et al., 2019; McGinnis et al., 2006; Judd, 2003]. Однако следует отметить, что авторы модели [Гарькуша и др., 2016] в экспериментах устанавливали камеры на небольших глубинах (0,25–0,35 м), а в нашем исследовании глубины составляли 14–23,5 м, и полученные расчетные данные скорости потока метана из ДО по модели Гарькуши могут быть завышены.

ВЫВОДЫ

Распределение содержания метана в верхних слоях ДО Выгозерского водохранилища неравномерно. В поверхностном слое осадков самая высокая концентрация газа обнаружена на юго-востоке – 0,27 мг/л, в устьевой зоне рек, несущих ОБ болотного характера и с высоким содержанием детрита в отложениях. В северном районе водохранилища, где расположен Сегежский ЦБК, конкуренцию метаногенезу составляет активная сульфатредукция – содержание метана минимально как в поверхностном, так и в подповерхностном слое. Вглубь ила концентрация CH₄ повышается на всех исследованных станциях, максимум отмечен в центральном районе в слоях 11–12 и 21–22 см (1,09–1,17 мг/л, соответственно).

Концентрация газа в поверхностном (1–2 см) слое осадков изученных станций на два-три порядка больше, чем в надильовой воде, что указывает на поступление метана из донных отложений в водную толщу. Эмиссия метана отложениями Выгозерского водохранилища составила 11,4 т/сут, по [Гарькуша и др., 2016], и 1,85 т/сут, по уравнению Фика. Скорость поступления CH₄ со дна более значительна в юго-восточной части Выгозерского водохранилища.

Благодарности. Авторы благодарны сотрудникам аналитической лаборатории ИЛ и аналитического центра ИГ ЦКП КарНЦ РАН за сотрудничество в выполнении анализа метана ДО и ВНО, серы и гранулометрического состава ДО. Работа выполнена в рамках Госзадания ИВПС КарНЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ариунушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1982. 490 с.
- Белкина Н.А. Донные отложения Выгозерского водохранилища // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 247–256.
- Белкина Н.А. Ретроспективная оценка состояния донных отложений Выгозерского водохранилища // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 3. С. 270–279.
- Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А. Оценка общего объема, эмиссии и окисления метана в воде и донных отложениях Черного моря // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 12-2(102). С. 6–13.
- Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Расчет элементов баланса метана в водных экосистемах Азовского моря и Мирового океана на основе эмпирических формул // Метеорология и гидрология. 2016. № 6. С. 48–58.
- Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Андреев Ю.А., Михайленко О.А. Метан в воде и донных отложениях озера Байкал // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 5. С. 511–522.
- Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Пространственно-временные закономерности распределения содержания метана в водохранилищах // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10. № 1. С. 450–466.
- Гречушников М.Г., Ломова Д.В., Ломов В.А., Кременецкая Е.Р., Ефимова Л.Е., Репина И.А. Эмиссия метана на границах «вода – донные отложения» и «вода – атмосфера» в слабопроточном долинном водохранилище. Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения: сб. науч. трудов. 2019. С. 327–331.
- Гречушников М.Г., Школьный Д.И. Оценка эмиссии метана водохранилищами России // Водное хозяйство России. 2019. № 2. С. 58–71.
- Дзюбан А.Н. Метан в донных отложениях Череповецкой зоны Рыбинского водохранилища и оценка его микробиологической трансформации и эмиссии // Гидробиологический журнал. 2009. Т. 45. № 6. С. 36–42.
- Дзюбан А.Н. Метан и микробиологические процессы его трансформации в воде верхневолжских водохранилищ // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 1. С. 68–78.
- Леин А.Ю., Иванов М.В. Биогеохимический цикл метана в океане. М.: Наука, 2009. 576 с.
- Лозовик П.А. Выгозерское водохранилище // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 227–241.
- Ломов В.А., Гречушников М.Г., Репина И.А., Степаненко В.М., Казанцев В.С., Артамонов А.Ю. Эмиссия метана с поверхности водохранилищ // Третьи виноградовские чтения. Грани гидрологии: сб. докладов Международной науч. конференции памяти Ю.Б. Виноградова / под ред. О.М. Макарьевой. 2018. С. 401–405.
- Малахова Т.В., Малахова Л.В., Будников А.А., Иванова И.Н. Пространственно-временная изменчивость содержания метана в Севастопольской бухте и его эмиссии в атмосферу // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 3. С. 73–80.
- Озера Карелии: справочник / под ред. Н.Н. Филатова, В.И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
- Потахин М.С., Белкина Н.А., Слуковский З.И., Новицкий Д.Г., Морозова И.В. Изменение донных отложений Выгозера в результате многофакторного антропогенного воздействия // Общество. Среда. Развитие. 2018. № 3(48). С. 107–117.
- РД 52.24.511-2013. Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов н/Д: Гидрохим. ин-т, 2013. 19 с.
- РД 52.24.512-2012. Объемная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов н/Д: Гидрохим. ин-т, 2012. 23 с.
- Саломатин А.С., Юсупов В.И., Верецагина О.Ф., Черных Д.В. Акустическая оценка концентрации метана в водной толще в областях его пузырьковой разгрузки // Акустический журнал. 2014. Т. 60. № 6. С. 638–644.
- Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О., Кизяков А.И., Облогов Г.Е., Васильев А.А., Хомутов А.В., Дворников Ю.А. Подземные льды и их роль в формировании воронки газового выброса на полуострове Ямал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 1. С. 91–99.
- Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в воде и донных отложениях Рыбинского водохранилища: распределение и биогеохимические особенности образования // Деп. в ВИНТИ РАН 02.06.99. № 1756-В-99. Ростов н/Д, 1999. 82 с.
- Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Яшин М.А., Лазарев В.И., Ильин Б.С., Филиппова О.И., Воликов А.Б., Иванов А.Л. Оптические характеристики экстрагируемых фракций органического вещества типичных черноземов в многолетних полевых опытах // Почвоведение. 2020. Т. 53. № 6. С. 39–748.
- Черницына С.М., Мамаева Е.В., Ломакина А.В., Погодаева Т.В., Галачянц Ю.П., Букин С.В., Пименов Н.В., Хлыстов О.М., Земская Т.И. Структура микробных сообществ в донных отложениях Посольской Банки, озеро Байкал // Микробиология. 2016. Т. 85. № 6. С. 672–680.
- Blott S.J., Pye K. Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, vol. 26, iss. 11, p. 1237–1248, DOI: 10.1002/esp.261.
- Deemer R., Harrison A., Li S., Beaulieu J., Delsontro T. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis, *BioScience*, 2016, vol. 66, no. 11, p. 949–964.
- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P. et al. Changes in atmospheric constituents and in Radiative Forcing, *Asses. Report of the IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge, 2007, p. 129–217.
- Gruca-Rokosz R., Tomaszek J.A. Methane and Carbon Dioxide in the Sediment of a Eutrophic Reservoir: Production Pathways and Diffusion Fluxes at the Sediment – Water Interface, *Water Air Soil Pollut.*, 2015, vol. 226:16, DOI: 10.1007/s11270-014-2268-3.

- Hakanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology, Berlin, 1983, 316 p.
- Huttunen J.T., Väisänen T.S., Hellsten S.K., Mertikainen P.J. Methane fluxes at the sediment – water interface in some boreal lakes and reservoirs, *Boreal Environmental Research*, 2006, no. 11, p. 27–34.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, R.K. Pachaur, L.A. Meyer (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- Judd A.G. The global importance and context of methane escape from the seabed, *Geo-Marine Letters*, 2003, vol. 23, no. 34, p. 47–154, DOI: 10.1007/s00367-003-0136-z.
- Langenegger T., Vachon D., Donis D., McGinnis D.F. What the bubble knows: Lake methane dynamics revealed by sediment gas bubble composition, *Limnology and Oceanography*, 2019, vol. 64, p. 1526–1544, DOI: 10.1002/lno.11133.
- Lima I.B.T., Ramos F.M., Bambace L.A.W., Rosa R.R. Methane Emissions from Large Dams as Renewable Energy Resources: A Developing Nation Perspective, *Mitigation and Adaption Strategies for Global Change*, 2008, no. 13, p. 193–206, DOI: 10.1007/s11027-007-9086-5.
- Lorenzen C.J. Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations, *Limnology and Oceanography*, 1967, vol. 12, no. 2, p. 343–346.
- Louis V.L., Kelly C.A., Duchemin E., Rudd J.W.M., Rosenberg D.M. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate, *Bioscience*, 2000, vol. 50, p. 766–775.
- McGinnis D.F., Greinert J., Artemov Y., Beaubien S.E., Wüest A. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? *Journal of Geophysical Research*, 2006, vol. 111, no. 9, C09007, DOI: 10.1029/2005JC003183.
- Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994, World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project, 1994, no. 37.
- Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010, World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project, 2010, no. 52.
- Wise D.L., Houghton G. The diffusion coefficient of ten slightly soluble gases in water of 10–60°C, *Chemical Engineering Science*, 1966, vol. 21, no. 11, p. 999–1010.

Поступила в редакцию 21.05.2021

После доработки 01.03.2022

Принята к публикации 13.05.2022

EMISSION OF METHANE FROM BOTTOM SEDIMENTS OF THE VYGOZERO RESERVOIR

I.V. Morozova¹, N.A. Belkina², M.S. Potakhin³, E.V. Gatalskaya⁴

^{1–4} Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, sediment research group

¹ Junior Scientific Researcher; e-mail: irinamorozova1502@gmail.com

² Head of the group, D.Sc. in Geography; e-mail: bel110863@mail.ru

³ Senior Scientific Researcher, PhD in Geography; e-mail: mpotakhin@mail.ru

⁴ Junior Scientific Researcher; e-mail: katusha9210@yandex.ru

The paper presents the results of studying the distribution of methane in near-bottom waters and bottom sediments in different parts of the Vygozero reservoir, which were identified in accordance with the morphology of the basin and various conditions of bottom sediments formation: South-Eastern area, former flooded bogs, river mouths and the Bobrovoe Lake; Central area, i. e. the Vygozero Lake before flooding; and the Northern region in which currents are influenced by the Segezha River, and which is affected by waste waters from the Segezha Pulp and Paper Mill.

It was found that the methane content in the Vygozero reservoir is comparable to the data for other temperate water bodies. The non-uniform gas distribution is shown (from $0,75 \cdot 10^{-3}$ to $1,7 \cdot 10^{-3}$ mg/l in bottom water and from 0,1 to 1,2 mg/l in bottom sediments). The highest concentrations were recorded in the South-Eastern region, and the minimum in the Northern region, which is determined by both qualitative composition of organic matter (the fulvate humus in the South-Eastern region, in contrast to the predominance of humic acids in other regions, as well as the higher sulfur content in the sediments of the Northern region) and thermal conditions (the warmer shallow South-Eastern region).

The rate of gas inflow from bottom sediments varied from 6,36 to 14,16 mgCH₄/(m²·day) depending on the region: the maximum was recorded in the South-Eastern part, and the minimum in the Northern part of the reservoir. The total methane flux from bottom sediments was more than 11 tons/day. We proved that the spatial heterogeneity of methane distribution in the reservoir depends on the morphology of the basin, the uneven distribution of river runoff and actual anthropogenic load, and is also largely determined by the history of the reservoir, namely, the burial of organic matter of different genesis during the formation of a new reservoir bed after its flooding.

Keywords: greenhouse gases, methane concentration, methane flow at the water-bottom boundary

Acknowledgments. The authors are grateful to the staff of the analytical laboratory of the Forest Research Institute and the analytical center of the Institute of Geology of the Center for Collective Use, the RAS Karelian Scientific Center, for their cooperation in the analysis of bottom sediments methane and over-silt water, sulfur, and particle size distribution of bottom sediments. The work was carried out within the framework of the State Assignment of the Institute of Water Problems of the North of the RAS Karelian Scientific Center.

REFERENCES

- Arinushkina E.V. *Rukovodstvo po himicheskemu analizu pochv* [Manual for Chemical Analysis of Soils], Moscow, Moscow State University Publ., 1982, 490 p. (In Russian)
- Belkina N.A. [Bottom sediments of the Vygozero reservoir], *Kрупнейшие озера-водохранилища Северо-западной европейской территории России: современное состояние и изменении экосистем при климатических и антропогенных воздействиях* [The largest lakes-reservoirs in north-western European Russia: actual state and ecosystem changes under climatic and anthropogenic impacts], N.N. Filatov (ed.), Petrozavodsk, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences Publ., 2015, p. 247–256. (In Russian)
- Belkina N.A. Retrospective assessment of bottom sediment condition in the Vygozero reservoir, *Water Resources*, 2014, vol. 41, no. 3, p. 270–279.
- Blott S.J., Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, vol. 26, iss. 11, p. 1237–1248, DOI: 10.1002/esp.261.
- Chernitsyna S.M., Mamaeva E.V., Lomakina A.V., Pogodaeva T.V., Galach'yants Y.P., Bukin S.V., Khlystov O.M., Zemskaya T.I., Pimenov N.V. Phylogenetic diversity of microbial communities in the Posolsk Bank bottom sediments, Lake Baikal, *Mikrobiology*, 2016, vol. 85, no. 6, p. 672–680.
- Deemer R., Harrison A., Li S., Beaulieu J., Delsontro T. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis, *BioScience*, 2016, vol. 66, no. 11, p. 949–964.
- Dzjuban A.N. Metan v donnyh otlozhenijah Cherepoveckoj zony Rybinskogo vodохранилища i ocenka ego mikrobiologicheskoy transformacii i emissii [Methane in bottom sediments of the Cherepovets zone of the Rybinsk reservoir and the assessment of its microbiological transformation and emission], *Gidrobiologicheskij zhurnal*, 2009, vol. 45, no. 6, p. 36–42. (In Russian)
- Dzjuban A.N. Methane and the microbiological processes of its transformation in the water of the Upper Volga reservoirs, *Water Resources*, 2002, vol. 29, no. 1, p. 61–71.
- Fedorov Ju.A., Tambieva N.S., Gar'kusha D.N., Horoshevskaja V.O. *Metan v vode i donnyh otlozhenijah Rybinskogo vodохранилища: raspredelenie i biogeohimicheskie osobennosti obrazovaniya* [Methane in water and bottom sediments of the Rybinsk reservoir: distribution and biogeochemical characteristics of its formation], Rostov-on-Don, Institute for Scientific and Technical Information Publ., 1999, no. 1756-V-99, 82 p. (In Russian)
- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P. et al. Changes in atmospheric constituents and in Radiative Forcing, *Asses. Report of the IPCC*, Cambridge University Press., Cambridge, 2007, p. 129–217.
- Gar'kusha D.N., Fedorov Y.A., Tambieva N.S. Computing the methane cycle elements in the aquatic ecosystems of the Sea of Azov and the World Ocean based on empirical formulae, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, vol. 41, no. 6, p. 410–417.
- Gar'kusha D.N., Fedorov Y.A., Tambieva N.S., Andreev Y.A., Mikhailenko O.A. Methane in water and bottom sediments of Lake Baikal, *Water Resources*, 2019, vol. 46, no. 5, p. 726–737.
- Garkusha D.N., Fyodorov Yu.A. Ocenka obshhego ob'ema, emissii i okisleniya metana v vode i donnyh otlozhenijah Chernogo morja [Estimation of the total volume, emission and oxidation of methane in water and bottom sediments of the Black Sea], *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, 2020, no. 12-2 (102), p. 6–13. (In Russian)
- Gar'kusha D.N., Fedorov Ju.A., Tambieva N.S. Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti raspredeleniya sodержaniya metana v vodохранилищah [Spatial-temporal patterns of methane distribution in reservoirs], *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, 2014, vol. 10, no. 1, p. 450–466. (In Russian)
- Grechushnikova M.G., Lomova D.V., Lomov V.A., Kremeneckaja E.R., Efimova L.E., Repina I.A. [Emission of methane at “water – bottom sediments” and “water – atmosphere” boundaries in a low-flow valley reservoir], *Nauchnye problemy ozdorovleniya rossijskikh rek i puti ih resheniya. Sbornik nauchnyh trudov* [Scientific problems of Russian rivers restoration and ways to solve them. Collection of scientific papers], 2019, p. 327–331. (In Russian)
- Grechushnikova M.G., Shkol'nyy D.I., Ocenka emissii metana vodохранилищami Rossii [Estimation of methane emission from reservoirs of Russia], *Vodnoe hozyajstvo Rossii*, 2019, no. 2, p. 58–71. (In Russian)
- Gruca-Rokosz R., Tomaszek J.A. Methane and Carbon Dioxide in the Sediment of a Eutrophic Reservoir: Production Pathways and Diffusion Fluxes at the Sediment – Water Interface, *Water Air Soil Pollut*, 2015, vol. 226:16, DOI: 10.1007/s11270-014-2268-3.
- Hakanson L., Jansson M. *Principles of lake sedimentology*, Berlin, 1983, 316 p.
- Holodov V.A., Yaroslavceva N.V., Farkhodov Y.R., Yashin M.A., Ivanov A.L., Lazarev V.I., Iliyn B.S., Philippova O.I., Volikov A.B. Optical properties of the extractable organic matter fractions in typical chernozems of long-term field experiments, *Eurasian Soil Science*, 2020, vol. 53, no. 6, p. 39–748.
- Huttunen J.T., Väisänen T.S., Hellsten S.K., Mertikainen P.J. Methane fluxes at the sediment–water interface in some boreal lakes and reservoirs, *Boreal Environmental Research*, 2006, no. 11, p. 27–34.
- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report*, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth

- Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)], IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- Judd A.G. The global importance and context of methane escape from the seabed, *Geo-Marine Letters*, 2003, vol. 23, no. 3–4, p. 147–154, DOI: 10.1007/s00367-003-0136-z.
- Langenegger T., Vachon D., Donis D., McGinnis D.F. What the bubble knows: Lake methane dynamics revealed by sediment gas bubble composition, *Limnology and Oceanography*, 2019, vol. 64, iss. 4, p. 1526–1544, DOI: 10.1002/lno.11133.
- Lein A.Ju., Ivanov M.V. *Biogeoхимический цикл метана в океане* [Biogeochemical cycle of methane in the ocean], Moskva, Nauka Publ., 2009, 576 p. (In Russian)
- Lima I.B.T., Ramos F.M., Bambace L.A.W., Rosa R.R. Methane Emissions from Large Dams as Renewable Energy Resources: A Developing Nation Perspective, *Mitigation and Adaption Strategies for Global Change*, 2008, no. 13, p. 193–206, DOI: 10.1007/s11027-007-9086-5.
- Lomov V.A., Grechushnikova M.G., Repina I.A., Stepanenko V.M., Kazancev V.S., Artamonov A.Ju. [Emission of methane from the surface of reservoirs], *Tret'i vinogradovskie chtenija. Grani gidrologii. Sbornik докладов mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii pamjati vydajushhegosja russkogo gidrologa Jurija Borisovicha Vinogradova* [Third Vinogradov readings. Facets of hydrology. Collection of reports of the international scientific conference in memory of the outstanding Russian hydrologist Yuri Borisovich Vinogradov], O.M. Makar'eva (ed.), 2018, p. 401–405. (In Russian)
- Lorenzen C.J. Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations, *Limnology and Oceanography*, 1967, vol. 12, no. 2, p. 343–346.
- Louis V.L., Kelly C.A., Duchemin E., Rudd J.W.M., Rosenberg D.M. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate, *Bioscience*, 2000, vol. 50, no. 9, p. 766–775.
- Lozovik P.A. [Vygozero reservoir], *Krupnejshie ozeravodohranilishha Severo-zapada evropejskoj territorii Rossii: sovremennoe sostojanie i izmenenij ekosistem pri klimaticeskikh i antropogennyh vozdeystvijah* [The largest lakes-reservoirs in north-western European Russia: actual state and ecosystem changes under climatic and anthropogenic impacts], N.N. Filatov (ed.), Petrozavodsk, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences Publ., 2015, p. 227–241. (In Russian)
- Malahova T.V., Malahova L.V., Budnikov A.A., Ivanova I.N. Prostranstvenno-vremennaja izmenchivost' soderzhanija metana v Sevastopol'skoj buhte i ego jemissii v atmosferu [Spatio-temporal dynamics of methane content in the Sevastopol Bay and its emissions to the atmosphere], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 3, p. 73–80. (In Russian)
- McGinnis D.F., Greinert J., Artemov Y., Beaubien S.E., Wüest A. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? *Journal of Geophysical Research*, 2006, vol. 111, no. 9, p. C09007, DOI: 10.1029/2005JC003183.
- Ozera Karelii. Spravochnik* [Lakes of Karelia. Handbook], N.N. Filatov, V.I. Kuharev (eds.), Petrozavodsk, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences Publ., 2013, 464 p. (In Russian)
- Potahin M.S., Belkina N.A., Slukovskij Z.I., Novickij D.G., Morozova I.V. Izmenenie donnyh otlozhenij Vygozera v rezul'tate mnogofaktornogo antropogennogo vozdeystvija [Changes in bottom sediments of Vygozero as a result of multifactorial anthropogenic impact], *Obshchestvo. Sreda. Razvitie*, 2018, no. 3 (48), p. 107–117. (In Russian)
- RD 52.24.511-2013, *Massovaja dolja metana v donnyh otlozhenijah. Metodika izmerenij gazohromatograficheskimi metodami s ispol'zovanijem analiza ravnovesnogo para* [Guidance document 52.24.511-2013, Mass fraction of methane in bottom sediments. Gas chromatographic measurement technique using equilibrium vapor analysis], Rostov-on-Don, Hydrochemical Institute, 2013, 19 p. (In Russian)
- RD 52.24.512-2012, *Ob'emnaja koncentracija metana v vodah. Metodika izmerenij gazohromatograficheskimi metodami s ispol'zovanijem analiza ravnovesnogo para* [Guidance document 52.24.512-2012, Volumetric concentration of methane in waters. Gas chromatographic measurement technique using equilibrium vapor analysis], Rostov-on-Don, Hydrochemical Institute, 2012, 23 p. (In Russian)
- Salomatin A.S., Yusupov V.I., Vereshchagina O.F., Chernykh D.V. An acoustic estimate of methane concentration in a water column in regions of methane bubble release, *Acoustical Physics*, 2014, vol. 60, no. 6, p. 671–677.
- Scientific Assessment of Ozone Depletion, 1994*, World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project, 1994, no. 37.
- Scientific Assessment of Ozone Depletion, 2010*, World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project, 2010, no. 52.
- Streleckaja I.D., Lejbman M.O., Kizjakov A.I., Oblogov G.E., Vasil'ev A.A., Homutov A.V., Dvornikov Ju.A. Podzemnye l'dy i ih rol' v formirovanii voronki gazovogo vybrosa na poluostrove Jamal [Ground ice and its role in the formation of gas-emission crater in the Yamal Peninsula], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2017, no. 2, p. 91–99. (In Russian)
- Wise D.L., Houghton G. The diffusion coefficient of ten slightly soluble gases in water of 10–60°C, *Chemical Engineering Science*, 1966, vol. 21, no. 11, p. 999–1010.

Received 21.05.2021

Revised 01.03.2022

Accepted 13.05.2022

СЕЗОННЫЕ И СУТОЧНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СОДЕРЖАНИЯ И ПОТОКОВ МЕТАНА В ЭСТУАРИИ РЕКИ ЧЕРНОЙ (КРЫМ)

Т.В. Малахова¹, А.А. Будников², И.Н. Иванова³, А.И. Мурашова⁴

^{1,4} Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, отдел радиационной и химической биологии

^{2,3} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши

¹ Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: t.malakhova@imbr-ras.ru

² Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук; e-mail: aa.budnikov@physics.msu.ru

³ Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук; e-mail: ivair@yandex.ru

⁴ Вед. инженер; e-mail: alenamyra@mail.ru

Эстуарии являются важными источниками поступления метана (CH_4) в атмосферу. Оценки эмиссии этого парникового газа необходимы для определения его вклада в глобальный атмосферный бюджет. В работе рассматриваются результаты измерения временной динамики концентрации CH_4 и его эмиссии на границе вода – воздух в эстуарии реки Черной, подверженном воздействию сейшевых волн. Гидрохимические исследования в комплексе с гидрофизическими измерениями при помощи мультипараметрического зонда RCM 9 LW (Aanderaa) проводились в зимний, весенний и летний сезоны 2021 г. Показаны высокая скорость и широкий диапазон изменения концентрации CH_4 в воде эстуария реки Черной, в суточном масштабе времени, соответствовавшие динамике зарегистрированных волновых процессов. Рассчитанные периоды колебаний гидрологических параметров составили 45, 19–21, 14–17 и 9 мин. Тенденция изменения концентрации CH_4 согласовывалась с изменением солёности: пресным водам соответствовали более высокие значения CH_4 , морским – более низкие. Наиболее сильная связь получена между значениями концентрации CH_4 и температурой воды ($R = 0,61$), а также содержанием растворенного кислорода ($R = -0,61$). Рассчитанный поток CH_4 с поверхности воды в атмосферу для различных сезонов находился в диапазоне от 71 до 1680 мкмоль/м² в сут. Балансовые оценки показали, что время оборота растворенного метана в эстуарии реки Черной, рассчитанное как отношение содержания метана в 1 м³ к сумме его потоков из дна и в атмосферу, для выбранных условий не превышает одного дня. Показано, что высокая скорость и широкий диапазон изменения концентрации CH_4 в районах, подверженных волновым процессам, и закономерности таких изменений имеют высокую значимость в контексте оценки потоков метана в атмосферу.

Ключевые слова: эмиссия метана, гидрология эстуария, временные колебания концентрации CH_4 , сейшевые колебания

DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-27-39

ВВЕДЕНИЕ

Оценка эмиссии природных парниковых газов является одним из важных вопросов в контексте проблемы глобального потепления климата [Bousquet et al., 2006]. Значительная вариабельность содержания метана в прибрежных зонах и эстуариях отмечается не только в пространственном распределении, но также и во временном. В течение года концентрация метана в прибрежных мелководных районах и его потоки в атмосферу могут меняться на несколько порядков [Borges et al., 2018; Малахова и др., 2020], а районы, подверженные приливно-отливным и волновым процессам, могут характеризоваться суточными ритмами содержания метана в воде и его потоков из дна и с поверхности воды в атмосферу [Sturm et al., 2017]. В связи с этим региональные исследования динамики изменений содержания метана в различных временных масштабах и его потоков с поверхности воды имеют высокую значимость для

глобальной задачи оценки вклада морского метана в общий бюджет парниковых газов.

Исследования содержания метана в поверхностном слое воды Севастопольской бухты показали, что во все сезоны в кутовой части бухты наблюдались повышенные концентрации, которые осенью достигали 200 нмоль/л [Малахова и др., 2020]. Такое распределение типично для акваторий эстуарного типа, к которым относится Севастопольская бухта. Считается, что для мелководных районов на содержание метана в воде значительное влияние могут оказывать его потоки из донных осадков [Borges et al., 2018; Малахова и др., 2020]. Однако исследования содержания метана в донных осадках показали, что максимальные концентрации определены в центральной части бухты, тогда как в месте впадения реки значения были на несколько порядков ниже во все сезоны [Малахова и др., 2018]. Это свидетельствует о том, что высокие концентрации

метана в воде кутовой части бухты могут быть обусловлены поступлением воды реки Черной.

Весной 2020 г. в эстуарной зоне реки Черной ловушечным методом были проведены измерения концентрации метана в воде и донных осадках, а также потоков флюидной метановой разгрузки из дна на четырех станциях вдоль градиента солености [Малахова, Мурашова, 2022]. Показано, что концентрация метана в толще донных осадков и флюидные потоки на солоноватоводных станциях были на два порядка ниже по сравнению с пресноводными. Диапазон средних концентраций метана в воде на исследованных станциях весной 2020 г. изменялся от 285 для самой мористой станции до 813 нмоль/л – для пресноводной. В воде отмечен колебательный характер изменения концентраций метана, что предположительно было связано с волновыми процессами в эстуарии.

Цель работы заключалась в оценке содержания метана в воде и его потоков в атмосферу в сезонном и суточном масштабах времени в эстуарии реки Черной, подверженной воздействию волновых процессов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились в феврале, марте, апреле, июне и июле 2021 г. (табл. 1). В апреле на девяти станциях вдоль градиента солености было определено пространственное распределение CH_4 . На станции с координатами 44°35'45,94 с. ш. и 33°36'32,61 в. д., расположенной приблизительно в 1,5 км от места впадения реки в бухту, был проведен мониторинг сезонной и суточной динамики изменения концентрации и эмиссии CH_4 в комплексе с гидрологическими измерениями (рис. 1).

По химическому составу вода реки Черной относится к гидрокарбонатному классу кальциевой группы ($\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) средней (0,3–0,5 г/л), иногда повышенной (>0,5–1,0 г/л) минерализации, слабощелочному (pH 6,8–8,5) типу [Орехова и др., 2018]. Концентрации минеральных форм азота и фосфора, измеренные весной 2020 г. на исследованной станции, составили NO_2^- – 29, NO_3^- – 682, NH_4^- – 130, H_2PO_4^- – 127 мкг/л [Малахова, Мурашова, 2022].

Таблица 1

Гидрологические параметры и концентрации CH_4 в воде на исследованной станции в эстуарии реки Черной в феврале, марте, июне и июле 2021 г.

Дата	S , ‰	O_2 , мг/л	V , см/с	NTU	T , °C	Максимальный перепад уровня, м	CH_4 , нмоль/л
02.02	$\frac{8,1 \pm 1,3}{5,1-10,7}$	$\frac{8,3 \pm 0,1}{8,1-8,7}$	$\frac{15 \pm 11}{0,6-41,4}$	$\frac{98 \pm 22}{45-184}$	$\frac{9,5 \pm 0,1}{9,2-9,7}$	0,50	$\frac{414 \pm 48}{350-505}$
15.03	$\frac{9,6 \pm 2,1}{4,9-14,9}$	$\frac{13,5 \pm 1,4}{8,3-15,8}$	$\frac{5,1 \pm 3,9}{0,3-22,9}$	$\frac{7 \pm 3}{3-26}$	$\frac{8,5 \pm 0,4}{7,5-9,1}$	0,20	$\frac{440 \pm 41}{375-526}$
25.03	$\frac{8,7 \pm 1,4}{6,1-13,6}$	$\frac{10,9 \pm 0,5}{9,7-12,8}$	$\frac{8,6 \pm 5,3}{0,3-29,9}$	$\frac{14 \pm 7}{5-44}$	$\frac{7,8 \pm 0,2}{7,4-8,5}$	0,40	$\frac{672 \pm 86}{469-818}$
08.06	$\frac{12,7 \pm 1,0}{9,2-14,8}$	$\frac{4,9 \pm 0,4}{3,9-5,9}$	$\frac{8,7 \pm 5,8}{0,3-25,2}$	$\frac{27 \pm 7}{14-63}$	$\frac{21,5 \pm 0,5}{20,2-22,7}$	0,38	$\frac{1132 \pm 41}{805-1359}$
23.07	$\frac{6,5 \pm 1,5}{4,0-11,1}$	$\frac{5,3 \pm 0,4}{4,3-6,1}$	$\frac{6,4 \pm 3,9}{0,6-19,0}$	$\frac{17 \pm 7}{8-57}$	$\frac{24,2 \pm 0,5}{23,3-25,7}$	0,20	$\frac{720 \pm 33}{636-792}$

Примечание. В числителе – среднее значение $\pm$ среднеквадратическое отклонение; в знаменателе – диапазон величин.

Электропроводность воды σ , температура T , содержание растворенного кислорода O_2 , скорость течения V , мутность Tu измерялись с помощью мультипараметрического зонда RCM 9 LW (Aanderaa). Точности измерений T , σ , Tu и O_2 составляли 0,02°C, 0,02 мСм/см, 0,4 NTU (в международных единицах мутности) и 0,25 мг/л соответственно. Зонд был установлен при помощи штатива на дно реки, так что датчики находились на расстоянии около 0,5 м от дна. Время экспозиции составило от

2,5 до 4,5 часов. Периоды колебаний гидрологических параметров определялись путем анализа временных рядов данных с помощью быстрого Фурье-преобразования.

Отбор проб для последующего газохроматографического определения содержания CH_4 производился в моменты достижения минимального и максимального уровней воды в реке, после которых происходила смена направления движения водного потока. Уровень воды в реке отслеживал-

ся при помощи измерительной линейки, закрепленной на дне. Пробы отбирались в двух повторностях с поверхности воды в виаллы объемом 25 мл с добавлением ингибирующего реагента (КОН) согласно методу фазово-равновесной дегазации [Большаков, 1987]. Содержание CH_4 измерялось газохроматографически в ЦКП «Спектрометрия и Хроматография» ФИЦ ИнБЮМ на газовом хроматографе Хроматэк Кристалл 5000.2 с пламенно-ионизационным детектором и набивной колонкой. Параметры хроматографической системы были следующими: температура испарителя – 120°C , температура колонки – 50°C , тем-

пература детектора – 200°C , газ-носитель – азот. Ошибка определения содержания метана не превышала 7%.

Расчет эмиссии метана из воды в атмосферу F проводился по методике [Wanninkhof, 2014] согласно уравнению:

$$F = k(C_{\text{CH}_4} - C_{\text{eq}}), \quad (1)$$

где k – коэффициент скорости обмена; – наблюдаемые концентрации растворенного метана в поверхностном слое воды; C_{eq} – равновесная концентрация CH_4 в поверхностном слое морской воды с атмосферным воздухом.

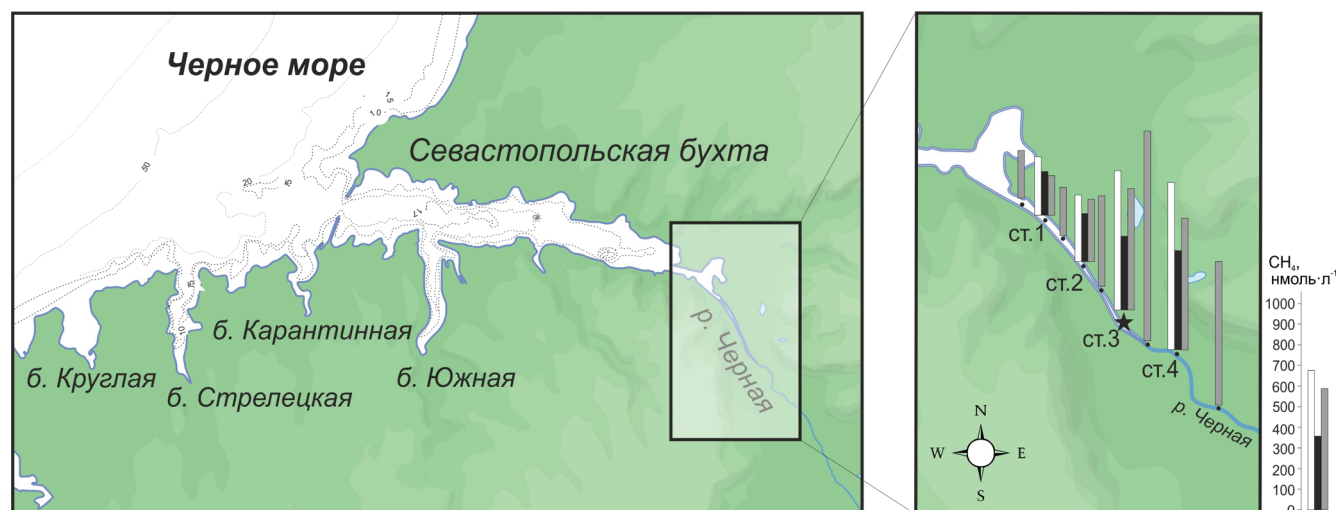


Рис. 1. Карта-схема района работ в эстуарии реки Черной. На врезке столбцами отмечены концентрации CH_4 на станциях (точки) вдоль градиента солености в эстуарии: в мае 2020 г. (белые столбцы), в феврале 2021 г. (черные столбцы) и апреле 2021 г. (серые столбцы). Звездой обозначена станция, на которой проводился мониторинг суточной динамики гидрологических параметров

Fig. 1. Schematic map of the study area in the estuary of the Chernaya River. In the inset, columns indicate CH_4 concentrations at stations (points) along the salinity gradient in the estuary: in May 2020 (white columns), February 2021 (black columns), and April 2021 (gray columns). The star denotes the station at which the daily dynamics of hydrological parameters was monitored

Коэффициент скорости обмена k зависит от скорости ветра, приземной температуры и солености воды и рассчитывался по уравнению:

$$k = 0,31u^2\sqrt{660/S_c}, \quad (2)$$

где u – скорость ветра (м/с), S_c – число Шмидта, рассчитанное как

$$S_c = 2039,2 - 120,31T + 3,4209T^2 - 0,40437T^3, \quad (3)$$

где T – *in situ* температура воды на поверхности (К).

Время оборота метана в воде эстуария рассчитывалось как отношение содержания метана в 1 м^3 к сумме его потоков из дна $F_{\text{sed}_{\text{CH}_4}}$ и в атмосферу $F_{\text{air}_{\text{CH}_4}}$:

$$T = \frac{V_{\text{CH}_4}}{F_{\text{sed}_{\text{CH}_4}} - F_{\text{air}_{\text{CH}_4}}}. \quad (4)$$

Для расчетов были взяты потоки флюидной метановой разгрузки из донных осадков $F_{\text{sed}_{\text{CH}_4}}$, которые были получены ловушечным методом для ст. 3 весной 2020 г. (методика и полученные результаты подробно описаны в статье [Малахова, Мурашова, 2022]).

Флюидные потоки рассчитывали, как отношение объема поступившего в ловушку газа за время экспозиции ловушки по формуле:

$$F_{\text{sed}_{\text{CH}_4}} = \frac{V_{\text{CH}_4}}{ST}, \quad (5)$$

где $Fsed_{CH_4}$ – поток флюидной разгрузки CH_4 (ммоль/м² · сут); V_{CH_4} – объем CH_4 (ммоль); S – площадь сечения ловушки ($1,3 \cdot 10^{-3}$ м²); T – время экспозиции (0,21 сут).

Объем газа рассчитывался по формуле:

$$V_{CH_4} = (C_{2CH_4} - C_{1CH_4}) V_{inst}, \quad (6)$$

где C_{2CH_4} – концентрация CH_4 в конечный момент (моль/л); C_{1CH_4} – концентрация CH_4 в начальный момент (моль/л); V_{inst} – объем ловушки (1 л).

Для определения суммы скоростей процессов продукции и окисления метана был поставлен инкубационный эксперимент. Пробы отбирались в двух повторностях аналогично отбору для определения концентрации метана в воде без добавления ингибирующего реагента (КОН) и хранились в лаборатории при температуре, максимально близкой к температуре воды во время их отбора. Концентрация метана в пробе определялась с шагом 2–5 дней, время экспозиции составило от 10 до 12 дней. Скорость роста/уменьшения концентрации метана в пробе рассчитывалась как разница между концентрацией в первый и последний день экспозиции.

Различия между соответствующими гидрологическими параметрами и концентрациями CH_4 , полученными в ходе серии экспедиций, были оценены статистически. Для этого данные были проверены на нормальность распределения и затем проведен анализ вариации (ANOVA). Для оценки влияния измеренных физико-химических факторов на концентрацию CH_4 был проведен корреляционный анализ с помощью программного обеспечения Statistica.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В апреле 2021 г. было исследовано пространственное распределение CH_4 на девяти станциях в эстуарии реки Черной вдоль градиента солености от солоноватоводного района в месте впадения реки в бухту до пресноводного на расстоянии около 1,5 км от места впадения (см. рис. 1). Как и для данных, полученных в мае 2020 г., показано увеличение концентрации метана в воде в направлении от устья к истоку реки с концентрационным максимумом в точке между станциями 3 и 4 [Малахова, Мурашова, 2022]. В апреле 2021 г. концентрация CH_4 в воде на наиболее мористой станции составила 232 нмоль/л, тогда как максимальная концентрация CH_4 была равна 1019 нмоль/л (см. рис. 1). В зонах эстуарного типа, к которым можно отнести и экосистему устьевой части реки Черной, биогеохимические процессы трансформации веществ и формиро-

вание определенного гидрохимического режима локализуются в активных зонах, получивших название геохимических барьерных зон. Как показано в работе [Орехова и др., 2018], предполагаемая граница зоны биогеохимического барьера реки Черной находится на расстоянии 1,2 км от места впадения в бухту вверх по течению. Концентрационный максимум, обнаруженный в апреле 2021 г. в районе станции 3, может быть связан с попаданием станции в область биогеохимического барьера реки Черной, отложением большей части взвешенного материала и интенсивными процессами его биодеградации.

Временная динамика гидрологических параметров и CH_4 . Для мониторинговых исследований временной динамики гидрологических параметров из четырех выполненных в 2020 г. станций, расположенных в эстуарии реки Черной, была выбрана станция 3, где во время тестовых зондирований наблюдался максимальный диапазон измеренных гидрологических значений. Изменение параметров (S , O_2 , NTU и концентрации CH_4) на этой станции в различные сезоны 2021 г. представлено на рис. 2, диапазоны измеренных значений – в табл. 1.

Наибольшие амплитуды колебаний солености S (9,5–10‰) были зарегистрированы 15 марта, наименьшие (5,6‰) – 2 февраля и 8 июня (см. табл. 1). Содержание растворенного кислорода O_2 больше всего изменялось 15 марта (7,5 мг/л), меньше всего – 2 февраля. Максимальное среднее значение содержания O_2 было получено 15 марта, минимальное – 8 июня. Наиболее значительные изменения скорости течения наблюдались в феврале, ее среднее значение в это время составило 15 ± 11 см/с (при разбросе 0,6–41,4 см/с). Из особенностей изменения концентрации примесей следует отметить, что самые малые значения NTU были получены 15 марта, когда наблюдалось наибольшее значение содержания O_2 . Изменения температуры в целом соответствуют дневным и сезонным особенностям.

Также наблюдались моменты остановки и дальнейшей смены направления поверхностного течения реки Черной.

Диапазон средних значений концентрации CH_4 в воде за весь период наблюдений находился в пределах от 414 до 1132 нмоль/л в феврале и июне соответственно (см. табл. 1). Наибольший размах концентрации CH_4 в течение одной выполненной станции получен в июле. Установлен рост средних значений концентрации CH_4 , а также смещение диапазонов в сторону больших величин с февраля по июнь и их значительное снижение в июле (см. рис. 2).

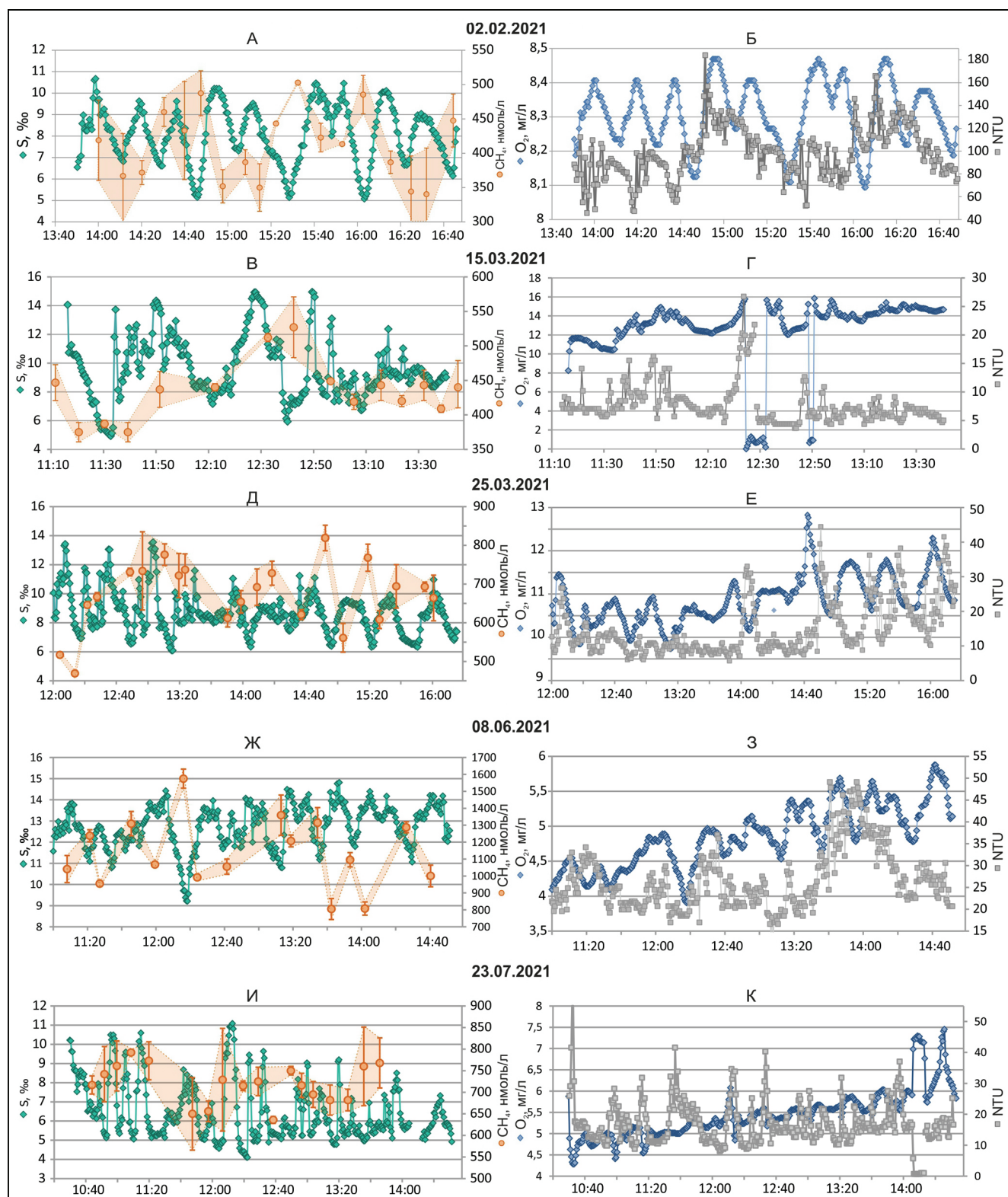


Рис. 2. Изменение солёности S , концентрации CH_4 , концентрации кислорода O_2 и мутности NTU в воде эстуария реки Черной 2 февраля (А; Б), 15 марта (В; Г) и 25 марта (Д; Е) 2021 г.
Засечками показано стандартное отклонение значений концентрации CH_4

Fig. 2. Changes in salinity S , concentration of CH_4 , concentration of dissolved oxygen O_2 and turbidity NTU in the estuary of the Chernaya River on February 2 (A; Б), on March 15 (B; Г), on March 25 (Д; Е), 2021.
The standard deviation of the CH_4 concentration values is shown by ticks

Поток метана с поверхности воды в атмосферу был рассчитан для соответствующей температуры воды, солености и скорости ветра. Насыщение метаном поверхностного слоя воды на исследованной станции достигало $21 \cdot 10^3\%$, а рассчитанные средние значения эмиссии в атмосферу за весь период наблюдений лежали в диапазоне от 71 до

1680 $\text{мкмоль}/\text{м}^2 \cdot \text{сут.}$ 15 марта и 08 июня скорость ветра составляла 2 и 1 м/с соответственно (рис. 4), поэтому рассчитанные потоки были незначительными, несмотря на высокие значения концентрации 8 июня. Диапазоны изменчивости концентрации CH_4 в воде и его эмиссии в атмосферу в эстуарии реки Черной для различных сезонов в 2021 г. показаны на рис. 3.

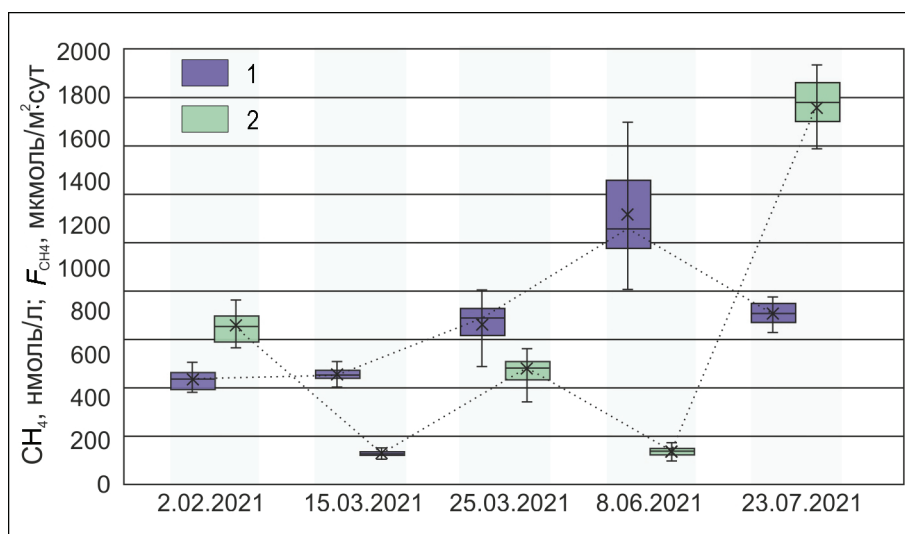


Рис. 3. Диапазоны изменчивости концентрации CH_4 в воде (1) и его эмиссии в атмосферу (2) в эстуарии реки Черной для различных сезонов в 2021 г.

Fig. 3. Ranges of CH_4 concentration variability in water (1) and its emissions into the atmosphere (2) in the estuary of the Chernaya River for different seasons in 2021

Волновые процессы в эстуарии. В результате проведенных измерений весной и летом 2021 г. были получены длительные записи изменения гидрологических параметров воды в реке Черной и отслежены изменения уровня воды. В целом временная динамика изменений гидрологических параметров T , S , O_2 и концентрации примесей NTU в воде исследованной станции хорошо описывается гармонической функцией. Проведенный анализ временных рядов данных с помощью быстрого Фурье-преобразования позволил выделить колебания с различными периодами. Наиболее часто за время измерений в феврале, марте, июне и июле для гидрологических параметров встречаются периоды колебаний 45, 19–21, 14–17 и 9 мин, для колебаний уровня воды чаще всего повторялись периоды 40 и 20 мин.

На рис. 4 представлены диаграммы изменения скорости и направления течения в эстуарии реки Черной для всех измерений, а также скорости и направления ветра. Периодичность колебаний скорости течения была наиболее сильно выражена 2 февраля и 25 марта. Хорошо прослеживалось течение вверх по реке и обратно в сторону моря. Смена направления течения соответствовала минимальным и максимальным значениям колебаний уровня

воды. Влияние ветра на периодичность колебаний не было отмечено, поэтому в данном случае можно не рассматривать сгонно-нагонный механизм возбуждения волновых процессов.

Выделенные периоды колебаний гидрологических параметров воды хорошо совпадают с расчетными периодами баротропных сейш 48; 22; 16; 10; 6 мин для модельных бассейнов, имеющих характерные размеры Севастопольской бухты, которые приводятся в [Манилюк и др., 2020]. Достаточно часто при колебаниях уровня встречался период 30–32 мин, а для параметров воды более длительные периоды колебаний – 54 мин и 1,2 часа (вероятно, относятся к сейшевым колебаниям всего Черного моря в целом) [Манилюк, 2018].

Некоторое расхождение с результатами в приведенных работах вероятнее всего связано с тем, что измерения проводились в устьевой части реки Черной, а не в самой бухте. Ранее в литературе авторам не встречалось описание сейшевых колебаний в самой реке выше по течению от места ее впадения в Севастопольскую бухту и в зоне биогеохимического барьера, хотя наблюдаемые колебания уровня в этой области достаточно существенны по сравнению с глубиной и составили 1,5–50 см. Максимальные колебания уровня 40–50 см были получены 2 февраля 2021 г. Следует

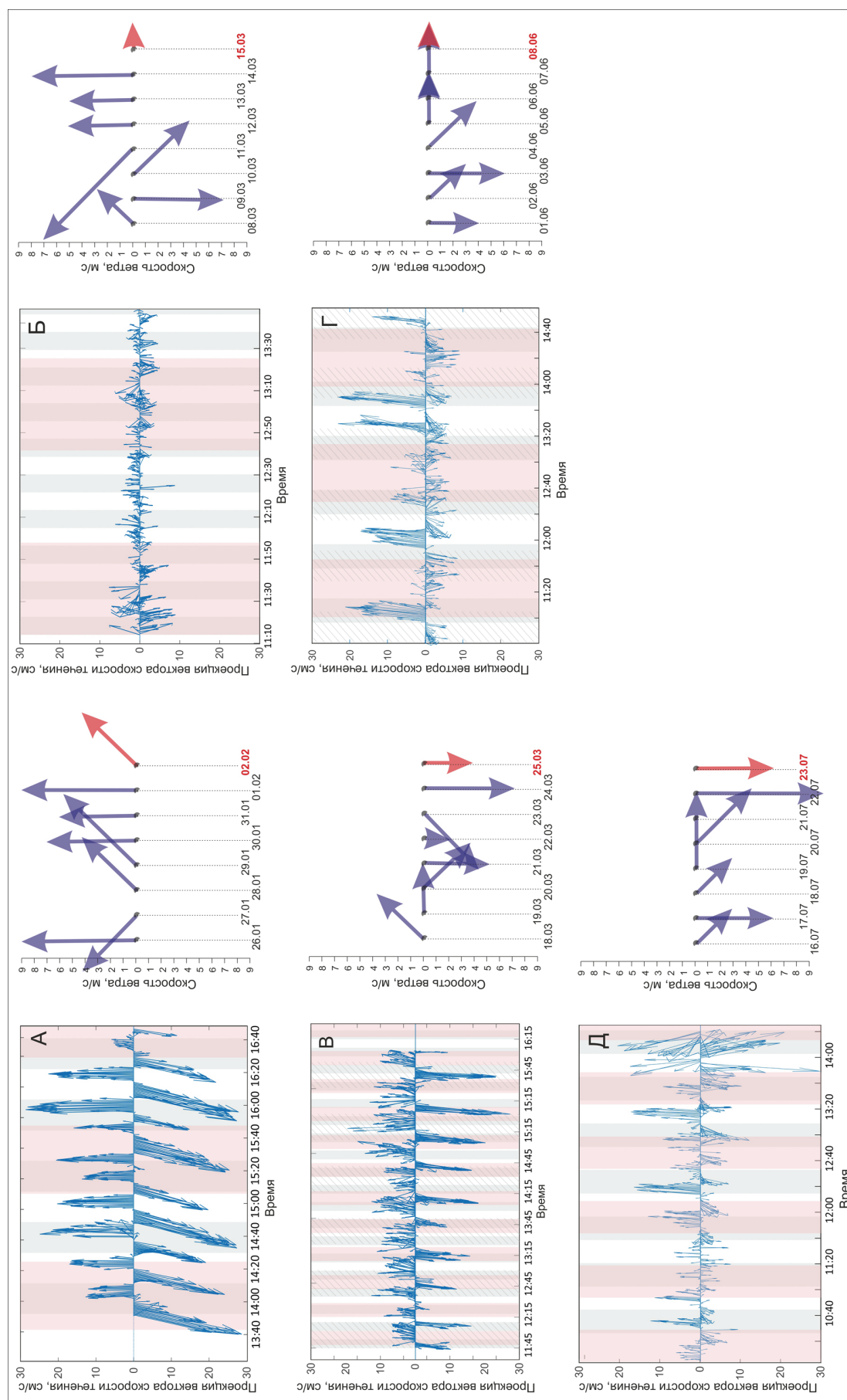


Рис. 4. Диаграммы изменения скорости и направления течения, а также скорости ветра в эстуарии реки Черной в 2021 г.: 2 февраля (А), 15 марта (Б); 25 марта (В); 8 июня (Г) и 23 июля (Д). Длина вектора соответствует модулю горизонтальной составляющей скорости течения, угол относительно оси X показывает направление течения.

Тонированные области соответствуют периодам колебаний, рассчитанным с помощью быстрого Фурье-преобразования по результатам измерения скорости течения

Fig. 4. Diagrams of the current speed and direction changes in the estuary of the Chernaya River in 2021: February 2 (A), March 15 (B), March 25 (B), June 8 (G), July 23 (D). The vector length corresponds to the modulus of the horizontal component of the current speed; the angle relative to the X axis indicates the direction of the current. The shaded areas correspond to the periods of oscillation calculated using the FFT based on the current speed measurements

отметить, что если сейшсы с периодом 50 мин и амплитудой 3–4 см в центральной части Севастопольской бухты наблюдаются достаточно часто [Горячкин и др., 2002], то натурные данные о низкочастотных колебаниях и значительных амплитудах колебаний уровня (40–50 см) вблизи вершинной части Севастопольской бухты практически отсутствуют.

При средней глубине реки 2 м колебания уровня амплитудой 50 см являются значимыми в отношении поступления метана из дна в воду. Как было показано, уменьшение гидростатического давления может приводить к интенсификации потоков растворенных газов и провоцированию пузырьковой разгрузки. Во время мониторинга на станции 3 не было зарегистрировано пузырьковых газовыделений, однако их наличие не исключено на верхних по течению реки станциях в летний сезон.

Влияние волновых процессов в эстуарии на содержание CH_4 в воде. Концентрация растворенного CH_4 , так же как и гидрологические параметры в воде эстуария, изменялась волнообразно (см.

рис. 2). Частота отбора проб воды для определения концентрации CH_4 соответствовала изменению уровня воды в реке. Однако, как показали данные мультипараметрического зонда, период колебаний уровня воды не всегда совпадал с периодом изменения солёности. На рис. 2 видно, что тенденция изменения концентрации CH_4 согласовывалась с изменением солёности: пресным водам соответствовали более высокие значения CH_4 , морским – более низкие. Коэффициенты детерминации между концентрацией CH_4 и солёностью воды, а также другими гидрологическими параметрами для всего периода исследований представлены в табл. 2. Наиболее сильная связь получена между значениями концентрации CH_4 , температурой воды и содержанием растворенного кислорода: для температуры и CH_4 эта связь положительная ($R = 0,61$), для кислорода и CH_4 – отрицательная ($R = -0,61$). Между содержанием растворенного кислорода и температурой воды закономерно получена обратная зависимость ($R = -0,86$; см. табл. 2).

Таблица 2

Корреляционная матрица концентрации метана в воде (C_{CH_4}) и гидрологических параметров за весь период наблюдений ($n = 87$)

	C_{CH_4} в воде, нмоль/л	O_2 , мг/л	Мутность, NTU	V , см/с	T , °C	S , ‰
C_{CH_4} в воде, нмоль/л	–					
O_2 , мг/л	–0,61	–				
Мутность, NTU	–0,35	–0,13	–			
V , см/с	–0,29	0,04	0,51	–		
T , °C	0,61	–0,86	–0,22	–0,30	–	
S , ‰	0,40	–0,05	–0,02	–0,03	0,00	–

Диапазон значений эмиссии метана в атмосферу за весь исследованный период составил 71–1680 мкмоль/ $\text{м}^2 \cdot \text{сут}$. Эти значения попадают в интервал от 3 до 68 955 мкмоль/ $\text{м}^2 \cdot \text{сут}$, который был продемонстрирован в обзорной работе по различным водным объектам, в том числе и эстуарным районам [Ortiz-Llorente, Alvarez-Cobelas, 2012]. Значения потоков в нашей работе получены расчетным методом с учетом величины концентрации CH_4 в поверхностном слое воды, солёности, температуры воды и скорости ветра (см. раздел «Материалы и методы исследования»). Как показано в работе [Wanninkhof, 2014], основным фактором, влияющим на величину потока, является скорость ветра. Очевидно, что изменения в скорости течения воды также являются важным фактором, определяющим эмиссию метана. В работе [Sturm et al., 2017] показано, что измеренный при помощи ловушек поток метана был наименьшим после

высоких приливов, когда скорость течения в этой системе была наименьшей, тогда как в середине прилива и непосредственно перед отливом, когда скорость течения была наивысшей, потоки CH_4 были самыми высокими. Доминирующей причиной турбулентности на поверхности воды в эстуарных районах является ее течение, сравнительно меньший вклад вносит турбулентность, создаваемая ветром [Borges et al., 2018; Beaulieu et al., 2014]. Сумма этих двух процессов определяет коэффициент переноса газа и, как следствие, величину потока на границе раздела вода – воздух. Это следует учитывать в дальнейших исследованиях при оценке потоков парниковых газов в атмосферу в районах, подверженных приливо-отливным или интенсивным волновым эффектам, так как истинный поток с учетом скорости течения в русле может оказаться значительно выше расчетных величин.

Баланс CH_4 в эстуарии. Концентрация CH_4 в воде зависит от суммы процессов его поступления и оттока. В мелководных распресненных водоемах приток метана в воду происходит преимущественно за счет диффузии из донных осадков, также продукция метана может происходить непосредственно в толще воды. Отток обусловлен процессами микробного потребления и эмиссии метана в атмосферу с поверхности воды. Как правило, скорости микробных процессов образования и окисления метана значительно ниже скоростей диффузии из дна и эмиссии в атмосферу. Это было подтверждено серией инкубационных экспериментов, поставленных с пробами воды, отобранными 21 апреля и 8 июня. Результаты продемонстрировали различную динамику изменения концентраций CH_4 в течение инкубационного периода (рис. 5). В апреле для всех

без исключения отобранных проб в течение девяти дней экспозиции концентрации снизились относительно изначальных. Это свидетельствует о том, что в комплексе микробных процессов метанового цикла, протекающих в воде в этот период, преобладали процессы его окисления. Тогда как в июне, напротив, в трех пробах из четырех отобранных концентрации CH_4 за время экспозиции выросли и только в одной снизились (см. рис. 5). Увеличение концентрации CH_4 в пробах указывает на то, что скорость продукции метана превышала скорости его потребления. Максимальная скорость снижения концентрации составила $36 \text{ нмоль/л} \cdot \text{сут}$ (21 апреля, время 11:25), а максимальный рост – $15 \text{ нмоль/л} \cdot \text{сут}$ (8 июня, время 14:27), что на три и более порядка ниже по сравнению со скоростями диффузии из дна и эмиссии в атмосферу.

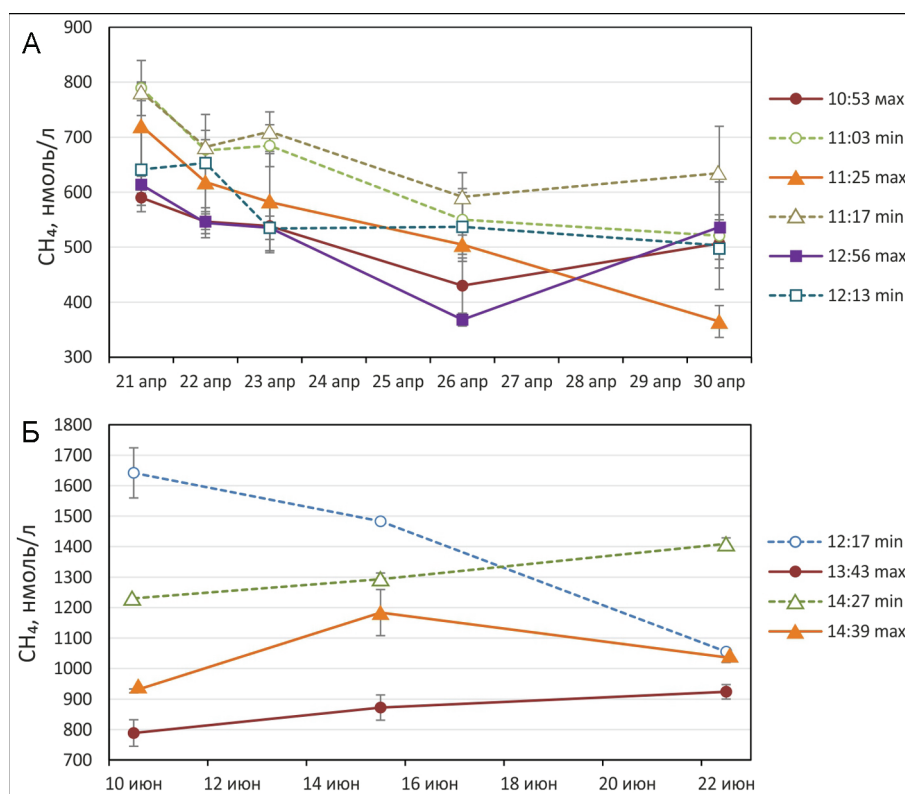


Рис. 5. Изменение концентрации CH_4 в воде в течение инкубационных экспериментов: А – шесть образцов, отобранных 21 апреля, время экспозиции – 10 дней; Б – четыре образца, отобранные 8 июня, время экспозиции – 12 дней

Fig. 5. Changes in the concentration of CH_4 in water during incubation experiments: А – six samples taken on April 21, exposure time 10 days; Б – four samples taken on June 8, exposure time 12 days

На рис. 6 изображена диаграмма различных состояний системы, которые зависят от двух динамических параметров: притока метана из дна и оттока в процессе эмиссии в атмосферу. Для графического представления были рассчитаны потоки метана в атмосферу для различных скоростей ветра при концентрации CH_4 в воде 672 нмоль/л ,

равной среднему значению для 25 марта 2021 г. Поток из дна был принят равным $4 \text{ ммоль/м}^2 \cdot \text{сут}$, полученный для станции 3 в мае 2020 г. [Малахова, Мурашова, 2022].

Положительная область диаграммы иллюстрирует условия, при которых вода в эстуарии реки Черной при заданных параметрах будет пополняться

метаном, отрицательная – обедняться. Из диаграммы видно, что потоки компенсируют друг друга при скорости ветра около 10 м/с (см. рис. 6). Показано, что время оборота растворенного метана в эстуа-

рии реки Черной, рассчитанное как отношение содержания метана в 1 м³ к сумме его потоков из дна и в атмосферу, для выбранных условий не превышает одних суток (см. рис. 6).

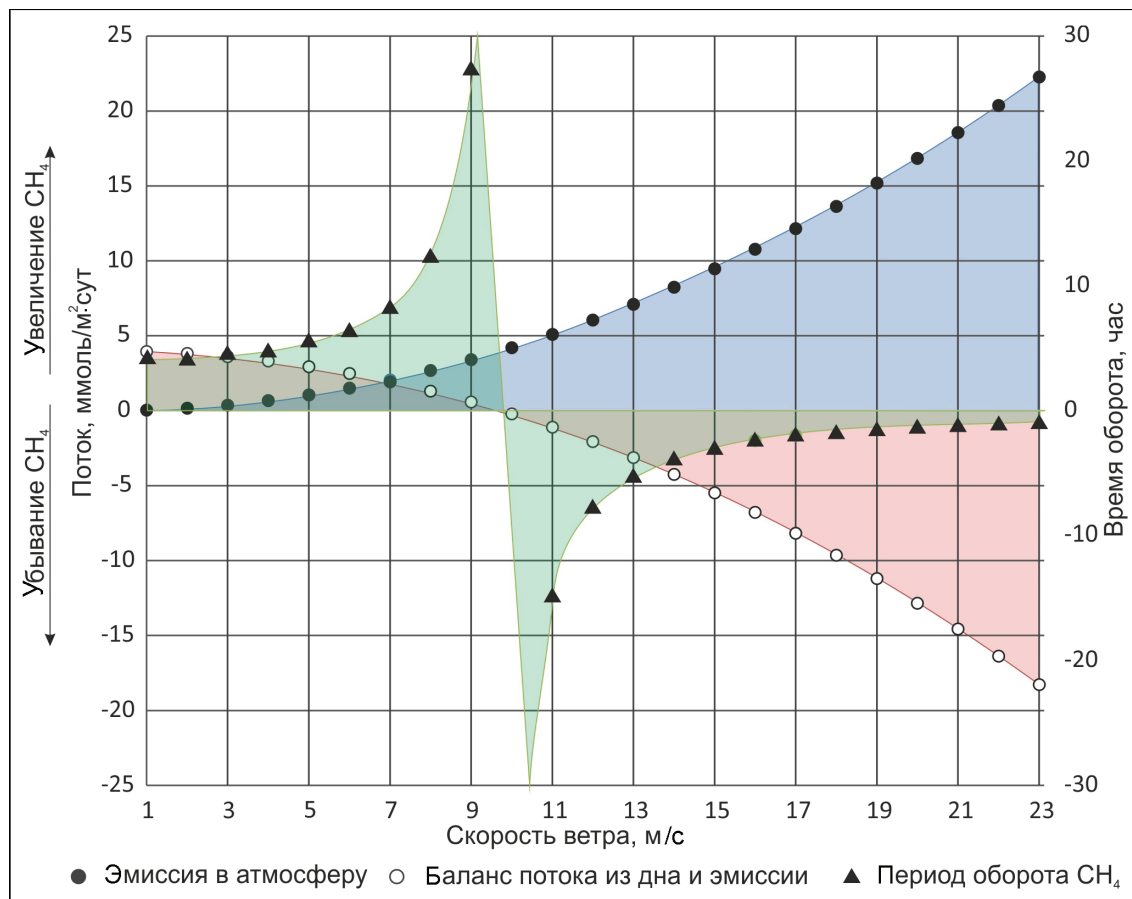


Рис. 6. Диаграмма балансовой оценки потоков метана и времени оборота метана в воде в результате оттока или притока в эстуарии реки Черной в зависимости от скорости ветра

Fig. 6. Diagram of the balance estimate of methane fluxes and the time of methane turnover in water as a result of outflow or inflow in the estuary of the Chernaya River depending on the wind speed

ВЫВОДЫ

Результаты многочасовых измерений концентрации метана и гидрологических параметров воды (соленость S , температура T , содержание растворенного кислорода O_2 , скорость течения V , мутность Tu) в зоне смешения речных и морских вод в различные сезоны 2021 г. показали значительный размах средних значений параметров как за исследованный период, так и в течение отдельных серий измерений. Диапазоны средних значений составили: для концентрации CH_4 в воде 411–1132 нмоль/л, солёности 6,5–12,7‰, растворенного кислорода 4,9–10,9 мг/л; мутности 7–98 NTU, скорости течения 5,1–15,2 см/с. Проведенный анализ временных рядов гидрологических данных с помощью быстрого Фурье-преобразования позволил выделить колебания с различными периодами, среди которых наи-

более часто встречались 45, 19–21, 14–17 и 9 мин. Колебания уровня воды соответствовали периодам около 40 и 20 мин.

Пространственное распределение метана на исследованных станциях имело типичный эстуарный характер и согласовывалось с изменением солёности воды: солоноватоводным станциям соответствовали более высокие значения CH_4 , морским – более низкие. Суточная динамика изменения концентрации растворенного в воде CH_4 , как и гидрологических параметров, имела колебательный характер. Наиболее тесная связь получена между значениями концентрации CH_4 и температурой воды ($R = 0,61$), а также содержанием растворенного кислорода ($R = -0,61$).

Рассчитанный поток CH_4 с поверхности воды в атмосферу для различных сезонов находился в диа-

пазоне от 71 до 1680 мкмоль/м² · сут. Балансовые оценки показали, что время оборота растворенного метана в эстуарии реки Черной, рассчитанное как отношение содержания метана в 1 м³ к сумме его потоков из дна и в атмосферу, для выбранных условий не превышает одних суток.

Показано, что высокая скорость и широкий диапазон изменения концентрации CH₄ в районах, подверженных волновым процессам, и за-

кономерности таких изменений имеют высокую значимость в контексте оценки потоков метана в атмосферу. Полученные авторами результаты показывают, что для проведения работ по изучению эмиссии метана в атмосферу в таких высоко динамичных районах, как эстуарии рек, необходим подход, учитывающий пространственные и временные вариаций его концентрации и потоков.

Благодарность. Работа выполнена по теме государственного задания «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем», регистрационный номер 1210315005150-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большаков А.М., Егоров А.В. Об использовании методики фазово-равновесной дегазации при газометрических исследованиях // *Океанология*. 1987. Т. 27. № 5. С. 861–862.
- Горячкин Ю.Н., Иванов В.А., Репетин Л.А., Хмара Т.В. Сейши в Севастопольской бухте // *Труды Украинского гидрометеорологического института*. Вып. 250. 2002. С. 342–353.
- Малахова Т.В., Мурашова А.И. Флюидная эмиссия метана из донных отложений эстуария реки Черной (Севастопольский регион, Крым) // *Геохимия*. 2022. Т. 67. № 9. С. 872–880.
- Малахова Т.В., Малахова Л.В., Будников А.А., Иванова И.Н. Пространственно-временная изменчивость содержания метана в Севастопольской бухте и его эмиссии в атмосферу // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2020. № 3. С. 73–80.
- Малахова Т.В., Канапакский Т.А., Сидоров И.Г., Русанов И.И., Малахова Л.В., Прокурнин В.Ю., Пименов Н.В. Сезонная динамика микробных процессов в донных осадках Севастопольской морской акватории // *Океанология*. 2018. Т. 58. № 4 (Приложение). С. S21–S29. DOI: 10.1134/S0030157418070031.
- Манилюк Ю.В., Лазоренко Д.И., Фомин В.В. Исследование сейшевых колебаний в смежных бухтах на примере Севастопольской и Карантинной бухт // *Морской гидрофизический журнал*. Т. 36. № 3. 2020. С. 261–276. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-3-261-276.
- Манилюк Ю.В. Сейши и тягун в Севастопольской бухте // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2018. № 3. С. 4–12. DOI: 10.22449/2413-5577-2018-3-4-12.
- Орехова Н.А., Медведев Е.В., Овсяный Е.И. Влияние вод реки Черной на гидрохимический режим Севастопольской бухты (Черное море) // *Экологическая без-*
- опасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2018. № 3. С. 84–91. DOI: 10.22449/2413-5577-2018-3-84-91.
- Beaulieu J.J., Smolenski R.L., Christopher T.N., Townsend-Small A., Elovitz M.S. High methane emissions from a midlatitude reservoir draining an agricultural watershed, *Environ. Sci. Technol.*, 2014, vol. 48, iss. 19, p. 11100–11108, DOI: 10.1021/es501871g.
- Borges A.V., Speekaert G., Champenois W., Scranton M.I., Gypens N. Productivity and temperature as drivers of seasonal and spatial variations of dissolved methane in the Southern Bight of the North Sea, *Ecosystems*, 2018, vol. 21, iss. 4, p. 583–599, DOI: 10.1007/s10021-017-0171-7.
- Bousquet P., Ciais P., Miller J.B., Dlugokencky E.J., Hauglustaine D.A., Prigent C., Werf van der G.R., Peylin P., Brunke E.G., Carouge C., Langenfelds R.L., Lathière J., Papa F., Ramonet M., Schmidt M., Steele L.P., Tyler S.C., White J. Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability, *Nature*, 2006, vol. 443, p. 439–443, DOI: 10.1038/nature05132.
- Ortiz-Llorente M.J., Alvarez-Cobelas M. Comparison of biogenic methane emissions from unmanaged estuaries, lakes, oceans, rivers and wetlands, *Atmospheric Environment*, 2012, vol. 59, p. 328–337, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.05.031.
- Sturm K., Werner U., Grinham A., Yuan Z. Tidal variability in methane and nitrous oxide emissions along a subtropical estuarine gradient, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, vol. 192, p. 159–169, DOI: 10.1016/j.ECSS.2017.04.027.
- Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited, *Limnology Oceanography: Methods*, 2014, vol. 12, iss. 6, p. 351–362, DOI: 10.4319/lom.2014.12.351.

Поступила в редакцию 07.12.2021

После доработки 05.04.2022

Принята к публикации 13.05.2022

SEASONAL AND DAILY PATTERNS OF METHANE CONTENT AND EMISSION IN THE ESTUARY OF THE CHERNAYA RIVER (CRIMEA)

T.V. Malakhova¹, A.A. Budnikov², I.N. Ivanova³, A.I. Murashova⁴

^{1,4} A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Department of Radiation and Chemical Biology

^{2,3} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Chair of Physics of Sea and Inland Water

¹ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: t.malakhova@imbr-ras.ru

² Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Physics and Mathematics; e-mail: aa.budnikov@physics.msu.ru

³ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Physics and Mathematics; e-mail: ivair@yandex.ru

⁴ Leading Engineer; e-mail: alenamyra@mail.ru

Estuaries are important sources of methane (CH₄) to the atmosphere. Estimates of the emission of this greenhouse gas are necessary to determine its contribution to the global atmospheric budget. The paper discusses the results of measuring the temporal dynamics of CH₄ concentration and its emission at the atmosphere-water boundary in the Chernaya River estuary, influenced by the seiche waves. The hydrochemical studies together with hydrophysical measurements were carried out in 2021 winter, spring and summer seasons using the RCM 9 LW (Aanderaa) multi-parameter sound. High rates and a wide range of daily-measured CH₄ concentration changes in water of the Chernaya River estuary was shown which correspond to the dynamics of recorded wave processes. The calculated periods of hydrological parameters oscillation were 45, 19–21, 14–17 and 9 min. The trend of CH₄ concentration variations was consistent with salinity changes: higher CH₄ values correspond to fresh waters, and lower values to seawaters. The highest correlation was between the values of CH₄ concentration and water temperature ($R = 0,61$), and the content of dissolved oxygen ($R = -0,61$). The calculated CH₄ flux from water surface to the atmosphere for different seasons was in the range from 71 to 1680 μmol/m²·day. Balance estimates showed that the turnover time of dissolved methane in the estuary of the Chernaya River, i. e. the ratio of methane content in 1 m³ to the sum of its fluxes from the bottom and into the atmosphere, did not exceed one day for the selected conditions. It was shown that high rates and a wide range of changes in CH₄ concentration in areas subject to wave processes, as well as the patterns of such changes, are of high importance in the context of assessing methane fluxes into the atmosphere.

Keywords: methane emission, estuary hydrology, temporal dynamics of CH₄ concentration, seiche oscillations

Acknowledgement. The study was carried out under the state task theme “Molismological and biogeochemical bases of the homeostasis of marine ecosystems” (reg. no. 1210315005150-8).

REFERENCES

- Beaulieu J.J., Smolenski R.L., Christopher T.N., Townsend-Small A., Elovitz M.S. High methane emissions from a midlatitude reservoir draining an agricultural watershed, *Environ. Sci. Technol.*, 2014, vol. 48, iss. 19, p. 11100–11108, DOI: 10.1021/es501871g.
- Bol'shakov A.M., Egorov A.V. Ob ispolzovanii metodiki fazovo-ravnovesnoj degazatsii pri gazometricheskikh issledovaniyakh [Using of phase-equilibrium degassing in gasometric studies], *Okeanologiya*, 1987, vol. 27, no. 5, p. 861–862. (In Russian)
- Borges A.V., Speeckaert G., Champenois W., Scranton M.I., Gypens N. Productivity and temperature as drivers of seasonal and spatial variations of dissolved methane in the Southern Bight of the North Sea, *Ecosystems*, 2018, vol. 21, iss. 4, p. 583–599, DOI:10.1007/s10021-017-0171-7.
- Bousquet P., Ciais P., Miller J.B., Dlugokencky E.J., Hauglustaine D.A., Prigent C., Werf van der G.R., Peylin P., Brunke E.G., Carouge C., Langenfelds R.L., Lathière J., Papa F., Ramonet M., Schmidt M., Steele L.P., Tyler S.C., White J. Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability, *Nature*, 2006, vol. 443, p. 439–443, DOI:10.1038/nature05132.
- Goryachkin Yu.N., Ivanov V.A., Repetin L.A., Khmara T.V. Seishi v Sevastopol'skoi bukhte [Seishes in the Sevastopol Bay], *Trudy Ukrainskogo gidrometeorologicheskogo in-ta*, vyp. 250, 2002, p. 198. (In Russian)
- Malakhova T.V., Kanapatskiy T.A., Sidorov I.G., Rusanov I.I., Malakhova L.V., Proskurnin V.Yu., Pimenov N.V. Seasonal Dynamics of Microbial Processes in Bottom Sediments of the Sevastopol Coastal Area // *Oceanology*, 2018, vol. 58, iss. 6, p. 909–917. DOI: 10.1134/S0001437018070032.
- Malakhova T.V., Malakhova L.V., Budnikov A.A., Ivanova I.N. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' soderzhaniya metana v Sevastopol'skoi bukhte i ego emissii v atmosferu [Spatio-temporal dynamics of methane content in the Sevastopol Bay and its emission to the atmosphere], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 3, p. 73–80, URL: <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/article/view/674>. (In Russian)
- Malakhova T.V., Murashova A.I. Flyuidnaya emissiya metana iz donnykh otlozhenii estuariya reki Chernoi (Sevastopol'skii region, Krym) [Fluid emission of methane from bottom sediments of the Chernaya River estuary (Sevastopol region, Crimea)], *Geokhimiya*, 2022, vol. 67, no. 9, p. 872–880. (In Russian)
- Manilyuk Yu.V. Seishi i tyagun v Sevastopol'skoi bukhte [Seiches and Harbor Oscillations in the Sevastopol Bay], *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*,

- 2018, no. 3, p. 4–12, DOI: 10.22449/2413-5577-2018-3-4-12. (In Russian)
- Manilyuk Yu.V., Lazorenko D.I., Fomin V.V. Investigation of Seiche Oscillations in the Adjacent Bays by the Example of the Sevastopol and the Quarantine Bays, *Physical Oceanography*, 2020, vol. 36, iss. 3, p. 242–256, DOI:10.22449/1573-160X-2020-3-242-256.
- Orehova N.A., Medvedev E.V., Ovsyanyi E.I. Vliyanie vod reki Chernoi na gidrokhimicheskii rezhim Sevastopol'skoi bukhty (Chernoe more) [Influence of the Chernaya River water on the hydrochemical regime of the Sevastopol Bay (the Black Sea)], *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, 2018, no. 3, p. 84–91, DOI: 10.22449/2413-5577-2018-3-84-91. (In Russian)
- Ortiz-Llorente M.J., Alvarez-Cobelas M. Comparison of biogenic methane emissions from unmanaged estuaries, lakes, oceans, rivers and wetlands, *Atmospheric Environment*, 2012, vol. 59, p. 328–337, URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.05.031>.
- Sturm K., Werner U., Grinham A., Yuan Z. Tidal variability in methane and nitrous oxide emissions along a subtropical estuarine gradient, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, vol. 192, p. 159–169, DOI: 10.1016/J.ECSS.2017.04.027/
- Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited, *Limnology Oceanography: Methods*, 2014, vol. 12, iss. 6, p. 351–362, URL: <https://doi.org/10.4319/lom.2014.12.351>.

Received 07.12.2021

Revised 05.04.2022

Accepted 13.05.2022

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.345

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ И РЕКОНСТРУИРОВАННЫХ ПАЛЕОТЕМПЕРАТУР В ПОСЛЕДНИЙ ЛЕДНИКОВЫЙ МАКСИМУМ В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ

Г.В. Суркова¹, Ю.К. Васильчук²

^{1,2} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

¹ Кафедра метеорологии и климатологии, проф., д-р геогр. наук; e-mail: galina_surkova@mail.ru

² Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, проф., д-р геол.-минерал. наук; e-mail: vasilch_geo@mail.ru

Работа посвящена сравнительному анализу независимых реконструкций температурного режима холодного периода последнего позднеледникового оледенения (18–21 тыс. лет назад), крупнейшего в Российской Арктике, по данным изотопного анализа и результатов численного моделирования. В исследовании использованы данные численных экспериментов климатических моделей земной системы проекта RMP3 и результаты температурной реконструкции, выполненной по изотопному составу сингенетических повторно-жильных льдов ($\delta^{18}\text{O}$). Показано, что в некоторых районах имеются существенные различия температуры, реконструированной по изотопным данным, и температуры, полученной по данным моделирования. В частности, выявлено, что по мере удаления от предполагаемого ледникового покрова различия в моделируемых и реконструированных температурах уменьшаются, что позволяет сделать заключение о значимом влиянии точности задаваемого в моделях расположения ледникового покрова на итоговые результаты моделирования.

В частности, разные подходы в палеоклиматических исследованиях приводят к довольно различающимся оценкам площади континентальных и шельфовых льдов той эпохи. Площадь ледников и их свойства учитываются в моделях климата при расчетах. Показано, что для качественного моделирования очень важно уточнять палеорекострукции, выполненные по косвенным климатическим источникам.

Ключевые слова: позднеледниковое оледенение, температура воздуха, холодный сезон, Арктика, изотопные и модельные реконструкции

DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-40-48

ВВЕДЕНИЕ

Общий рост температуры воздуха в Арктике на протяжении голоцена подтверждается результатами многочисленных палеоклиматических исследований, основанных на косвенных данных и их связи с климатом. Начиная с XIX в., инструментальные метеорологические наблюдения позволили создать длинные ряды прямых измерений и дать детальные количественные оценки современных региональных и глобальных изменений климата. Результаты анализа многолетних данных измерений за последние столетия свидетельствуют о колебаниях температурного режима разного временного масштаба (от квазидвухлетних колебаний до процессов с периодичностью в несколько десятилетий), на фоне которых в последние 100–150 лет фиксируется довольно быстрый и статистически значимый рост средней глобальной температуры приземного воз-

духа. С наибольшей скоростью потепление происходит в Арктике. Как над сушей, так и над акваториями арктических морей его величина примерно в два раза больше, чем в среднем по планете [Алексеев, 2015; Второй..., 2014; IPCC..., 2013; Доклад..., 2020; Boeke, Taylor, 2018; Serreze, Barry, 2011 и др.].

Для построения долгосрочных стратегий государственного планирования экономики и различных отраслей хозяйства, а также контроля состояния окружающей среды необходимо, наряду с другими факторами, располагать данными не только фактических измерений, но и результатами климатического прогноза на десятилетия вперед [Эколого-географические..., 2011; Влияние изменений..., 2013]. Одним из важнейших современных инструментов, позволяющих количественно оценивать возможные изменения климата при тех или иных сценариях комплекса естественных внутренних и внешних климатообра-

зующих факторов, а также антропогенного влияния являются климатические модели земной системы [Володин, 2007; Кислов, Суркова, 2020; Voeke, Taylor, 2018]. Для выстраивания сценариев будущего климата и подтверждения качества моделирования климатических проекций требуется проверка моделей, точности воспроизведения ими современного климата. Но еще одной важной задачей является понимание механизмов взаимодействия различных компонентов климатической системы, формирующих климат на масштабах времени, превышающих данные прямых метеорологических измерений. Инструмент для решения этих задач дает сравнение независимых палеоклиматических реконструкций, выполненных по косвенным оценкам климата методами изотопного и палинологического анализа, дендрохронологии, исследования океанических и ледниковых кернов и т. д., с результатами моделирования климатической системы для тех или иных сценариев.

Крупнейшим международным проектом последних десятилетий по организации единого типа численных экспериментов и сопоставлению данных моделирования в разные климатические эпохи прошлого стал проект PMIP (Paleoclimate Modeling Intercomparison Project). В настоящей работе использованы данные третьего этапа, PMIP3, эксперимент LGM (Last Glacial Maximum), 21 тыс. л. н., и контрольный эксперимент для современного климата [Braconnot et al., 2011, 2012; Taylor et al., 2012]. Подробное описание результатов этого проекта представлено в разделе о материалах и методах исследования. Среди крупных проектов последних лет, посвященных изучению механизмов смены климата ледниковых и межледниковых эпох, стоит отметить проект PalMod (<https://www.palmod.de/>), а также работы российских ученых РАН и университетов.

Низкие температуры воздуха в эпоху последнего позднеледникового оледенения (18–21 тыс. л. н.) формировались под воздействием разных факторов, среди которых одним из важных являлось состояние и площадь криолитозоны. В частности, более широкое по сравнению с современным распространением зоны континентальных ледниковых щитов, морских льдов и многолетнемерзлых пород. Дефицит палеоклиматических данных до сих пор оставляет место для дискуссии относительно площади континентальных и шельфовых ледников и их расположения в этот период, например [Hughes et al., 2016]. Такая неоднозначность усложняет задачу климатических палеореконокструкций, в том числе с использованием численных моделей климата, поскольку в качестве одного из показателей граничных условий при проведении расчетов задаются характеристики оледенения. Чем больше погрешность этих показателей (площади

ледников, их расположение), тем меньшая определенность возникает и в модельных результатах. Отсюда, с одной стороны, при задании максимально реалистичных граничных условий необходимо использовать косвенные данные о состоянии климатической системы (атмосферы, гидросферы, криосферы, биосферы) по результатам исследований в смежных областях палеогеографии для определенного среза палеовремени. С другой стороны, проверка результатов палеоклиматического моделирования возможна при сопоставлении расчетов с косвенными показателями состояния атмосферы.

Один из источников информации о температурном режиме в разные климатические эпохи, используемый в данной работе, – содержание стабильных изотопов кислорода ^{18}O и водорода ^2H в составе сингенетических повторно-жильных льдов. Ранее было показано [Васильчук, 1992; Vasil'chuk, 1991], что величины $\delta^{18}\text{O}$ в ростках современных ледяных жил хорошо коррелируют со значениями средней январской температуры приземного воздуха и суммами отрицательных средних суточных температур холодного сезона. Физическая основа такой зависимости базируется на том, что основным источником формирования ледяных жил служит талая весенняя вода, поэтому их изотопный состав в значительной мере соответствует изотопному составу снега, накапливающемуся на полигональном массиве за зиму [Васильчук и др., 2021]. В работе [Васильчук, Суркова, 2020] ранее выявленные уравнения связи были подтверждены с использованием более длинного ряда современных данных (1930–2017). Это дало возможность выполнить дальнейшую сравнительную оценку результатов палеоклиматических реконструкций температурного режима холодного сезона в арктической зоне России для периода максимума позднеледникового оледенения по двум различным источникам: изотопному составу сингенетических повторно-жильных льдов (ПЖЛ) и данным численных экспериментов, выполненных с использованием глобальных моделей климата в рамках международного эксперимента PMIP3/CMIP5 [Taylor et al., 2012].

В настоящей работе представлены результаты сопоставления палеотемпературных реконструкций, выполненных по данным содержания стабильных изотопов кислорода ^{18}O в сингенетических повторно-жильных льдах и результатов численных экспериментов PMIP3/CMIP5 для позднеледникового оледенения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа основана на двух независимых источниках данных о средней температуре воздуха для максимума позднеледникового оледенения (18–

21 тыс. л. н.) для холодного сезона. Под холодным сезоном понимается период, когда многолетняя средняя суточная температура устойчиво переходит от положительных значений к отрицательным. Оценка температурных характеристик холодного сезона выполнялась по данным:

- изотопного состава едомных повторно-жильных льдов ($\delta^{18}\text{O}$) [Васильчук, 1992; Vasil'chuk, 2014];

- результатов численных экспериментов моделей климатической системы в рамках международного проекта Paleoclimate Modelling Intercomparison Project, третий этап PMIP3, эксперимента LGM (Last Glacial Maximum), 21 тыс. л. н., и контрольного эксперимента для современного климата [Braconnot et al., 2011, 2012]. В качестве контрольного эксперимента, характеризующего современный климат, рассматривался эксперимент Historical [Taylor, 2012], где изменение внешних воздействий на климат задано в соответствии с наблюдениями.

Едома – это сильнольדיстые, содержащие более 50–90% льда, как правило, богатые органическим материалом (содержащие более 1–2% органики), иловатые и пылеватые супесчаные и мелкопесчаные позднеплейстоценовые отложения, вмещающие мощные (высотой до 15–20 м и более и шириной 1–3,5 м), нередко многоярусные, сингенетические повторно-жильные льды. Возраст едомных толщ варьирует от 12 до 50 калиброванных тыс. лет и старше. Едома представляет собой своеобразную лакмусовую бумагу – она является одним из лучших континентальных индикаторов палеотемпературы. Основным источником, питающим повторно-жильные льды, является талая снеговая вода, попадающая в морозобойные трещины ранней весной. Поэтому изотопный состав повторно-жильных льдов ($\delta^{18}\text{O}_{\text{пжл}}$) практически напрямую связан со средней температурой приземного воздуха ($t_{\text{сп.хол}}$) холодного периода ($^{\circ}\text{C}$), что нашло отражение в соответствующем уравнении, полученном Ю.К. Васильчуком [Vasil'chuk, 1991]:

$$t_{\text{сп.хол}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{пжл}} (\pm 2^{\circ}\text{C}).$$

Многолетнемерзлое состояние отложений и жильного льда обеспечивает полную сохранность изотопного сигнала, который сохраняется в жилах десятки тыс. лет в неизменном виде.

Из архива глобальных данных проекта PMIP3 были выбраны значения приземной температуры воздуха для территории Арктики по 12 моделям климата (табл. 1). Модели такого типа являются в настоящее время одним из наиболее значимых методов исследования климата и динамики атмосферы [Володин, 2007]. В них стараются учитывать все основные климатообразующие процессы наиболее полным на данный момент способом, учитывая все

компоненты климатической системы. Поэтому такие модели в настоящее время стали также называть моделями земной системы [Математическое моделирование..., 2016]. Основа моделей – эволюционные уравнения гидротермодинамики, поэтому проведение численного эксперимента требует задания начального состояния климатической системы и расчет этого состояния в последующие моменты времени на заданном временном интервале. Среди результатов расчетов десятки показателей состояния климатической системы, в том числе атмосферное давление, температура воздуха, атмосферные осадки, скорость и направление ветра, характеристики радиационного баланса и др.

Ключевыми особенностями граничных условий для модельных расчетов климата по сценарию LGM являются обширное распространение континентальных и морских льдов в Северном полушарии [Abe-Ouchi et al., 2015] (самые крупные ледниковые щиты – Лаврентийский, Кордильерский, Скандинавский и шельфа Баренцева моря) и пониженная концентрация парниковых газов (концентрация CO_2 составляла 185 млн^{-1} , метана – 350 млрд^{-1} , оксида азота N_2O – 200 млрд^{-1}). Подробное описание структуры эксперимента приводится на официальной странице PMIP [PMIP3, 2022].

В настоящей работе основное внимание уделено вопросу сравнения результатов численных экспериментов проекта PMIP3/CMIP5 и палеотемпературных реконструкций, выполненных по стабильным изотомам кислорода. В расчетных экспериментах PMIP3/CMIP5 все модели использовали единые граничные условия по площади и высоте покровного оледенения [Abe-Ouchi et al., 2015]. Согласно этому сценарию, южная граница материкового оледенения в эпоху позднеплейстоценового максимума в Евразии местами простиралась до 50° с. ш. Но это не единственный (и не самый лучший) вариант реконструкции площади оледенения в этот период. В частности, в работе [Hughes et al., 2016] положение последнего Евразийского ледникового покрова определено на основании хронологической базы данных более 5 тыс. радиоуглеродных и других определений возраста позднечетвертичных отложений из более чем 2,5 тыс. местоположений. На основании этих данных предлагается иная версия, которая предполагает, что площадь ледника была существенно меньше, чем в работе [Abe-Ouchi et al., 2015]. Серия карт, созданная [Hughes et al., 2016], показывает, что южная граница последнего Евразийского ледникового покрова 20–18 тыс. л. н. на территории Восточной Европы располагалась около 60° с. ш., а его восточный край находился в море заметно западнее Ямала, что говорит о существенно меньшем влиянии ледникового покрова в это время на климат Ямала и восточных

районов Сибири. Почти 70% значений возрастных определений (3756) – это радиоуглеродные датировки [Hughes et al., 2016], из них наземных – 2012, а морских – 1744. Причем подавляющее число наземных датировок выполнено по органическому материалу (стволам и корням деревьев, хвое, торфу, часто с неразложившимися остатками мхов, орешками и семенами растений, скелетами и тушами мамонтовой фауны и других животных), из разрезов приморских, речных и озерных террас, формировавшихся в позднем плейстоцене. Эти датировки свидетельствуют о формировании террас, росте растительности и подобных событиях, которые не могли происходить в условиях покровного оледенения.

В численных экспериментах PMIP3 показатели температурного режима холодного периода (средняя температура, продолжительность, сумма темпера-

тур) на первом этапе рассчитывались индивидуально по результатам каждой модели. Далее была выполнена билинейная пространственная интерполяция модельных данных в узлы сетки с одинаковыми географическими координатами с расстоянием $1,75 \times 1,75^\circ$ широты и долготы. Затем в каждом узле пространственной сетки выполнялось осреднение значений по ансамблю моделей. Статистическая значимость отклонений от современных значений оценивалась по критерию Стьюдента. Оценки показали, что по всей исследуемой территории отклонения значимы на уровне 95%. На основе полученных нами результатов по ансамблю моделей была построена карта отклонений средней температуры приземного воздуха холодного периода за период со средней суточной температурой $t < 0^\circ\text{C}$ 21 тыс. л. н. от современных значений, PMIP3 по эксперименту LGM (рис.).

Таблица 1

Модели климата, PMIP3/CMIP5, эксперимент Last Glacial Maximum

Модель	Организация	Расстояние между узлами модельной сетки, градусы широты и долготы
IPSL-CM5A-LR	Институт Пьера-Симона Лапласа, Франция	$1,89474 \times 3,75$
GISS-E2-R	Годдаровский институт космических исследований, Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (NASA), США	$2 \times 2,5$
GISS-E2-R	Годдаровский институт космических исследований, Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (NASA), США	$2 \times 2,5$
MPI-ESM-P	Институт метеорологии имени Макса Планка, Германия	$1,865 \times 1,875$
CNRM-CM5	Национальный центр климатических исследований / Европейский центр исследований и подготовки научных кадров, Франция	$1,4 \times 1,40625$
FGOALS-g2	Институт физики атмосферы (Пекин); Китайская академия наук, Университет Цинхуа, Китай	$2,79 \times 2,8125$
MRI-CGCM3	Институт метеорологических исследований, Япония	$1,12 \times 1,125$
MIROC-ESM	Институт исследований атмосферы и океана (Университет Токио); Национальный институт исследований окружающей среды; Агентство по науке и технологии исследований океана и суши, Япония	$2,79 \times 2,8125$
CCSM4	Объединенная модель климатической системы, США	$0,94 \times 1,25$
COSMOS-ASO	Свободный университет Берлина; Институт метеорологии, Берлин, Германия	$3,71 \times 3,75$

Независимые количественные оценки температуры приземного воздуха холодного сезона по изотопному составу сингенетических повторно-жильных льдов ($\delta^{18}\text{O}$) выполнялись на основе методики, разработанной Ю.К. Васильчуком [Васильчук, 1992; Vasil'chuk, 1991].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненное сравнение палеореконструкций отклонения средней температуры воздуха в холодный период ($t < 0^\circ\text{C}$) от современных значений по результатам ансамбля климатических моделей (модельные палеореконструкции) и изотопного состава

ва едомных повторно-жильных льдов (изотопные палеорекострукции) в одних и тех же пунктах для периода LGM (около 21 тыс. л. н.) позволило получить следующие результаты.

На рисунке представлены итоги модельных расчетов отклонения от современных значений средней температуры приземного воздуха и суммы средней суточной температуры приземного воздуха за период со средней суточной температурой $t < 0^{\circ}\text{C}$ 21 тыс. л. н. (среднее по ансамблю 12 моделей климата). Красными точками отмечены места отбора проб для последующего определения содержания изотопа кислорода ^{18}O . Очевидно, что наибольшее похолодание, по сравнению с современным климатом, отмечается в районе Скандинавии и шельфовой зоны Баренцева и Карского морей. Такое географическое распределение получено в результате того, что ледник, как предполагалось при постановке численных экспериментов PMIP3, учитывался в моделях в соответствии со сценарием, показанным в [Abe-Ouchi et al., 2015]. Однако тщательные исследования данных радиоуглеродного датирования [Hughes et al., 2016] показывают, что площадь ледника была иной, а именно существенно меньшей, чем ранее предполагалось. К подобному же выводу при-

водит анализ изотопного состава сингенетических повторно-жильных льдов ($\delta^{18}\text{O}$) [Васильчук, 1992; Vasil'chuk, Vasil'chuk, 2014; Васильчук и др., 2021].

Созданные по изотопному составу подземных льдов реконструкции температуры воздуха и их сопоставление с данными моделирования климата довольно неплохо коррелируют друг с другом (табл. 2), однако в отдельных регионах наблюдаются некоторые отличия. В наибольшей мере различаются реконструкции в западном секторе Сибири: в Западной Сибири отклонения от современных среднезимних температур по модельным расчетам на $7,9^{\circ}\text{C}$ ниже, чем по изотопным данным, также в устье р. Лены по модельным палеорекострукциям они на $7,0^{\circ}\text{C}$ ниже, чем по изотопным. Из сравнения двух реконструкций следует, что, по мере продвижения на восток и удаления от территории предполагаемого позднелейстоценового ледникового щита, заданного при модельных расчетах, результаты изотопной реконструкции температуры и модельных расчетов сближаются (см. табл. 2). Особенно близкие данные палеорекострукций получены для северной и центральной Якутии и арктических островов, где разница реконструкций, выполненная обоими методами, составила $0-1,2^{\circ}\text{C}$.

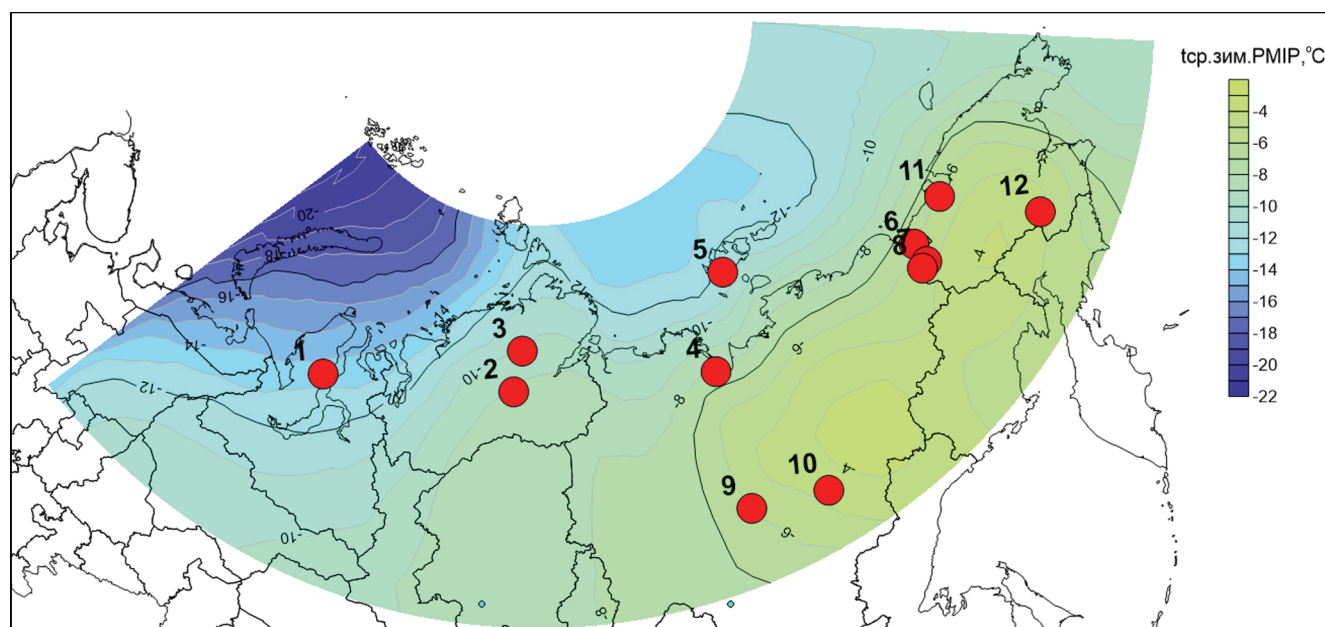


Рис. Отклонение средней температуры приземного воздуха холодного сезона 21 тыс. л. н. от современных значений по результатам PMIP3.

Шкала соответствует отклонению средней температуры приземного воздуха холодного сезона за период со средней суточной температурой $t < 0^{\circ}\text{C}$ 21 тыс. л. н. от современных значений, PMIP3 (эксперимент LGM). Точками отмечены пункты изотопных исследований позднелейстоценовой едомы возрастом около 21 тыс. л. н. Номера рядом с точками соответствуют табл. 1

Fig. Deviation of mean air temperature for the 21 BP cold season from modern climate parameters based on the PMIP3 results. The scale corresponds to the deviation of the cold season average surface air temperature for the period with the mean daily temperature $t < 0^{\circ}\text{C}$ for 21 kyr BP from modern values, PMIP3 (LGM experiment). Sampling locations sites for isotope studies of the Late Pleistocene Yedoma, about 21 kyr BP, are marked with dots. Numbers are in accordance with Table 1

Таблица 2

**Реконструкции отклонения средней температуры воздуха в холодный период
от современных значений по результатам ансамбля климатических моделей
и изотопного анализа для точек отбора проб**

№	Местоположение едомного массива	Географические координаты	Δt , °C, по жилам 18–21 тыс. л. н.	$\Delta t_{\text{РМРЗ}}$, °C, 18–21 тыс. л. н.	$\Delta t_{\text{РМРЗ}} - \Delta t$, °C, по жилам 18–21 тыс. л. н.
1	Пос. Сеяха	70°10' N, 72°12' E	–5,6	–13,5	–7,9
2	Оз. Лабаз	72°18' N, 99°40' E	–10,0	–10,0	0,0
3	Мыс Саблера	74°33' N, 100°32' E	–4,0	–10,0	–6,0
4	Мамонтова Хаята	71°61' N, 129°28' E	–1,5	–8,5	–7,0
5	О-в Котельный	75°26' N, 138°49' E	–13,2	–12,0	1,2
6	Пос. Зеленый Мыс	69° N, 161° E	–6,5	–6,2	0,3
7	Плахинский Яр	68°40' N, 160°17' E	–7,0	–6,0	1,0
8	Дуваный Яр	68°37' N, 159°8' E	–6,0	–6,0	0,0
9	Устье р. Тыалычима	64° N, 126° E	–3,5	–7,2	–3,7
10	Мамонтова гора на р. Алдан	63° N, 134° E	–5,2	–4,8	0,4
11	О-в Айон	69°38' N, 168°35' E	–3,0	–7,0	–4,0
12	Ледовый обрыв на р. Майн	64°06' N, 171°01' E	–10,4	–4,5	5,9

Примечание. Отклонение средней температуры воздуха в холодный период от современных значений по результатам ансамбля климатических моделей ($\Delta t_{\text{РМРЗ}}$) и изотопного анализа повторно-жильных льдов (Δt , °C) для точек отбора проб из ледяных жил

ВЫВОДЫ

Выполнено сравнение палеорекопунктур отклонения средней температуры воздуха в холодный период ($t < 0^\circ\text{C}$) от современных значений по результатам ансамбля климатических моделей (модельные палеорекопунктуры) и изотопного состава едомных повторно-жильных льдов (изотопные палеорекопунктуры) в одних и тех же пунктах для периода LGM (около 21 тыс. л. н.).

В результате сопоставления модельных и изотопных палеорекопунктур отклонения средней температуры воздуха в холодный период (средняя суточная $t < 0^\circ\text{C}$) от современных значений получены весьма обнадеживающие выводы, позволяющие говорить о том, что валидация данных в целом удалась, даже в большей мере, чем ожидалось.

Особенно близкие данные палеорекопунктур получены для северной и центральной Якутии и арктических островов, где разница температур, выполненная с использованием данных моделирования и изотопных реконструкций, составила 0–1,2°C.

В наибольшей мере различаются реконструкции в западном секторе Сибири – в Западной Сибири отклонения от современных среднезимних температур по модельным расчетам на 7,9°C ниже, чем

по изотопным данным, также в устье р. Лены по модельным палеорекопунктурам они на 7,0°C ниже, чем по изотопным.

Таким образом, реконструированная пространственная структура поля температуры холодного сезона LGM и его отличие от современных значений интерпретируется исследователями по-разному в зависимости от инструмента, используемого для палеорекопунктур.

Определено, что наибольшие различия температурных реконструкций, полученных для LGM по разным исследованиям, отмечаются на северо-западе исследуемого региона и связаны с разной оценкой возможной площади распространения ледниковых щитов, в палеорекопунктурах климатических моделей площадь оледенения предполагается значительно более обширной, чем в изотопных.

Подчеркнем, что в ряде пунктов (особенно на западе и северо-западе Российской Арктики) в большинстве моделей предполагается, что территория в позднем плейстоцене (18–21 тыс. л. н.) была покрыта льдом, а на самом деле ледника в этот период здесь не было.

Показана необходимость уточнения палеорекопунктур посредством их сопоставления между собой.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00126), а также в рамках работы междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды» и госзадания (номер ЦИТИС: АААА-А16-116032810086-4). Отдельно благодарим А.А. Крылова за участие в подготовке данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. № 1. С. 11–26.
- Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Суркова Г.В., Чиждова Ю.Н. О надежности палеотемпературно-изотопных уравнений Васильчука и становлении изотопной палеогеокриологии // *Арктика и Антарктика*. 2021. № 2. С. 1–25. DOI: 10.7256/2453-8922.2021.2.36145.
- Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций). В 2 т. М.: Изд. отдел. теоретических проблем РАН, МГУ, ПНИИИС, 1992. Т. 1. 420 с.; Т. 2. 264 с.
- Васильчук Ю.К., Суркова Г.В. Верификация соотношения изотопного состава повторно-жильных льдов и температуры холодного периода за последние 80 лет на севере криолитозоны России // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 11. С. 84–91.
- Влияние изменений климата и опасных природных явлений на природопользование Европейского Севера / под ред. Н.С. Касимова, Л.Н. Карлина. СПб.: РГГМУ, 2013. 124 с.
- Володин Е.М. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы: курс лекций. М.: ИВМ РАН, 2007. 89 с.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М., 2020. 97 с.
- Кислов А.В., Суркова Г.В. Климатология. М.: ИНФРА-М, 2020. 324 с.
- Математическое моделирование Земной системы / под ред. Н.Г. Яковлева, М.: МАКС Пресс, 2016, 328 с.
- Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири / под ред. А.В. Кислова, Н.С. Касимова. М.: Географический факультет МГУ, 2011. 493 с.
- Abe-Ouchi A., Saito F., Kageyam M., Braconno P., Harrison S.P., Lambeck K., Otto-Bliesner B.L., Peltier W.R., Tarasov L., Peterschmitt J.-Y., Takahashi K. Ice-sheet configuration in the CMIP5/PMIP3 Last Glacial Maximum experiments, *Geosci. Model Dev.*, 2015, vol. 8, p. 3621–3637, DOI: 10.5194/gmd-8-3621-2015.
- Braconnot P., Harrison S.P., Otto-Bliesner B., Abe-Ouchi A., Jungclaus J., Peterschmitt J.-Y. The Paleoclimate Modeling Intercomparison Project contribution to CMIP5, CLIVAR Exchanges, no. 56, vol. 16, no. 2, International CLIVAR Project Office, Southampton, United Kingdom, 2011, p. 15–19.
- Braconnot P., Harrison S.P., Kageyama M., Bartlein P.J., Masson-Delmotte V., Abe-Ouchi A., Zhao Y. Evaluation of climate models using palaeoclimatic data, *Nature Climate Change*, 2012, p. 417–424, DOI:10.1038/nclimate1456.
- Hughes A.L.C., Gyllencreutz R., Lohne Ø.S., Mangerud J., Svendsen J.I. The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction, *DATED-1, Boreas*, 2016, vol. 45, iss. 1, p. 1–45, DOI: 10.1111/bor.12142.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / edited by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2013, 1535 p.
- Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis, *Global Planet Change*, 2011, vol. 77, no. 1–2, p. 85–96.
- Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. The CMIP5 experiment design, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2012, vol. 93, p. 485–498.
- Vasil'chuk Yu., Vasil'chuk A. Spatial distribution of mean winter air temperatures in Siberian permafrost at 20–18 ka BP using oxygen isotope data, *Boreas*, 2014, vol. 43, iss. 3, p. 678–687, DOI: 10.1111/bor.12033.
- Vasil'chuk Yu.K. Reconstruction of the paleoclimate of the Late Pleistocene and Holocene of the basis of isotope studies of subsurface ice and waters of the permafrost zone, *Water Resources*, 1991, vol. 17, no. 6, p. 640–647.
- Электронные ресурсы*
- Boeke R.C., Taylor P.C. Seasonal energy exchange in sea ice retreat regions contributes to differences in projected Arctic warming, *Nature Commun.*, 2018, vol. 9, p. 5017, DOI: 10.1038/s41467-018-07061-9 (дата обращения 22.01.2022).
- PMIP3 (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project Phase III), URL: <https://pmip3.lsce.ipsl.fr/> (дата обращения 22.01.2022).

Поступила в редакцию 05.12.2021

После доработки 16.03.2022

Принята к публикации 13.05.2022

COMPARISON OF SIMULATED AND RECONSTRUCTED PALEOTEMPERATURES DURING THE LAST GLACIAL MAXIMUM IN NORTHERN EURASIA

G.V. Surkova¹, Yu.K. Vasil'chuk²

^{1,2} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

¹ *Department of Meteorology and Climatology, Professor, D.Sc. in Geography;
e-mail: galina_surkova@mail.ru*

² *Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Professor,
Dr.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: vasilch_geo@mail.ru*

The study deals with comparative analysis of independent reconstructions of temperature regime during the cold period of the largest in the Russian Arctic Late Pleistocene glaciation (18–21 kyr BP), based on the data of isotopic analysis and the results of numerical modeling. The study used the data of numerical experiments of PMIP3 climatic models of the Earth system, and the results of temperature reconstruction based on the isotopic composition of syngenetic ice wedges ($\delta^{18}\text{O}$). It is shown that in some areas there are significant differences in temperatures reconstructed from the isotope data and obtained from the modeling data. In particular, it was found that the difference in simulated and reconstructed temperatures decreases with distance from the hypothetical ice sheet, which allows concluding that the accuracy of the ice sheet location in the models is significant for the final simulation results.

In particular, different approaches in paleoclimatic studies lead to rather different estimates of the area of continental and shelf ice of the epoch. The area of glaciers and their properties are taken into account in climate models in the process of calculations. Our investigation shows that high-quality modeling definitely requires refining the paleoreconstructions based on proxy climate data.

Keywords: Late Pleistocene glaciation, air temperature, cold season, Arctic, isotopic and model reconstructions

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 19-17-00126) and carried out under the MSU Interdisciplinary Scientific and Educational School "Future of the Planet and Global Environment Changes" and the state assignment (CITIS number: AAAA-A16-116032810086-4). Special thanks to A.A. Krylov for his assistance in data pre-processing.

REFERENCES

- Abe-Ouchi A., Saito F., Kageyam M., Braconno P., Harrison S.P., Lambeck K., Otto-Bliesner B.L., Peltier W.R., Tarasov L., Peterschmitt J.-Y., Takahashi K. Ice-sheet configuration in the CMIP5/PMIP3 Last Glacial Maximum experiments, *Geosci. Model Dev.*, 2015, vol. 8, p. 3621–3637, DOI: 10.5194/gmd-8-3621-2015.
- Alekseev G.V. Projavlenie i usilenie global'nogo potepelenija v Arktike [Development and amplification of global warming in the Arctic], *Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija*, 2015, no. 1, p. 11–26. (In Russian)
- Braconnot P., Harrison S.P., Otto-Bliesner B., Abe-Ouchi A., Jungclaus J., Peterschmitt J.-Y. The Paleoclimate Modeling Intercomparison Project contribution to CMIP5, *CLIVAR Exchanges*, no. 56, vol. 16, no. 2, International CLIVAR Project Office, Southampton, United Kingdom, 2011, p. 15–19.
- Braconnot P., Harrison S.P., Kageyama M., Bartlein P.J., Masson-Delmotte V., Abe-Ouchi A., Zhao Y. Evaluation of climate models using palaeoclimatic data, *Nature Climate Change*, 2012, vol. 2, no. 6, p. 417–424, DOI: 10.1038/nclimate1456.
- Doklad ob osobennostjakh klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2019 god [A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2019], Moscow, 2020, 97 p. (In Russian)
- Ekologo-geograficheskie posledstvija global'nogo potepelenija klimata 21 veka na Vostochno-Evropejskoj ravnine i v Zapadnoj Sibiri [Ecological and geographical consequences of global warming of the 21st century on the East European Plain and in Western Siberia], A.V. Kislov, N.S. Kasimov (eds.), Moscow, Moscow State University, Faculty of Geography Publ., 2011, 493 p. (In Russian)
- Hughes A.L.C., Gyllencreutz R., Lohne Ø.S., Mangerud J., Svendsen J.I. The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction, *DATED-1, Boreas*, 2016, vol. 45, iss. 1, p. 1–45, DOI: 10.1111/bor.12142.
- IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / edited by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2013, 1535 p.
- Kislov A.V., Surkova G.V. *Klimatologija* [Climatology], Moscow, INFRA-M Publ., 2020, 324 p. (In Russian)
- Matematicheskoe modelirovanie Zemnoj sistemy [Mathematical modelling of the Earth system], N.G. Jakovlev (ed.), Moscow, MAKS Press, 2016, 328 p.
- Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis, *Global Planet Change*, 2011, vol. 77, no. 1–2, p. 85–96.
- Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. The CMIP5 experiment design, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2012, vol. 93, p. 485–498.

- Vasil'chuk Yu., Vasil'chuk A. Spatial distribution of mean winter air temperatures in Siberian permafrost at 20–18 ka BP using oxygen isotope data, *Boreas*, 2014, vol. 43, iss. 3, p. 678–687, DOI: 10.1111/bor.12033.
- Vasil'chuk A.C., Budantseva N.A., Surkova G.V., Chizhova Ju.N. O nadezhnosti paleotemperaturno-izotopnykh uravnenij Vasil'chuka i stanovlenii izotopnoj paleogeokriologii [On the reliability of the Vasil'chuk's paleotemperature-isotopic equations and the establishment of isotopic paleogeocryology], *Arktika i Antarktika*, 2021, no. 2, p. 1–25, DOI: 10.7256/2453-8922.2021.2.36145. (In Russian)
- Vasil'chuk Yu.K. *Izotopno-kislородnyj sostav podzemnykh l'dov* (opyt paleogeokriologicheskikh rekonstrukcij) [Oxygen isotope composition of ground ice (experience of paleogeocryological reconstructions)], Moscow, Izd. otel teoreticheskikh problem RAN, MGU, PNIIS, 1992, vol. 1, 420 p.; vol. 2, 264 p. (In Russian)
- Vasil'chuk Yu.K. Reconstruction of the paleoclimate of the Late Pleistocene and Holocene of the basis of isotope studies of subsurface ice and waters of the permafrost zone, *Water Resources*, 1991, vol. 17, no. 6, p. 640–647.
- Vasil'chuk Yu.K., Surkova G.V. Verification of the Relationship between the Isotopic Composition of Ice Wedges and Cold-season Temperature over the Recent 80 Years in the Northern Permafrost Zone of Russia, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, vol. 45, no. 11, p. 791–796.
- Vlijanie izmenenij klimata i opasnykh prirodnykh javlenij na prirodopol'zovanie Evropejskogo Severa [Impact of climate change and natural hazards on the use of natural resources in the European North], N.S. Kasimov, L.N. Karlin (eds.), Saint Petersburg, RGGMU Publ., 2013, 124 p. (In Russian)
- Volodin E.M. *Matematicheskoe modelirovanie obshhej cirkuljacii atmosfery: Kurs lekcij* [Mathematical modelling of the general atmosphere circulation], Moscow, IVM RAN, 2007, 89 p. (In Russian)
- Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmenenijah klimata i ih posledstvijah na territorii Rossijskoj Federacii* [Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Changes and Their Consequences on the Territory of the Russian Federation], Moscow, Rosgidromet Publ., 2014, 1008 p. (In Russian)
- Web sources*
- Boeke R.C., Taylor P.C. Seasonal energy exchange in sea ice retreat regions contributes to differences in projected Arctic warming, *Nature Commun.*, 2018, vol. 9, 5017, DOI: 10.1038/s41467-018-07061-9 (access date 22.01.2022).
- PMIP3 (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project Phase III), URL: <https://pmip3.lscce.ipsl.fr/> (access date 22.01.2022).

Received 05.12.2021

Revised 16.03.2022

Accepted 13.05.2022

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ РОССИИ С ПОМОЩЬЮ АНСАМБЛЕВОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

А.В. Чинилин¹, И.Ю. Савин²^{1,2} Почвенный институт имени В.В. Докучаева, отдел генезиса, географии, классификации и цифровой картографии почв² Российский университет дружбы народов, Институт экологии, Департамент рационального природопользования¹Канд. биол. наук; e-mail: andrey.chinilin@yandex.ru²Д-р с.-х. наук, проф., академик РАН; e-mail: savigory@gmail.com

Исследование показывает современную количественную оценку содержания органического углерода почв России с учетом их огромного разнообразия, а также отражает понимание отдельных факторов, регулирующих и контролирующих содержание органического углерода почв в пределах страны. В работе приводятся результаты трехмерного моделирования содержания органического углерода почв с пространственным разрешением 500 м по ряду стандартных глубин (0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 см) на территории Российской Федерации с помощью ансамблевого машинного обучения. Автоматизированное прогнозное картографирование основывалось на данных по 4961 почвенному горизонту из 863 профилей почв, а также на обширном наборе пространственной информации, включающем биоклиматические переменные, цифровую модель рельефа и ее производные, долгосрочные усредненные временные ряды данных MODIS. Для построения моделей латеральной и вертикальной дифференциации использовался ансамблевый алгоритм машинного обучения (стекинг, стековое обобщение, стековая регрессия). Оценку точности полученных картографических моделей определяли с помощью пространственной перекрестной проверки. Результаты пространственной кросс-валидации показывают меньшую точность: коэффициент детерминации 0,46, CCC – 0,63, logRMSE – 0,88 (RMSE – 1,41 г/кг) по сравнению с традиционной перекрестной (R^2_{cv} – 0,68, CCC – 0,81, logRMSE – 0,68 (RMSE – 0,97 г/кг)). Предлагаемая количественная оценка полностью автоматизирована и позволяет воспроизводить моделирование и уточнять результаты по мере получения новых данных о почвах.

Ключевые слова: почвенный покров, пространственное моделирование, стековая регрессия, пространственная кросс-валидация

DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-49-63

ВВЕДЕНИЕ

Почва является крупнейшим резервом органического углерода, в котором содержится около 1460,5 Пг (10^{15} грамм или миллиард тонн) углерода в метровой толще [Scharlemann et al., 2014]. Почвенный органический углерод формирует и поддерживает основные режимы, свойства и функции почв – агроэкологические и экосистемные, санитарно-защитные и социально-экономические; является ключевым индикатором качества почв и их устойчивости. Вместе с этим почвенный органический углерод достаточно чувствителен к антропогенному воздействию, и незначительные изменения в его содержании в глобальном масштабе могут оказать заметное влияние на потоки парниковых газов, а затем и на концентрацию CO_2 , CH_4 в атмосфере и, следовательно, на изменение климата. Повышенное внимание и ожидания в отношении потенциала почвенного органического углерода почв для содействия смягчению последствий изменения климата отражены в ряде международных проектов, таких

как проект Глобального почвенного партнерства по рекарбонизации почв [Recarbonization..., 2020], инициатива «4 на 1000» [Minasny et al., 2017], проекты устойчивого развития [Griscom et al., 2017].

Российская Федерация – крупнейшая по площади страна в мире, значительная часть территории которой находится в пределах между 60° и 70° с. ш., что обуславливает значительные запасы органического углерода в почвах [FAO, 2018].

Последние разработки в области автоматизированного прогнозного почвенного картографирования и достижения в области данных дистанционного зондирования позволяют специалистам в области наук о почвах переосмыслить методы картографирования почв на основе «факторного» моделирования [Савин и др., 2019]. В этом отношении McBratney с соавторами [McBratney et al., 2003] предложили новую парадигму почвенного картографирования, основанную на количественном моделировании. Эта парадигма основана на модели *scorpan*, включающей пространственные данные по факторам почвообра-

зования. Тем не менее одних пространственных данных зачастую бывает недостаточно, чтобы описать дифференциацию свойств почвы, которую необходимо рассматривать как трехмерное тело.

В последнее время ряд исследователей сосредоточили внимание на картографировании содержания органического углерода почв в национальном масштабе, например в Венгрии [Szatmári et al., 2021], Китае [Liang et al., 2019], Бразилии [Gomes et al., 2019], Швейцарии [Zhou et al., 2021]. Работы по оценке и картографированию содержания органического углерода почв проводились и для территории РФ [Бирюкова, Бирюков, 2011a, 2011b; Чернова и др., 2021; Щепаченко и др., 2013; Rozhkov et al., 1996; Stolbovoi, 2002], где в качестве основы использовалась контурная часть базовых мелкомасштабных почвенных карт и каждый полигон получал экспертное присвоение того или иного среднего значения содержания органического углерода для всех почв, входящих в состав того или иного контура. Но природное варьирование содержания органического углерода почв на таких тематических и схематичных картах не всегда будет сопоставимо с выделами на почвенной карте, что приведет к накоплению ошибок. К тому же контуры почв являются неоднородными в почвенном отношении, и степень неоднородности изменяется от контура к контуру. Часть контуров на используемых мелкомасштабных почвенных картах является сложной и может содержать до трех сопутствующих почв.

Известны примеры глобальных оценок содержания и запасов органического углерода. К примеру, глобальный проект SoilGrids 2.0 [Poggio et al., 2021], представляющий пространственную почвенную информацию, основан на большом количестве разноразмерных национальных и локальных данных, комбинация которых влечет за собой ошибки в получаемом картографическом материале. Карта глобального распределения органического углерода почв (GSOC) [FAO, 2018] содержит информацию только о верхнем 30-сантиметровом слое, а содержание на других глубинах не рассматривается.

Учитывая вышесказанное, целью данного исследования является получение информации о латеральном и вертикальном распределении содержания органического углерода почв Российской Федерации. Для достижения поставленной цели решался ряд задач: 1) оценка эффективности применения ансамблевого метода машинного обучения и пространственной кросс-валидации; 2) количественная оценка ошибки предсказания; 3) оценка изменчивости содержания органического углерода почв с глубиной; 4) определение основных факторов, влияющих на пространственное распределение органического углерода почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основы для моделирования выступал Единый государственный реестр почв России (ЕГРПР) и, в частности, семантическая его часть (база данных) по свойствам почв. База данных состоит из обширной информации по морфологическим признакам почв, физическим и химическим свойствам по 4961 почвенному горизонту из 863 профилей почв.

В качестве объясняющих переменных при моделировании содержания органического углерода почв использовался обширный набор пространственной информации, включая:

- набор биоклиматических переменных CHELSA Climate (среднегодовое количество осадков, среднегодовая температура воздуха, количество снежных дней, сезонность температур, сезонность осадков);
- цифровую модель рельефа (MERIT DEM) и производные от нее (крутизна склонов, кривизна поверхности, топографический индекс влажности);
- долгосрочные усредненные ежедневные значения коэффициента отражения для 2-го (NIR) и 7-го (MIR) каналов спектрорадиометра MODIS (MCD43A4) за период с 01.2015 по 12.2019 г.;
- долгосрочные усредненные 8-дневные значения температуры (ночной и дневной) подстилающей поверхности (MODIS MOD11A2) за период с 01.2010 по 12.2019 г.;
- долгосрочные усредненные 16-дневные значения вегетационного индекса EVI (MODIS MOD13A2) за период с 01.2010 по 12.2019 г.;
- долгосрочные усредненные 4-дневные значения индекса листовой поверхности (LAI) и фотосинтетически активной радиации (FPAR) за период с 01.2010 по 12.2019 г. (MODIS MCD15A3H);
- долгосрочные усредненные 8-дневные значения валовой первичной продукции (GPP) за период с 01.2010 по 12.2019 г. (MODIS MOD17A2H);
- долгосрочные усредненные ежедневные значения проективного покрытия снежного покрова (MODIS MOD10A1) за период с 01.2015 по 12.2019 г.;
- карту наземного покрова по данным Европейского космического агентства¹.

Ковариаты подбирались исходя из предположения о том, что все эти слои пространственной информации могут обеспечивать определенную степень контроля содержания органического углерода почв.

Продукты MODIS были получены с помощью облачной вычислительной платформы Google Earth Engine (GEE) [Gorelick et al., 2017], статистической среды R и пакета rgee.

¹ 300 m annual global land cover time series from 1992 to 2015, URL: <https://www.esa-landcover-cci.org/?q=node/175>.

Глубина – как независимая переменная (ковариата). Недавние исследования показали, что изменения тех или иных свойств почв с глубиной могут быть отображены с помощью моделей, включающих эту самую глубину в качестве переменной-предиктора наряду с пространственными переменными [Zhang et al., 2020]. Некоторые работы описывают использование комбинации отдельных моделей, которые строятся для различных фиксированных интервалов глубин, охватывающих различные части профиля почв. Как правило, используется стандартный набор из шести интервалов глубин (0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100, 100–200 см), предложенных инициативой GlobalSoilMap. Такой подход 2,5D-моделирования получил применение в методологии цифровой почвенной картографии [Malone et al., 2009]. Однако 3D-моделирование, учитывающее в более явном виде влияние глубины на изменение свойств почв, позволяет охарактеризовать почву как истинное трехмерное природное тело.

В этом исследовании мы используем подход, предложенный T. Hengl и R. MacMillan [Hengl, MacMillan, 2019], где в качестве глубины присваивается срединное значение, нижний и верхний пределы (при условии, что мощность генетического горизонта более 15 см) почвенного горизонта. Используя такой подход и включая глубину в качестве ковариаты, становится возможным использовать одну единственную модель для прогнозирования содержания углерода почв на любой произвольной глубине.

Рабочий процесс моделирования. Моделирование содержания органического углерода почв включало следующие этапы:

- подготовку исходных данных;
- пересечение (соотнесение) существующих точек наблюдения и значений предикторов в этих точках (создание регрессионной матрицы);
- моделирование с помощью ансамбля методов машинного обучения и использования пространственной кросс-валидации;
- оценку точности полученной модели;
- пространственное предсказание содержания органического углерода почв для каждого элемента (пиксела) раstra.

Подготовка исходных данных. Несмотря на то что в случае использования нелинейных методов анализа данных логарифмическое преобразование целевой переменной не требуется, мы решили, что подобное преобразование даст пропорционально больший вес низким значениям содержания органического углерода почв. Поэтому мы моделировали логарифмически преобразованные значения ($\log_e(x + 1)$, где x – заданное значение) содержания углерода почв, а затем использовали обратную

трансформацию для пространственного прогноза ($e^x - 1$).

Ансамблевое машинное обучение. В этом исследовании мы используем ансамблевый алгоритм машинного обучения, называемый стекингом (стековым обобщением, стековой регрессией) [Breiman, 1996; Laan van der et al., 2007]. Архитектура такого алгоритма содержит две или более базовые модели, а также метамодель, которая объединяет прогнозы базовых моделей.

В роли базовых или нулевых алгоритмов в данном исследовании мы использовали «ансамбль деревьев решений» (Random Forest), бустинг (Gradient boosting machine), обобщенную линейную модель с регуляризацией (ElasticNet). В качестве метамодели – линейную регрессию, которая будет вычислять взвешенную сумму прогнозов, сделанных вышеперечисленными базовыми алгоритмами. Для создания ансамблевого алгоритма машинного обучения мы использовали пакет `mlr` в статистической среде `R`.

При использовании одиночных методов, основанных на построении деревьев решений, получают надежные прогнозы только на подпространстве признаков, определяемых обучающей выборкой, а в области экстраполяции (т. е. прогнозировании за пределами обучающей выборки) точность может резко снижаться. Стековое обобщение, сочетающее в себе различные модели (и линейные, и нелинейные), дает более реалистичные прогнозы, особенно в областях экстраполяции. Стекинг учитывает характеристики различных алгоритмов машинного обучения, уменьшает дисперсию единичных моделей и обеспечивает лучшие и более стабильные результаты. Ранее проведенные исследования с использованием стекинга показывают потенциал в повышении точности получаемых карт ряда свойств почв [Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2021].

Пространственная перекрестная проверка. Обработка пространственных наборов данных (где к каждому наблюдению прикрепленна информация о пространственной привязке) как непространственных приводит к чрезмерно оптимистичным результатам [Brenning, 2005]. Это связано с лежащей в основе данных пространственной автокорреляцией. Чем ближе наблюдения расположены друг к другу, тем больше они похожи.

При выполнении традиционной процедуры кросс-валидации данные обучающего и тестового наборов данных располагаются непосредственно рядом друг с другом (в географическом пространстве). Следовательно, тестовый набор данных будет содержать данные, которые несколько похожи (из-за пространственной автокорреляции) на наблюдения в обучающем наборе данных. Это приведет к тому, что модель, которая была обучена на обучаю-

шей выборке, довольно хорошо работает с тестовыми данными.

Для 5-кратной пространственной перекрестной проверки мы использовали ID пространственных блоков (страт) размером 150×150 км, созданных в конической равнопромежуточной проекции с помощью пакета blockCV в статистической среде R (рис. 1). Это гарантирует, что точки, которые лежат в непосредственной близости (менее 150 км), используются либо для обучения, либо для провер-

ки, что в итоге обеспечивает более объективную оценку точности. Для сравнения нами также была проведена процедура традиционной перекрестной проверки, исключая использование пространственных блоков.

Точность полученных моделей оценивалась с помощью коэффициента детерминации (доля дисперсии, объясняемая метамоделью) R^2_{cv} , корня среднеквадратичной ошибки $RMSE_{cv}$, коэффициента конкордации CCC.

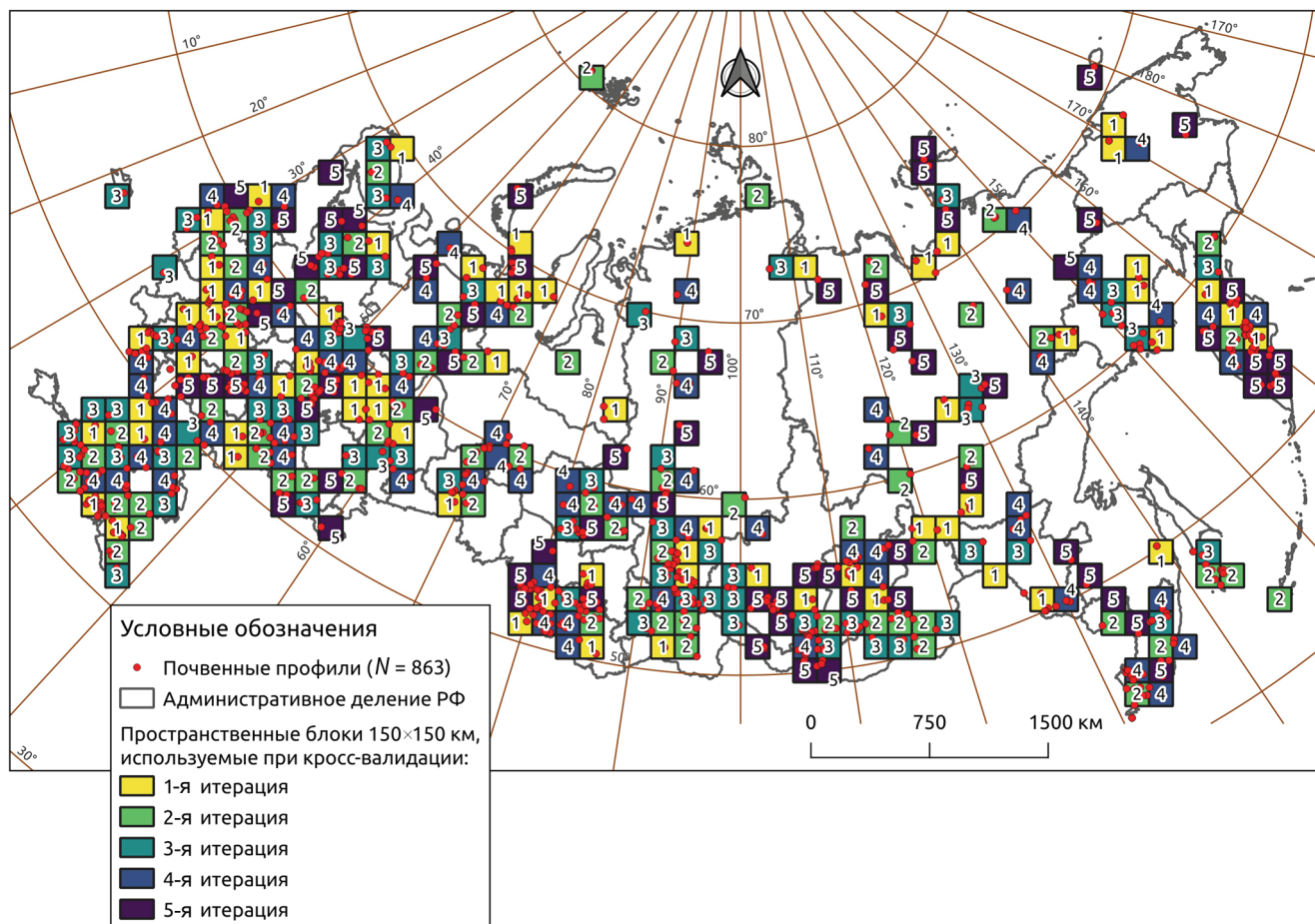


Рис. 1. Пространственная перекрестная проверка.

Для 5-кратной пространственной перекрестной проверки были использованы блоки размером 150×150 км, случайным образом распределенные таким образом, чтобы каждое из пяти подмножеств содержало около 20% наблюдений. Затем проводилась 5-кратная процедура обучения и тестирования ансамблевого алгоритма, каждый раз оставляя одно из подмножеств для валидации

Fig. 1. Spatial cross validation.

We used 150×150 km blocks for 5-fold spatial cross-validation, randomly distributed so that each of the 5 subsets contained about 20% of observations. Then a 5-fold training and testing procedure of the ensemble algorithm was carried out, each time leaving one of the subsets for validation

Карты пространственного распределения неопределенности оценки содержания органического углерода почв были получены с использованием подхода квантильных регрессионных ансамблей деревьев решений (Quantile Regression Forests), предложенного N. Meinshausen [Meinshausen, 2006]

и реализованного в пакете ranger. Этот подход позволяет количественно оценить достоверность прогноза, используя интервалы прогнозирования. Интервал прогнозирования – это оценка интервала, в который с заданной вероятностью попадут предсказанные наблюдения. В данном подходе вместо

среднего значения переменной отклика в каждом листе дерева мы будем получать все наблюдаемые отклики на листе. Таким образом, модель предсказывает не только среднее значение переменной, но и полное условное распределение значений.

Таким образом, мы получили верхний (Q_{84}) и нижний (Q_{16}) квантили, соответствующие доверительному интервалу в 68% (т. е. $[\mu - 1\sigma; \mu + 1\sigma]$). Карты неопределенности были получены как половина разницы между этими квантилями: ошибка равна $(Q_{84} - Q_{16})/2$.

Сравнение с другими картами. Одним из важных этапов составления карт является оценка ее качества. Качество получаемых карт оценивалось с помощью сравнения, во-первых, с цифровой почвенной картой РСФСР масштабом 1 : 2 500 000, лежащей в основе ЕГРПР; во-вторых, с картами, полученными в рамках проекта SoilGrids 2.0² [Poggio et al., 2021]. Почвенная карта РСФСР (под редакцией В.М. Фридланда) является наиболее подробной почвенной картой, созданной по единой системе на всю территорию страны. Эта карта основана на географо-генетических представлениях о почвенном покрове [Конюшков и др., 2020] и является уникальным по полноте информации о почвах страны картографическим материалом.

Основой для сравнения выступала геометрическая часть цифровой почвенной карты РСФСР, представленная выделами почв. К определенным выделам (единым по почвенной разности) попиксельно извлекались значения сравниваемых карт (SoilGrids 2.0) и описываемых в данном исследовании. Далее проводился расчет описательной статистики для каждой из сравниваемых карт, и полученные значения содержания органического углерода почв сравнивались с эталонными, в качестве которых выступала информация о разностях почв, лежащая в основе ЕГРПР. В качестве критерия оценки качества карт использовалась близость к эталонным значениям.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Точность моделей и значимость переменных.

Результаты пространственной и рандомизированной (непространственной) перекрестной проверок показаны на рис. 2. Оба графика отражают наличие статистически достоверной зависимости между наблюдаемыми и полученными в процессе моделирования значениями. Результаты пространственной кросс-валидации (см. рис. 2, справа) показывают меньшую точность: коэффициент детерминации

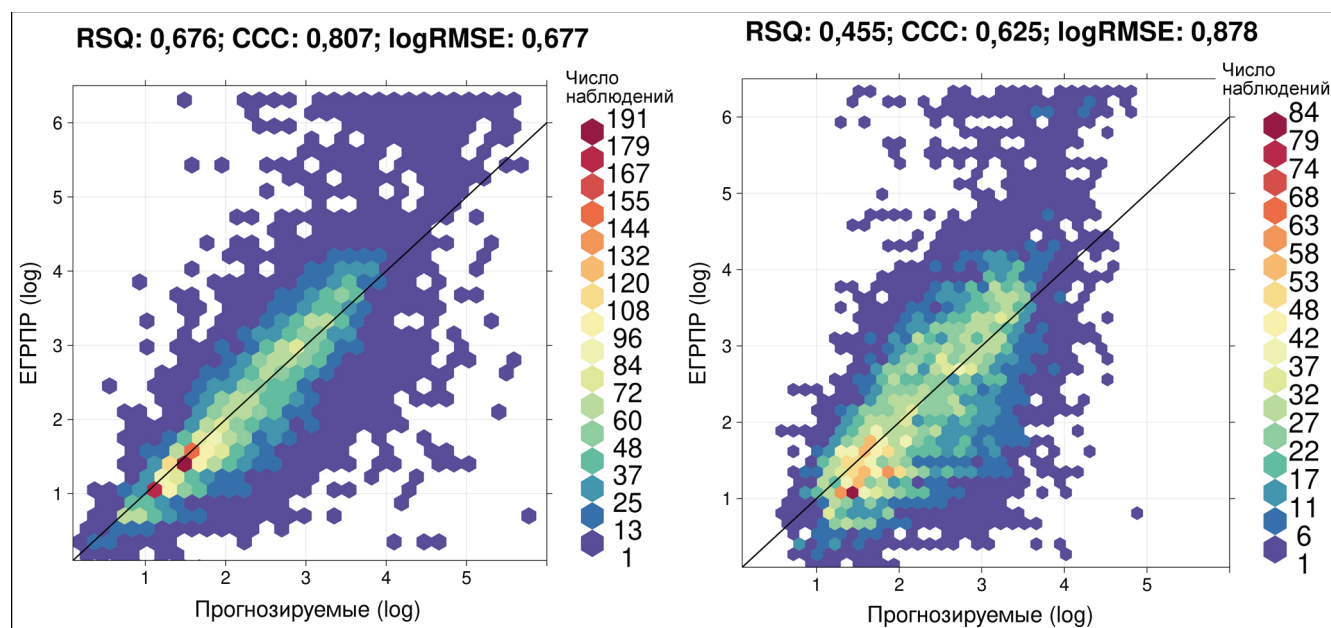


Рис. 2. Результаты рандомизированной (слева) и пространственной (справа) перекрестной проверок. Точность моделей оценивалась с использованием коэффициента детерминации (RSQ), коэффициента конкордации (CCC) и корня среднеквадратичной ошибки прогнозирования (logRMSE). Значения по осям представлены с логарифмическим преобразованием

Fig. 2. Results of randomized (left) and spatial (right) cross-validation.

The model accuracy was assessed using determination coefficient (RSQ), Lin's concordance correlation coefficient (CCC) and root mean square error (logRMSE). The values along the axes are represented with a logarithmic transformation

² ISRIC – World Soil Information, URL: <https://files.isric.org/soilgrids/latest/data/>.

0,46 ($p < 0,01$), CCC – 0,63, logRMSE – 0,88 (RMSE $\pm 1,41$ г/кг) в отличие от рандомизированной, где $R^2_{cv} = 0,68$ ($p < 0,01$), CCC – 0,81, logRMSE – 0,68 (RMSE $\pm 0,97$ г/кг). Достаточный контраст между результатами перекрестной проверки предостерегает от чрезмерно оптимистичной оценки точности прогнозирования с помощью традиционно используемой рандомизированной (непространственной) перекрестной проверки. Следует также добавить, что средняя точность моделирования (RMSE) содержания органического углерода почв в рамках проекта SoilGrids 2.0 составила $\pm 3,96$ г/кг почвы. На приведенных графиках можно наблюдать, что прогнозируемые низкие значения содержания органического углерода почв оказываются слегка завышенными, в то время как прогнозируемые высокие значения оказываются заниженными по сравнению с истинными.

Эффективность применения ансамблевого машинного обучения и пространственной кросс-валидации превосходит эффективность применения одиночного метода моделирования. Так, при сравнении стековой регрессии и ансамбля дере-

вьев решений для последнего получены менее точные результаты: $R^2_{cv} = 0,44$ ($p < 0,01$), CCC – 0,60, logRMSE – 0,90 (RMSE $\pm 1,55$ г/кг). По результатам стековой регрессии получено, что в целом из трех используемых нулевых алгоритмов больший вес при обобщении отдается ансамблю деревьев решений, за которым следуют бустинг и линейная модель. Стековое обобщение не позволяет оценить важность используемых независимых переменных, так как представлено совокупностью различных моделей. В этом случае мы обучили одиночную модель на основе ансамбля деревьев решений (в совокупности с 5-кратной пространственной проверкой), так как ему отдавалось большее предпочтение при объединении.

На рис. 3 отражен ряд независимых переменных, использованных в процессе моделирования. Ось абсцисс на графике показывает значимость: чем выше значение, тем важнее переменная. Глубина является важнейшей переменной в моделировании содержания органического углерода почв. Это объясняется довольно высоким его варьированием с глубиной для различных почв.

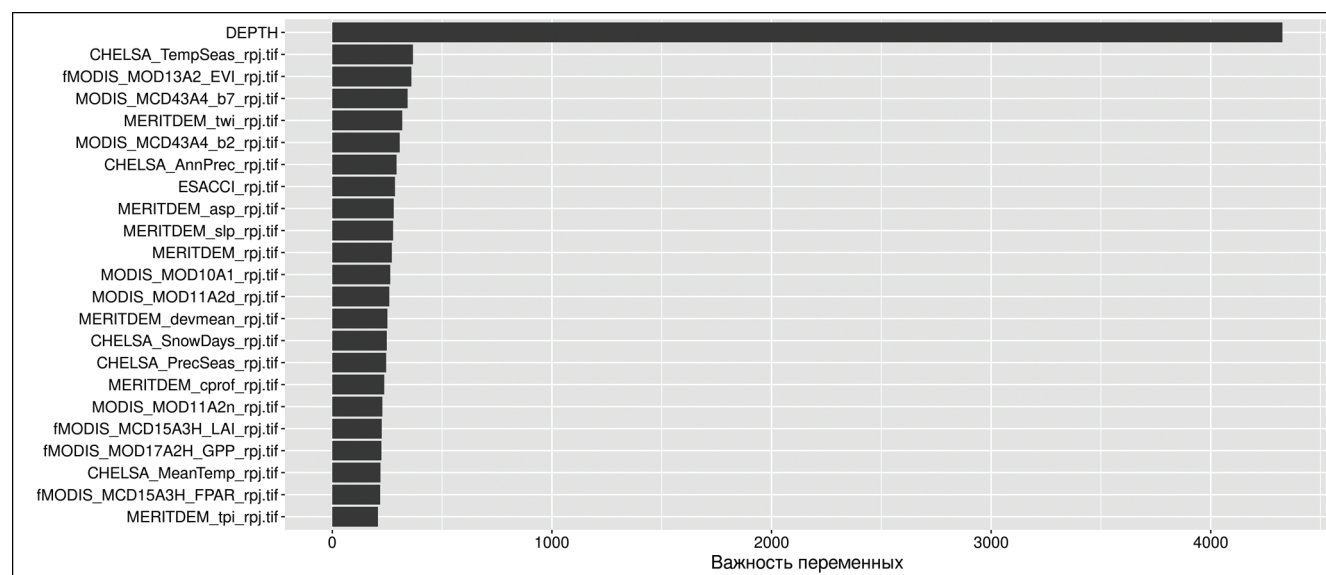


Рис. 3. График важности переменных (предикторов) при моделировании содержания органического углерода почв.

Ось абсцисс на графике отражает значимость: чем выше значение, тем важнее переменная (CHELSA_* – биоклиматические переменные; MERITDEM_* – переменные рельефа; MODIS_* – данные дистанционного зондирования и производные от них; ECASSI – характер наземного покрова; DEPTH – глубина профиля почв)

Fig. 3. Variable importance of predictors during modeling of organic carbon content in soils.

The abscissa displays the importance: the higher the value, the more important is a covariate (CHELSA_* – bioclimatic variables; MERITDEM_* – terrain variables; MODIS_* – remote sensing data; ECASSI – land cover; DEPTH – soil profile depth)

Следующей по степени важности следует одна из биоклиматических переменных CHELSA Climate, а именно сезонность температур, которая отражает величину изменения температуры на основе стандартного отклонения средних месячных темпера-

тур (показатель изменения температуры в течение года). Климат оказывает непосредственное воздействие на накопление углерода в почвах через их увлажнение осадками, промачивание почвы, нагревание и охлаждение, но и также оказывает косвенное

воздействие на растительный и животный мир, т. е. обуславливает тип растительности, количество первичной продукции, темпы создания и разложения органического вещества, состав и интенсивность деятельности почвенной микрофлоры, которая участвует в процессах разложения растительных остатков, гумификации и консервации компонентов опада. Как правило, более низкие температуры способствуют накоплению органического углерода почв, так как в этих условиях скорость аккумуляции выше, чем скорость разложения или миграции.

Далее, в порядке ранжирования переменных по важности следует долгосрочный усредненный вегетационный индекс EVI, отражающий биомассу растительного покрова. Определенные растительные формации характеризуются своими особенностями в составе органического вещества, в поступлении его в почву, в процессах его разложения и во взаимодействии продуктов распада с минеральной частью почвы. Интенсивность процессов аккумуляции / разложения зависит от состава растительности и масштабов ее продуктивности, природных условий трансформации растительных остатков (климата, рельефа, гидрологических условий), что и обуславливает формирование почв с различным содержанием органического углерода.

В десятку наиболее важных переменных при моделировании также входят: 2-й (NIR) и 7-й (MIR)

каналы спектрорадиометра MODIS и ряд производных от цифровой модели рельефа (топографический индекс влажности, экспозиция и крутизна склонов).

Изменчивость содержания органического углерода почв с глубиной. Распределение содержания органического углерода почв в интервале глубин 0–5 см представлено на рис. 4. В целом среднее значение содержания органического углерода почв закономерно увеличивается с юга на север, вплоть до северо-таежной подзоны. Максимум содержания органического углерода почв в указанном интервале приходится на перегнойно-темногумусовые (АН), грубогумусовые (АО), гумусово-слаборазвитые (W), подстильно-торфяные (О, Ооа, Oh) и торфяные (Т, ТО, ТЕ, ТJ) горизонты со значениями от 100 до 301 г/кг. Рассматривая зональное распределение, можно сказать, что наибольшее содержание органического углерода почв в интервале глубин 0–5 см характерно для почв подзоны средней тайги, почв тундровой зоны и почв северо-таежной подзоны. При этом для азиатской части страны, по сравнению с европейской, пространственное распределение содержания органического углерода почв несколько сложнее. Связано это с неблагоприятным проявлением экстроконтинентального климата, наличием вечной мерзлоты и неудовлетворительными условиями

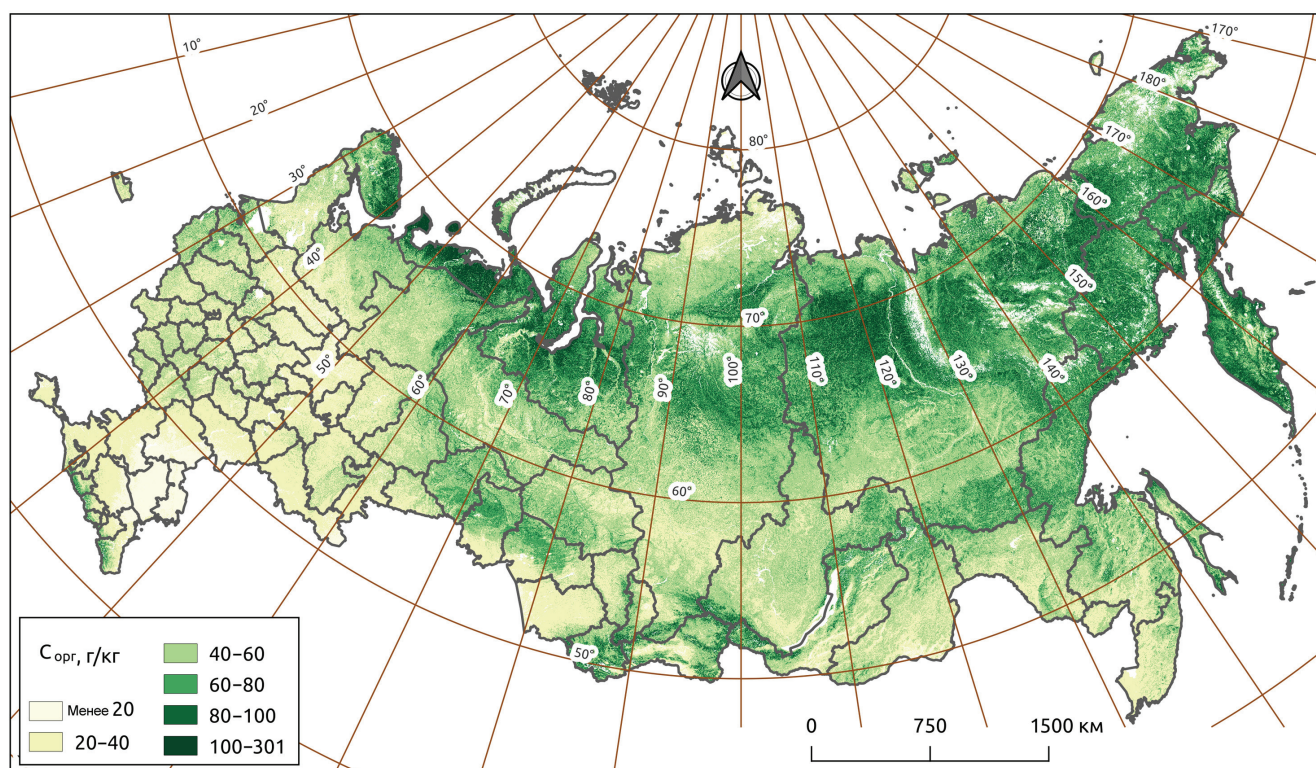


Рис. 4. Содержание органического углерода почв в интервале глубин 0–5 см

Fig. 4. Content of soil organic carbon in the depth range of 0–5 cm

разложения растительного опада. Эти факторы приводят к аккумуляции и консервации органического вещества на поверхности почвы. Европейская часть страны характеризуется более мягким и теплым климатом, влажность и температура оптимальнее для активного течения биологических процессов, что проявляется в ежегодном поступлении в почву растительных остатков и быстром их разложении. В районах проявления вертикальной зональности – в горных провинциях (Большой Кавказ, горные области Сибири и Дальнего Востока) из-за изменений климатических условий проявляется замедленность процессов гумификации и накопление слабогумифицированных соединений, придающих грубый характер органическому веществу. Содержание органического углерода в поверхностных горизонтах таких почв (некоторые типы литоземов (грубогумусированные) и слабо-развитых почв) может достигать 100 и более г/кг.

Анализируя распределение содержания органического углерода почв в интервале 5–15 см (рис. 5), можно сказать, что прослеживается четкая закономерность изменения содержания исследуемого свойства в широтном ряду автоморфных почв, что особенно отчетливо выражено для европейской части РФ, представленной, главным образом, равнинными территориями. Содержание органического углерода растет от подзолистых почв северной и средней тайги (10–20 г/кг) до черноземов глинисто-иллювиальных (40–60 г/кг). Далее, при движении на юг содержание органического углерода почв постепенно уменьшается до минимального уровня у бурых аридных почв (5–10 г/кг), но при движении к побережью Черного моря вновь повышается. Подобная картина может нарушаться в регионах с широким распространением гидрометаморфических почв, торфоземов и торфяных почв с высоким содержанием органического углерода почв.

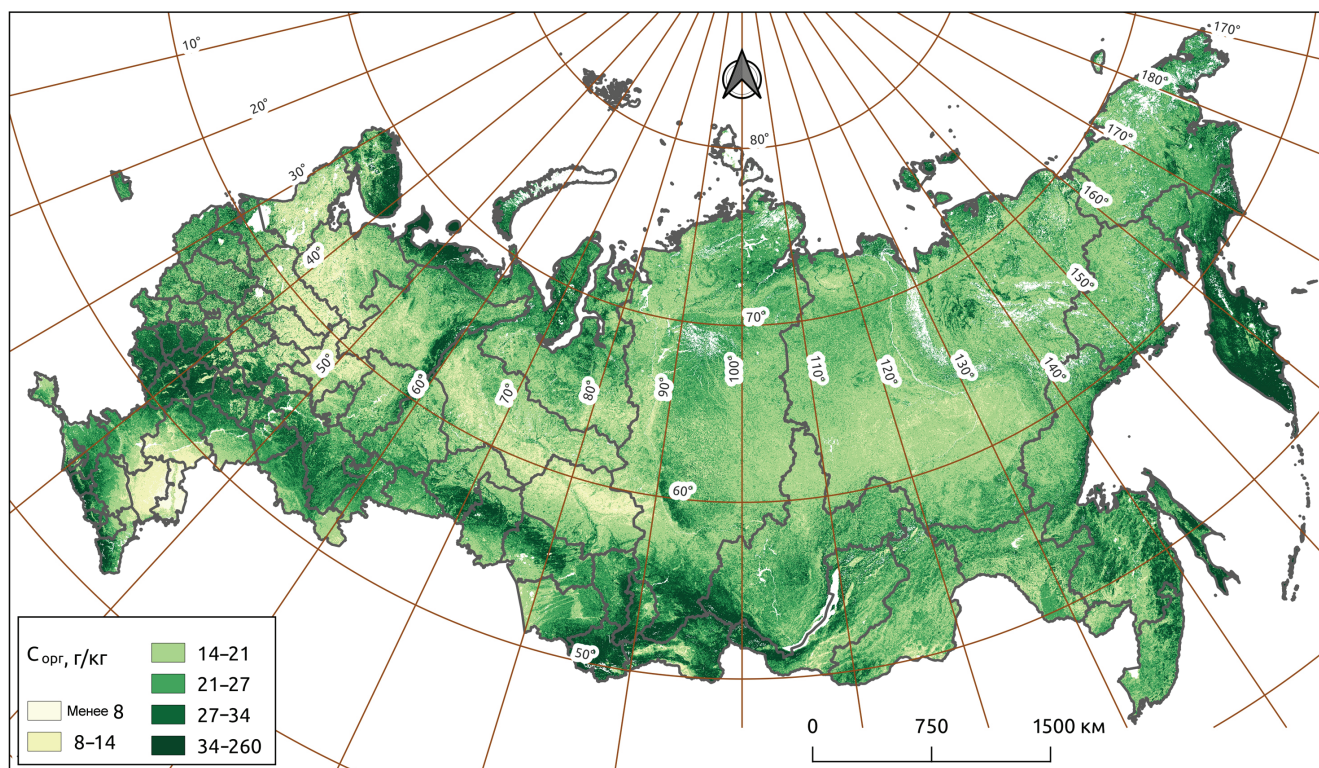


Рис. 5. Содержание органического углерода почв в интервале глубин 5–15 см

Fig. 5. Content of soil organic carbon in the depth range of 5–15 cm

При анализе азиатской части РФ не наблюдается подобной четко выраженной закономерности широтного распределения содержания органического углерода почв. В первую очередь это связано с влиянием экстремально континентального климата, во вторую – с наличием горных областей и проявлением вертикальной зональности. В южной части Западно-Сибирской равнины возможно проследить за-

кономерное увеличение содержания органического углерода почв равнинных территорий (в пределах верхних дерновых или гумусово-аккумулятивных горизонтов) от подзолистых (10–20 г/кг) и дерново-подзолистых (20–35 г/кг) почв до черноземов (40–50 г/кг), и затем уменьшение содержания в каштановых почвах (15–20 г/кг) на границе с северным Казахстаном. Для Среднесибирского плоскогорья

и территории, простирающейся далее на восток, характерны как высокие значения содержания органического углерода почв (50–200 г/кг, Колымская низменность с глееземами, побережье Охотского и Японского морей с буроземами, вулканические почвы Камчатки), так и низкие значения (менее 10 г/кг) – палевые почвы Центральной Якутии. Нельзя не отметить и широкое распространение почв горных провинций, которые занимают значительную территорию азиатской части РФ (Алтай, Саяны, нагорья Забайкалья, хребты и нагорья Якутии и Чукотки, Сихотэ-Алинь) и могут характеризоваться высоким содержанием органического углерода (более 100 г/кг).

Анализируя распределение содержания органического углерода почв по профилю, нужно отметить его неодинаковое распределение. Для одних почв характерно его максимальное содержание в верхней части профиля и резкое уменьшение с глубиной (подзолистые, дерново-подзолистые, темногумусово-глеевые почвы). Для некоторых почв характерно постепенное убывание содержания углерода почв (черноземы, каштановые почвы). Подобная разница в распределении связана не столько с масштабами поступления в почву растительного опада, сколько с характером его локализации. В первую очередь это проявляется при сравнении лесных и травянистых формаций. Также встречаются почвы с бимодаль-

ным распределением содержания органического углерода – с двумя максимумами. Второй максимум связан с процессами иллювиирования водорастворимых органических соединений из верхнего органогенного горизонта. Подобное распределение свойственно, например, иллювиально-гумусовым подзолам Средней и Восточной Сибири, Карелии. Встречаются почвы с полимодальным распределением содержания органического углерода почв по профилю, в которых наблюдается своеобразная «этажность» – залегание серии погребенных профилей. Примером таких почв являются вулканические почвы Камчатки и Курильских островов.

Ошибка прогнозирования. На рис. 6 показан пример карты, иллюстрирующий ошибку прогнозирования. Средняя ошибка прогнозирования в интервале глубин 0–5 см составляет $\pm 3,1$ г/кг. Области с наименьшим количеством точек наблюдений обладают наибольшей неопределенностью. Ошибка прогнозирования также больше в областях наибольшего удаления от точек наблюдений, т. е. в областях экстраполяции. Западно-Сибирская равнина, Средне-Сибирское плоскогорье, Приленское плато являются крупными районами, для которых доступно малое количество профилей и данных по структуре почв, поэтому здесь ошибка выше из-за большего интерквартильного размаха прогнозирования, чем в европейской части РФ. Большая ошибка

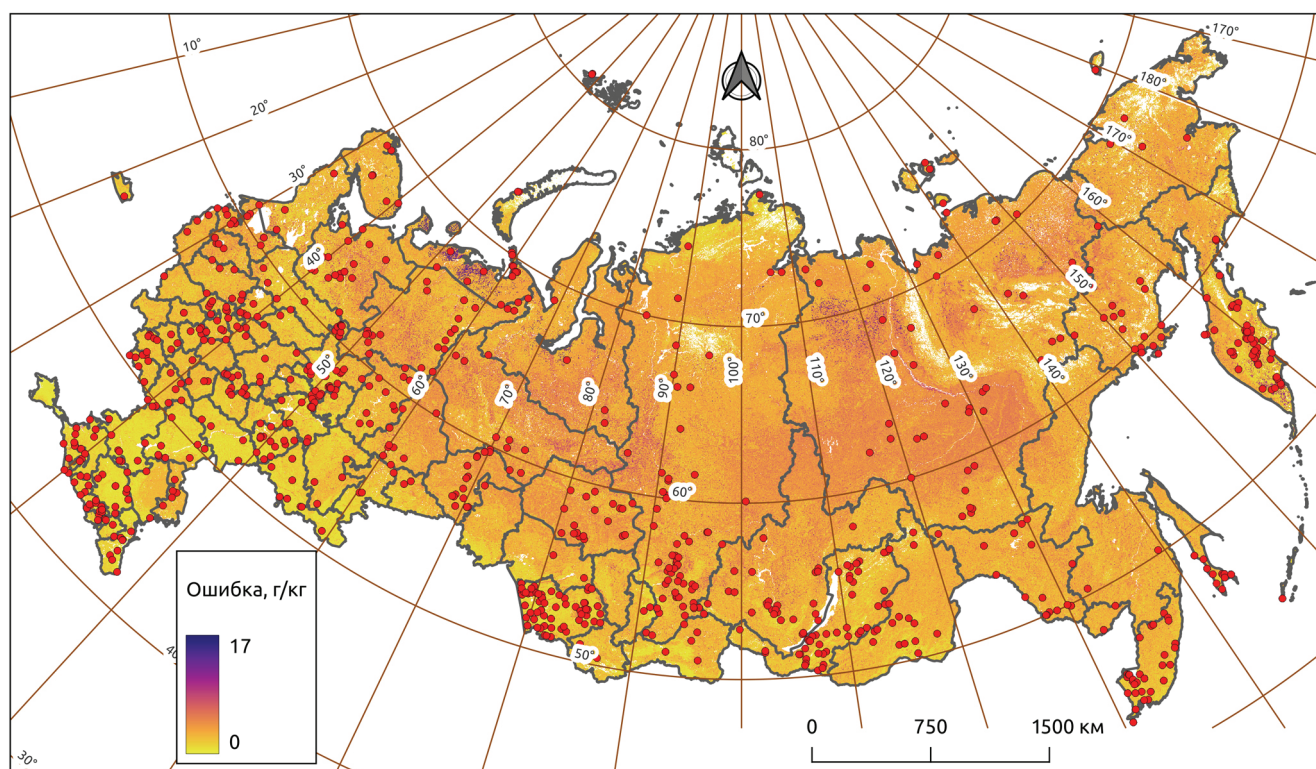


Рис. 6. Карта ошибки прогнозирования содержания органического углерода почв в интервале глубин 0–5 см
Fig. 6. Map of prediction error for soil organic carbon content in the depth range of 0–5 cm

также характерна для областей, где высокие значения единичных наблюдений не могут быть объяснены переменными-предикторами (северная часть Ненецкого автономного округа, к примеру). Интересным также представляется тот факт, что неопределенность прогнозирования больше для регионов с большим диапазоном содержания органического углерода. Здесь лучшие результаты моделирования получены для регионов с более узким диапазоном исследуемого свойства.

Сравнение с существующими почвенными картами. В таблице отражены результаты сравнения карт. Эталонные значения представлены в процентах содержания гумуса, поэтому значения сравниваемых карт были пересчитаны в идентичные величины. Сравнивались карты на одинаковых интервалах глубин, при этом для дерново-подзолистых и серых лесных почв анализировался интервал 5–15 см (так как серогумусовый горизонт АУ указанных типов почв может иметь в верхней своей части подгоризонт с примесью слаборазложившихся растительных остатков, за счет чего общее содержание углерода почв может достигать 80–100 г/кг), для всех остальных почв интервал 0–5 см. По результатам можно отметить, что и средние, и медианные значения содержания гумуса почв (по всем рассматриваемым разностям) составленных нами карт значительно ближе к эталонным. Карты, полученные в рамках проекта SoilGrids 2.0, показывают значительное смещение в сторону увеличения содержания гумуса почв. По-видимому, это объясняется тем, что в рамках проекта используется большое количество разнокачественных данных национального и локального уровней, комбинация которых приводит к подобным ошибкам.

Необходимо отметить также значительное расхождение максимальных значений по сравнению с эталонными. В случае с полученными картами это можно объяснить тем, что использованная для сравнения карта мелкого масштаба составлялась путем пространственной генерализации почвенного покрова, при которой ареалы почв, определяющие специфичность территории, не выдерживали масштабного уменьшения. К тому же, как уже отмечалось ранее, выделы использованной для сравнения карты могут быть сложными и содержать до трех сопутствующих почв, содержание органического углерода в которых может быть действительно большим. Так, к примеру, в пределах азиатской части страны (горная Алтайско-Саянская провинция (e_2)) среди каштановых почв сухих и опустыненных степей, занимающих межгорные котловины, на склонах хребтов (в зависимости от абсолютных высот) встречаются горные черноземы (выщелоченные и типичные), горно-луговые и горные лу-

гово-степные почвы, которые характеризуются действительно большими значениями содержания органического углерода и определяют специфичность территории. С большим разбросом значений для серых лесных почв может наблюдаться подобная картина. Это может объясняться переходным положением данных почв между таежно-лесной и лесостепной зонами. Поэтому в структуре почвенного покрова могут встречаться сложные контрастные сочетания и комплексы серых лесных, серых лесных глеевых, луговых и лугово-болотных почв, солодей.

Нами также было проведено сравнение плотности распределения (probability density function – PDF) для различных карт. Для этого из каждой точки наблюдения извлекались значения содержания органического углерода почв ряда сравниваемых карт в интервале 0–100 см. На рис. 7 приведены графики плотности распределения не только сравниваемых карт, но и графики исходных и модельных значений. Исходя из полученных графиков плотности распределения, можно отметить заметный сдвиг распределения значений органического углерода почв согласно данным SoilGrids 2.0 в сторону больших значений. Распределение значений органического углерода почв тестируемых карт ближе к истинному, хотя можно отметить, что низкие значения содержания органического углерода оказываются слегка завышенными, в то время как высокие значения – заниженными.

Вместе с тем полученные нами карты не лишены недостатков. Один из самых значимых – значительно заниженные результаты содержания органического углерода почв Западно-Сибирской низменности с большими ареалами органогенных торфяных почв (междуречье Оби и Иртыша, Васюганская равнина). Ожидается, что содержание органического углерода в таких почвах будет превышать 350 г/кг на всех рассматриваемых интервалах глубин (и даже глубже). Что, однако, не находит отражение на полученных нами картах. Это связано с недостаточным и ограниченным количеством профилей органогенных торфяных почв в составе исходной базы данных и, следовательно, недостатком их в составе обучающей выборки при моделировании. Следовательно, для этих областей результаты прогнозирования имеют ограниченное использование. Заниженными также оказываются результаты прогнозирования для верхних перегнойно-темногумусовых (АН), грубогумусовых (АО), гумусово-слаборазвитых (W), подстилочно-торфяных (О, Ооа, Oh) горизонтов почв, для которых содержание органического углерода должно быть выше 350 г/кг, но на полученных картах не превышает 301 г/кг. Аналитических данных по профилям почв севернее

Таблица

Результаты сравнения полученных карт с картами проекта SoilGrids 2.0

Наименование почв в терминах ЕГРПР	Содержание гумуса согласно ЕГРПР (эталонные значения), %	Содержание гумуса согласно полученным картам (статистика), %						Содержание гумуса согласно картам SoilGrids 2.0 (статистика), %					
		Минимум	1-й кв.	Медиана	Среднее	3-й кв.	Максимум	Минимум	1-й кв.	Медиана	Среднее	3-й кв.	Максимум
Дерново-подзолистые	3–7 (целина), 1–2,5 (пашня)	0,50	2,85	3,52	3,72	4,34	28,28	2,64	9,1	11,77	13,4	16,9	42,19
Серые лесные	4–8	1,24	3,69	4,39	4,45	5,12	27,93	2,49	6,72	7,83	8,17	9,26	28,76
Черноземы типичные	8–12	2,07	5,52	6,21	6,21	6,90	15,69	5,16	12,22	15,00	15,03	17,50	28,03
Черноземы южные	3–6	1,21	3,79	4,48	4,47	5,00	13,45	5,41	9,67	10,95	11,46	12,64	33,27
Каштановые	2–4	1,03	2,93	3,62	4,17	4,83	23,45	4,12	9,15	11,60	11,98	14,05	39,31
Бурые полупустынные	0,7–1,4	0,69	1,21	1,38	1,60	2,07	4,48	4,31	6,79	7,55	7,89	8,67	24,71

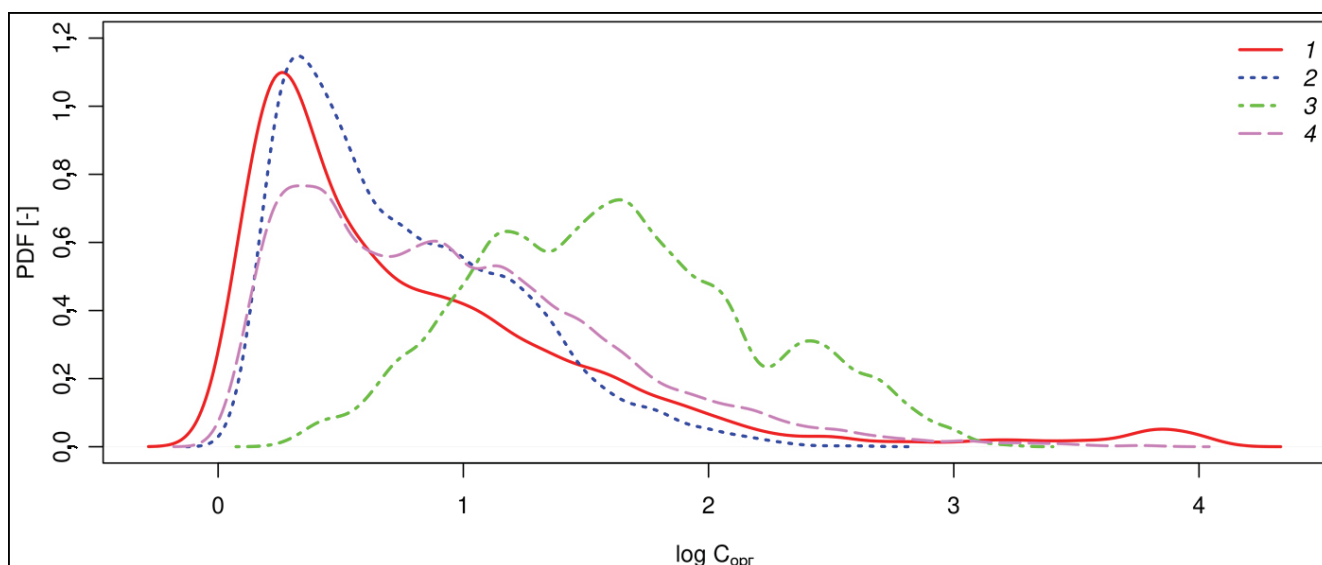


Рис. 7. Сравнение графиков плотности распределения значений органического углерода почв:
1 – наблюдаемые значения ЕГРПР; 2 – полученная модель; 3 – данные SoilGrids 2.0 (0–100 см) [Poggio et al., 2021];
4 – тестируемые карты (0–100 см)

Fig. 7. Comparison of probability density functions of soil organic carbon:
1 – the observed values; 2 – the resulting model; 3 – the SoilGrids 2.0 data (0–100 cm) [Poggio et al., 2021];
4 – the tested maps (0–100 cm)

60° с. ш. оказывается недостаточно для адекватного прогнозирования содержания органического углерода почв в пределах указанных горизонтов. Решение данных проблем кроется в получении новых репрезентативных профильных данных, в первую очередь для недостаточно представленных регионов. Вероятно, при моделировании следует использовать и другие ковариаты, которые могут помочь объяснить и спрогнозировать пространственные изменения содержания органического углерода почв.

ВЫВОДЫ

Результаты пространственной кросс-валидации показали меньшую (при сравнении с рандомизированной) точность: коэффициент детерминации – 0,46, CCC – 0,63, logRMSE – 0,88 (RMSE – 1,41 г/кг).

Глубина профиля оказалась наиболее важной переменной при моделировании содержания органического углерода почв, за которой следуют биоклиматическая переменная (сезонность температур) и долгосрочный усредненный вегетационный индекс EVI.

По результатам моделирования выявлено, что области с наименьшим количеством точек наблюдений обладают наибольшей неопределенностью. Ошибка прогнозирования также больше в областях наибольшего удаления от точек наблюдений, т. е. в областях экстраполяций.

Полученные результаты являются отправной точкой при расчете запасов органического углерода почв, где, помимо содержания углерода, необходима также информация об объемной массе почв, их каменистости и мощности слоя.

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ 19-05-50063, а также при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бирюкова О.Н., Бирюков М.В. Содержание органического углерода в верхних горизонтах почв // Национальный атлас почв Российской Федерации. Москва: Астрель-АСТ, 2011а. С. 230–231.
- Бирюкова О.Н., Бирюков М.В. Запасы органического углерода в почвах // Национальный атлас почв Российской Федерации. М.: Астрель-АСТ, 2011б. С. 242–243.
- Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю. Современные тренды и проблемы почвенной картографии // Почвоведение. 2019. Т. 52. № 5. С. 517–528. DOI: 10.1134/S1064229319050107.
- Конюшков Д.Е., Ананко Т.В., Герасимова М.И., Лебедева И.И. Актуализация содержания почвенной карты РСФСР масштаба 2,5 млн в формате классификации почв России для создания новой цифровой карты //

- Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. № 102. С. 21–48. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-102-21-48.
- Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щепаченко Д.Г. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2021. Т. 54. № 3. С. 325–336. DOI: 10.1134/S1064229321030042.
- Щепаченко Д.Г., Мухоморова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. Т. 46. № 2. С. 107–116. DOI: 10.1134/S1064229313020129.
- Breiman L. Stacked regressions, *Mach. Learn.*, 1996, vol. 24, no. 1, p. 49–64, DOI: 10.1007/bf00117832.
- Brenning A. Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2005, vol. 5, no. 6, p. 853–862, DOI: 10.5194/nhess-5-853-2005.
- FAO. Global Soil Organic Carbon Map (GSOC map) Technical Report, 2018, FAO, Rome, 162 p.
- Gomes L.C., Faria R.M., Souza de E., Veloso G.V., Schaefer C.E.G.R., Filho E.I.F. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil, *Geoderma*, 2019, vol. 340, p. 337–350, DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.01.007.
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sens. Environ.*, 2017, vol. 202, p. 18–27, DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- Griscom B.W., Adams J., Ellis P.W., Houghton R.A., Lomax G., Miteva D.A., Schlesinger W.H., Shoch D., Siikamäki J.V., Smith P. et al. Natural climate solutions, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2017, vol. 114, no. 44, p. 11645–11650.
- Laan van der M.J., Polley E.C., Hubbard A.E. Super Learner, *Stat. Appl. Genet. Mol. Biol.*, 2007, vol. 6, no. 1, p. 1–23.
- Liang Z., Chen S., Yang Y., Zhou Y., Shi Z. High-resolution three-dimensional mapping of soil organic carbon in China: Effects of SoilGrids products on national modeling, *Sci. Total Environ.*, 2019, vol. 685, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.332.
- Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B., Laslett G.M. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity, *Geoderma*, 2009, vol. 154, no. 1–2, p. 138–152, DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.10.007.
- McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B. On digital soil mapping, *Geoderma*, 2003, vol. 117, no. 1–2, p. 3–52.
- Meinshausen N. Quantile Regression Forests, *J. Mach. Learn. Res.*, 2006, vol. 7, p. 983–999.
- Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.S., Cheng K., Das B.S. et al. Soil carbon 4 per mille, *Geoderma*, 2017, vol. 292, p. 59–86, DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.01.002.
- Poggio L., De Sousa L.M., Batjes N.H., Heuvelink G.B.M., Kempen B., Ribeiro E., Rossiter D. SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty, *Soil*, 2021, vol. 7, no. 1, p. 217–240, DOI: 10.5194/soil-7-217-2021.
- Rozhkov V.A., Wagner V.B., Kogut B.M., Konyushkov D.E., Nilsson S., Sheremet V.B., Shvidenko A.Z. Soil Carbon Estimates and Soil Carbon Map for Russia, *Analysis*, 1996, p. 1–44.
- Scharlemann J.P.W., Tanner E.V.J., Hiederer R., Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool, *Carbon Manag.*, 2014, vol. 5, no. 1, p. 81–91, DOI: 10.4155/cmt.13.77.
- Stolbovoi V. Carbon in Russian soils, *Clim. Change*, 2002, vol. 55, no. 1–2, p. 131–156.
- Szatmári G., Pásztor L., Heuvelink G.B.M. Estimating soil organic carbon stock change at multiple scales using machine learning and multivariate geostatistics, *Geoderma*, 2021, vol. 403, DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115356.
- Taghizadeh-Mehrjardi R., Hamzehpour N., Hassanzaadeh M., Heung B., Ghebleh Goydaragh M., Schmidt K., Scholten T. Enhancing the accuracy of machine learning models using the super learner technique in digital soil mapping, *Geoderma*, 2021, vol. 399, p. 115108, DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115108.
- Zhang Y., Ji W., Saurette D.D., Easher T.H., Li H., Shi Z., Adamchuk V.I., Biswas A. Three-dimensional digital soil mapping of multiple soil properties at a field-scale using regression kriging, *Geoderma*, 2020, vol. 366, p. 114253, DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114253.
- Zhou T., Geng Y., Ji C., Xu X., Wang H., Pan J., Bumberger J., Haase D., Lausch A. Prediction of soil organic carbon and the C:N ratio on a national scale using machine learning and satellite data: A comparison between Sentinel-2, Sentinel-3 and Landsat-8 images, *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 755, p. 142661, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142661.

Электронный ресурс

Hengl T., MacMillan R.A. Predictive Soil Mapping with R. OpenGeoHub foundation, Wageningen, the Netherlands, 2019, URL: <http://www.soilmapper.org> (дата обращения 30.10.2021).

Recarbonization of global soils – A tool to support the implementation of the Koronivia Joint Work on Agriculture, 2020, URL: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca6522en/> (дата обращения 30.10.2021).

Поступила в редакцию 21.11.2021

После доработки 05.03.2022

Принята к публикации 13.05.2022

ESTIMATION OF ORGANIC CARBON CONTENT IN RUSSIAN SOILS USING ENSEMBLE MACHINE LEARNING

A.V. Chinilin¹, I.Yu. Savin²

¹FRC "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute", Department of soil genesis, geography and classification

²Institute of Environmental Engineering, Peoples Friendship University of Russia (RUDN University),
Department of environmental management

¹Ph.D. in Biology; email: andrey.chinilin@yandex.ru

²D.Sc. in Agriculture, Professor, Academician of the RAS; email: savigory@gmail.com

The study presents a modern quantitative assessment of the content of organic carbon in Russian soils, taking into account their huge variety, and reflects the understanding of individual factors regulating and controlling the content of organic carbon in soils of the country. The paper gives the results of three-dimensional modeling of organic carbon content in soils at several standard depths (0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 cm) for the territory of the Russian Federation with 500 m spatial resolution using the ensemble machine learning. Automated predictive mapping was based on 4 961 soil horizons from 863 soil profiles, as well as on the extensive set of spatial information, including bioclimatic variables, digital elevation model and its derivatives, and the long-term averaged time series of MODIS data. An ensemble machine learning algorithm (stacking, stacked generalization and stacked regression) was used to build models of spatial and vertical distribution. The accuracy of obtained cartographic models was assessed using spatial cross-validation. The results of spatial cross-validation show lower accuracy: the coefficient of determination is 0,46, CCC – 0,63, logRMSE – 0,88 (RMSE – 1,41 g/kg) compared to randomize (R^2_{cv} – 0,68, CCC – 0,81, logRMSE – 0,68 (RMSE – 0,97 g/kg)). The proposed quantitative assessment is fully automated and makes it possible to reproduce the modeling and refine the results as new soil data are obtained.

Keywords: soil cover, spatial modeling, stacked regression, spatial cross-validation

Acknowledgments. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 19-05-50063), and by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program.

REFERENCES

- Biryukova O.N., Biryukov M.V. [Soil organic carbon stocks], *Natsional'nyi atlas pochv Rossiiskoi Federatsii* [National Atlas of Soils of the Russian Federation], Moscow, Astrel', AST Publ., 2011b, p. 242–243. (In Russian)
- Biryukova O.N., Biryukov M.V. [The content of organic carbon in the upper horizons of soils], *Natsional'nyi atlas pochv Rossiiskoi Federatsii* [National Atlas of Soils of the Russian Federation], Moscow, Astrel', AST Publ., 2011a, p. 230–231. (In Russian)
- Breiman L. Stacked regressions, *Mach. Learn.*, 1996, vol. 24, no. 1, p. 49–64. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00117832>.
- Brenning A. Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2005, vol. 5, no. 6, p. 853–862, DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-5-853-2005>.
- Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Schepaschenko D.G. Integrated Approach to Spatial Assessment of Soil Organic Carbon in the Russian Federation, *Eurasian Soil Sci.*, 2021, vol. 54, no. 3, p. 325–336, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229321030042>.
- FAO. *Global Soil Organic Carbon Map (GSOC map)*, Technical Report, 2018, FAO, Rome, 162 p.
- Gomes L.C., Faria R.M., Souza de E., Veloso G.V., Schaefer C.E.G.R., Filho E.I.F. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil, *Geoderma*, 2019, vol. 340, p. 337–350, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.007>.
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sens. Environ.*, 2017, vol. 202, p. 18–27, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- Griscom B.W., Adams J., Ellis P.W., Houghton R.A., Lomax G., Miteva D.A., Schlesinger W.H., Shoch D., Sikkamäki J.V., Smith P. et al. Natural climate solutions, *Proc. Natl. Acad. Sci., U.S.A.*, 2017, vol. 114, no. 44, p. 11645–11650.
- Konyushkov D.E., Ananko T.V., Gerasimova M.I., Lebedeva I.I. Actualization of the contents of the soil map of Russian Federation (1 : 2,5 M scale) in the format of the classification system of Russian soils for the development of the new digital map of Russia, *Dokuchaev Soil Bull.*, 2020, no. 102, p. 21–48, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-21-48>.
- Laan van der M.J., Polley E.C., Hubbard A.E. Super Learner, *Stat. Appl. Genet. Mol. Biol.*, 2007, vol. 6, no. 1, p. 1–23.
- Liang Z., Chen S., Yang Y., Zhou Y., Shi Z. High-resolution three-dimensional mapping of soil organic carbon in China: Effects of SoilGrids products on national modeling, *Sci. Total Environ.*, 2019, vol. 685, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.332>.
- Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B., Laslett G.M. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity, *Geoderma*, 2009, vol. 154, no. 1–2, p. 138–152, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.10.007>.

- McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B. On digital soil mapping, *Geoderma*, 2003, vol. 117, no. 1–2, p. 3–52.
- Meinshausen N. Quantile Regression Forests, *J. Mach. Learn. Res.*, 2006, vol. 7, p. 983–999.
- Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.S., Cheng K., Das B.S. et al. Soil carbon 4 per mille, *Geoderma*, 2017, vol. 292, p. 59–86, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>.
- Poggio L., De Sousa L.M., Batjes N.H., Heuvelink G.B.M., Kempen B., Ribeiro E., Rossiter D. SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty, *SOIL*, 2021, vol. 7, no. 1, p. 217–240, DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>.
- Rozhkov V.A., Wagner V.B., Kogut B.M., Konyushkov D.E., Nilsson S., Sheremet V.B., Shvidenko A.Z. Soil Carbon Estimates and Soil Carbon Map for Russia, *Analysis*, 1996, p. 1–44.
- Savin I.Y., Zhogolev A.V., Prudnikova E.Y. Modern Trends and Problems of Soil Mapping, *Eurasian Soil Sci.*, 2019, vol. 52, no. 5, p. 471–480, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319050107>.
- Scharlemann J.P.W., Tanner E.V.J., Hiederer R., Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool, *Carbon Manag.*, 2014, vol. 5, no. 1, p. 81–91, DOI: 10.4155/cmt.13.77.
- Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Mukhortova L.V., Vetrova E.F. The pool of organic carbon in the soils of Russia, *Eurasian Soil Sci.*, 2013, vol. 46, no. 2, p. 107–116, DOI: 10.1134/S1064229313020129.
- Stolbovoi V. Carbon in Russian soils, *Clim. Change*, 2002, vol. 55, no. 1–2, p. 131–156.
- Szathmári G., Pásztor L., Heuvelink G.B.M. Estimating soil organic carbon stock change at multiple scales using machine learning and multivariate geostatistics, *Geoderma*, 2021, vol. 403, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115356>.
- Taghizadeh-Mehrjardi R., Hamzehpour N., Hassanzadeh M., Heung B., Ghebleh Goydaragh M., Schmidt K., Scholten T. Enhancing the accuracy of machine learning models using the super learner technique in digital soil mapping, *Geoderma*, 2021, vol. 399, p. 115108, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115108>.
- Zhang Y., Ji W., Saurette D.D., Easher T.H., Li H., Shi Z., Adamchuk V.I., Biswas A. Three-dimensional digital soil mapping of multiple soil properties at a field-scale using regression kriging, *Geoderma*, 2020, vol. 366, p. 114253, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114253>.
- Zhou T., Geng Y., Ji C., Xu X., Wang H., Pan J., Bumberger J., Haase D., Lausch A. Prediction of soil organic carbon and the C:N ratio on a national scale using machine learning and satellite data: A comparison between Sentinel-2, Sentinel-3 and Landsat-8 images, *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 755, p. 142661, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142661>.

Web-source

- Hengl T., MacMillan R.A. Predictive Soil Mapping with R. OpenGeoHub foundation, Wageningen, the Netherlands, 2019, URL: <http://www.soilmapper.org> (access date 30.10.2021).

Received 21.11.2021

Revised 05.03.2022

Accepted 13.05.2022

ГЕОГРАФИЯ ГОРОДОВ

УДК 551.588.7

ОСОБЕННОСТИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ Г. НАДЫМА ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

М.И. Варенцов¹, И.А. Репина², А.В. Глазунов³, Т.Е. Самсонов⁴, П.И. Константинов⁵,
В.М. Степаненко⁶, **В.Н. Лыкосов⁷**, А.Ю. Артамонов⁸, А.В. Дебольский⁹,
А.С. Печкин¹⁰, А.В. Соромотин¹¹

^{1, 2, 3, 6, 7, 9} Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова

^{1, 2, 8, 9} Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН

^{1–4, 6, 7} Московский центр фундаментальной и прикладной математики

^{3, 7} Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН

^{1, 4, 5} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

¹⁰ Научный центр исследования Арктики

¹¹ Тюменский научный центр СО РАН, Научно-исследовательский институт экологии и рационального использования природных ресурсов ТюмГУ

¹ Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: mikhail.varentsov@srcc.msu.ru

² Зав. лабораторией взаимодействия атмосферы и океана, д-р физ.-мат. наук; e-mail: repina@ifaran.ru

³ Вед. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук; e-mail: and.glas@gmail.com

⁴ Кафедра картографии и геоинформатики, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: tsamsonov@geogr.msu.ru

⁵ Кафедра метеорологии и климатологии, доц., канд. геогр. наук; e-mail: kostadini@mail.ru

⁶ Зам. директора, д-р физ.-мат. наук; e-mail: stepanen@srcc.msu.ru

⁷ Гл. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук; e-mail: lykosov@yandex.ru

⁸ Лаборатория взаимодействия атмосферы и океана, мл. науч. сотр.; e-mail: sailer@ifaran.ru

⁹ Лаборатория взаимодействия атмосферы и океана, мл. науч. сотр.; e-mail: and.debol@gmail.com

¹⁰ Научно-исследовательский отдел, науч. сотр.; e-mail: a.pechkin.ncia@gmail.com

¹¹ Отдел методологии междисциплинарных исследований криосферы,
гл. науч. сотр., д-р биол. наук; e-mail: a.v.soromotin@utmn.ru

В работе представлены результаты исследования формирования городского острова тепла в небольших городах арктического и субарктического регионов на примере г. Надыма (ЯНАО) в зимний период в условиях устойчивой стратификации атмосферы. В результате трех измерительных кампаний с использованием контактных и дистанционных измерений получены сведения об интенсивности и вертикальной протяженности городского острова тепла. Одновременные измерения профилей температуры и скорости ветра внутри города и за городом показали, что при сильно устойчивой стратификации в городе формируется перемешанный пограничный слой со стратификацией, близкой к нейтральной и высотой порядка 50 м. Для объяснения выявленного феномена было проведено вихреразрешающее моделирование турбулентного течения. В качестве набегающего на город потока использовалось типичное для зимних условий турбулентное течение в квазистационарном устойчиво стратифицированном пограничном слое над плоской поверхностью. Использовалась реальная трехмерная схема городской застройки, полученная на основе базы данных OpenStreetMap и уточненная оценками высот зданий по цифровой модели рельефа (ЦМР) ArcticDEM и полевым наблюдениям их этажности. Результаты моделирования подтвердили формирование в городской среде перемешанного слоя и показали, что одним из важных механизмов образования городского острова тепла у поверхности является механическое перемешивание устойчиво стратифицированной атмосферы. Это подтверждается тем, что турбулентная кинетическая энергия (ТКЭ) в городе по расчетам более чем в 10 раз выше, чем за его границами. Основным источником ТКЭ в городе является ее сдвиговая генерация на высоте зданий при их обтекании. Экспериментальные исследования и теоретические расчеты подтвердили факт существования выраженного городского острова тепла в условиях устойчивой стратификации для небольших полярных городов и позволили впервые оценить высоту его вертикального развития.

Ключевые слова: городской остров тепла, пограничный слой атмосферы, устойчивая стратификация

DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-64-78

ВВЕДЕНИЕ

Городские территории из-за активной антропогенной деятельности и особенностей свойств подстилающей поверхности оказывают существенное воздействие на микроклимат и состояние пограничного слоя атмосферы. Кроме хорошо исследованного эффекта городского острова тепла (далее – ОТ) [Huang, Lu, 2017; Oke et al., 2017; Tzavali et al., 2015, Юшков и др., 2019], города также влияют на облачность, осадки, мезомасштабные циркуляции и загрязнение атмосферы [Han et al., 2014; Varentsov et al., 2018]. Урбанизация оказывает существенное влияние на почву [Lokoshchenko et al., 2015], грунтовые воды [Benz et al., 2016] и растительные сообщества [Esau et al., 2016]. Влияние городов выходит далеко за пределы границ застроенных территорий. Это выражается, в частности, в существовании теплового следа за пределами города [Zhou et al., 2015] – вытянутых по ветру «городских шлейфов» более теплого и загрязненного воздуха, интенсификации конвективных процессов и увеличения сумм осадков с подветренной стороны от города [Han et al., 2014].

Но если для городов, и особенно мегаполисов умеренных и тропических широт, существует значительный объем исследований, в полярных областях до недавнего времени анализ ограничивался небольшим количеством наблюдений для городов Барроу [Hinkel et al., 2003] и Фэрбенкс [Magee et al., 1999] на Аляске, эпизодическими измерениями в российских городах Норильск [Варенцов и др., 2014] и Апатиты [Константинов и др., 2015]. В настоящее время эти данные дополнены продолжительными экспериментальными исследованиями микроклимата городов арктической зоны России (Апатиты, Надым, Новый Уренгой, Салехард и Воркута) в рамках кампании UHIARC (Urban Heat Island Arctic Research Campaign) [Konstantinov et al., 2018; Varentsov et al., 2018], а также данными дистанционного зондирования [Miles, Esau, 2017]. Установлено, что зимой в высоких широтах может формироваться интенсивный ОТ: разность температуры между центром города и загородными территориями может достигать 5–6°C [Konstantinov et al., 2018; Varentsov et al., 2018]. Тем не менее полученные данные характеризуют лишь приземный метеорологический режим, тогда как влияние городской среды на структуру атмосферного пограничного слоя (АПС) для условий высоких широт остается практически неизученным.

Города высоких широт, как правило, невелики по размерам и расположены на слабо заселенных территориях. Известно, что накопление загрязнителей в городской среде определяется не только размещением источников загрязнения. Заметное влияние

оказывают рельеф, структура застройки и метеорологические факторы, определяющие рассеяние и накопление загрязняющих веществ [Baklanov et al., 2008; Регионы..., 2014]. Городские кварталы, особенно многоэтажные, представляют собой сложную, продуваемую на разных уровнях и с разным уклоном воздушными потоками систему поверхностей. Здания сильно изменяют ветровой режим в приземном слое атмосферы [Старченко и др., 2015], создавая участки осаждения пыли в замкнутых дворах и эффект «каньона» на крупных автомагистралях. Этот фактор приводит к значительной неоднородности поля загрязнения городской среды. Соответственно, оценка и прогноз микроклимата и экологической обстановки в городах и их окрестностях тесно связаны с задачей определения статистических характеристик стратифицированных турбулентных течений на масштабах отдельных зданий.

Учет влияния отдельных крупных городов (с характерным горизонтальным размером в несколько десятков километров) на состояние пограничного слоя атмосферы возможен в рамках мезомасштабных моделей атмосферы, таких как COSMO или WRF [Varentsov et al., 2018b; Юшков и др., 2019]. Шаг расчетных сеток по горизонтали в этих моделях составляет от нескольких сотен метров до нескольких километров, что требует использования специальных параметризаций, описывающих особенности обмена теплом, влагой и импульсом между атмосферой и урбанизированной поверхностью [Garuma et al., 2018]. В случае небольших городов такое разрешение становится явно недостаточным.

Одним из инструментов для изучения микромасштабной динамики турбулентных атмосферных течений и переноса примесей в городской среде является численное моделирование с использованием детализированных вихреразрешающих (large eddy simulation – LES) моделей. Задачей таких моделей является проведение расчетов турбулентных течений над идеализированными поверхностями городского типа с целью выяснения общих закономерностей взаимодействия атмосферного пограничного слоя с урбанизированной поверхностью [Anderson et al., 2015], а также для получения сведений об особенностях переноса примесей в городской среде [Li et al., 2016], особенно в условиях устойчивой стратификации [Глазунов и др., 2014а, 2014б].

Последнее время все чаще осуществляются попытки смоделировать турбулентность и перенос загрязнений в областях, имеющих геометрию, приближенную к топографии земной поверхности и архитектуре реальных городов [Giometto et al., 2016; Wang et al., 2018; Geletič et al., 2021]. В большинстве случаев такие расчеты проводятся на предельно грубых сетках, позволяющих только в первом

приближении учесть конфигурацию строений. Как правило, вычисления выполняются при нейтральной или неустойчивой стратификации. Численное моделирование устойчиво стратифицированных турбулентных течений в городской среде, что характерно для полярных городов в зимний период, накладывает дополнительные требования как к качеству LES-моделей и их пространственному разрешению, так и к методикам постановки численного эксперимента [Глазунов, 2014б; Tomas et al., 2016; Li et al., 2016].

В настоящей работе на примере г. Надыма (ЯНАО) представлены результаты исследований влияния города на атмосферные процессы в городских условиях при устойчивой стратификации атмосферы по данным экспериментальных наблюдений и численного моделирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования городского пограничного слоя атмосферы. Важной особенностью зимнего метеорологического режима высоких широт является высокая повторяемость атмосферных инверсий. Долгоживущие устойчивые пограничные слои атмосферы способствуют концентрации загрязняющих веществ вблизи поверхности. При этом воспроизведение таких устойчивых слоев в моделях атмосферы пока затруднено. Проведенные ранее измерения UHIARC показали, что развитие ОТ в арктических городах характерно именно для ясной и безветренной антициклональной погоды, т. е. для условий, способствующих формированию приземных инверсий [Konstantinov et al., 2018; Varentsov et al., 2018]. С целью изучения взаимосвязи термического режима внутри городской застройки и стратификации АПС на фоне развития приземных инверсий с декабря 2018 г. по январь 2021 г. были проведены три интенсивные измерительные кампании в г. Надыме, направленные на получение экспериментальных данных о структуре приземного и пограничного слоя атмосферы.

Первая, наиболее продолжительная и масштабная по программе измерений кампания была проведена в декабре 2018 г. и включала в себя следующие виды наблюдений:

1. Мониторинг температуры в приземном слое атмосферы в городе и его окрестностях проводился с использованием сети из компактных термодатчиков iButton (производство Maxim Integrated) и градиентных термодатчиков Hobo MX2300 2x Ext Temp (производство Onset). Датчики iButton были установлены на ветвях кустов на высоте ≈ 2 м над поверхностью вдоль профиля, проходящего через город и фоновые территории. Градиентные датчики

Hobo были установлены на высотах 1,5 и 3 м над поверхностью в трех точках: в центре города рядом с ранее установленной автоматической метеостанцией UHIARC (рис. 1); на территории метеостанции Росгидромета в аэропорту Надыма и на территории Научного центра изучения Арктики в северной части города.

2. Мониторинг вертикального профиля температуры в фоновых (загородных) условиях выполнялся с использованием микроволнового температурного профилера (сканирующего радиометра) МТР-5 [Kadygrov, Pick, 1998]. Профилер был установлен на территории аэропорта г. Надыма, на крыше контейнера на высоте ≈ 3 м над поверхностью. Вертикальный диапазон измерений составлял от 0 до 1000 м, дискретность по вертикали – 50 м с уменьшением до 25 м в нижнем 100-метровом слое. В точке установки профилера также была размещена AMC Vaisala.

3. Мониторинг компонент радиационного баланса поверхности в фоновых условиях проводился с использованием измерительного комплекса Kipp&Zonen, который был установлен на территории метеостанции Росгидромета в аэропорту.

4. Для мониторинга условий температурной стратификации над городом использовался квадрокоптер DJI Phantom 4 Pro с установленными на нем контактными термодатчиками iMet-XF и iMet-XQ (производство Intermetsystems, США). Точка запуска квадрокоптера располагалась на бульваре Стрижева в южной части города в окружении плотной застройки (см. рис. 1). Вертикальный профиль температуры измерялся в ходе последовательного подъема и спуска квадрокоптера с вертикальной скоростью $\approx 0,5$ м/с (описание методики измерений и анализа данных см. в работах: [Varentsov et al., 2019; 2021; Репина и др., 2020]). Также по данным телеметрии квадрокоптера была получена оценка вертикального профиля скорости ветра [Varentsov et al., 2021].

Измерения проводились в условиях, близких к полярной ночи (высота солнца над горизонтом не превышала 3° , продолжительность светового дня составляла 3 ч).

Для проверки гипотез, выдвинутых по результатам кампании 2018 г., далее были проведены более короткие эксперименты в декабре 2019 и январе 2021 гг., в ходе которых удалось осуществить квазисинхронные профильные измерения в городе и за городом с использованием одного квадрокоптера, запускаемого поочередно в двух точках, или двух одновременно запускаемых квадрокоптеров. В данной работе приведены результаты предварительного анализа взаимосвязи эффекта ОТ и термической структуры АПС в устойчиво стратифицированных условиях по данным выполненных измерений.



Рис. 1. Оценка высоты зданий в г. Надыме по этажности в базе данных OSM, уточненная по ЦМР ArcticDEM: 1 – точка установки автоматической метеостанции UHIARC и датчика Hobo в городском парке; 2 – точка запуска квадрокоптера в 2018 и 2021 гг.; 3 – точка запуска квадрокоптера в 2019 г.; черным прямоугольником отмечена расчетная область LES-модели; стрелкой указано направление приземного ветра в модели

Fig. 1. Estimation of the buildings height in the city of Nadym by the number of storeys in the OSM database, refined using the ArcticDEM:

1 – location of the UHIARC automatic weather station and Hobo sensor in the urban park; 2 – quadcopter launch site in 2018 and 2021 and 3 – quadcopter launch site in 2019. The black rectangle marks the computational domain of the LES model. The arrow indicates the surface wind direction in the model

Цифровая модель городской застройки. Для интерпретации наблюдаемых эффектов и механизмов их формирования был поставлен численный эксперимент с вихреразрешающей моделью атмосферы для реальной застройки Надыма. Проведение такого эксперимента требовало построения трехмерной модели застройки. Для решения данной задачи использовалась открытая база пространственных данных OpenStreetMap (OSM) [https://www.openstreetmap.org/], методика работы с которой описана в статьях [Samsonov et al., 2015; Samsonov, Konstantinov, 2014], и цифровая модель рельефа ArcticDEM [Porter et al., 2018]. Была создана детальная база данных параметров городской среды Надыма с разрешением 1 м. Из базы данных OSM были извлечены контуры объектов застройки и выполнена оценка высоты каждого объекта. Оценка выполнялась двумя методами: на основе данных об этажности, присутствующей в OSM, и на осно-

вании фильтрации данных ArcticDEM. Для уточнения оценки высоты строений была произведена независимая оценка с использованием данных ЦМР ArcticDEM. Результирующая карта высоты зданий представлены на рис. 1.

Численное моделирование устойчиво стратифицированного турбулентного течения в городской застройке. Вихреразрешающая (LES, англ. Large Eddy Simulations) модель турбулентных течений ИБМ РАН [Глазунов, 2014а, 2014б; Glazunov et al., 2016] была адаптирована для расчета стратифицированной турбулентности для фрагмента реальной застройки в юго-западной части г. Надыма (см. рис. 1). Схема расчетов заключалась в совместном интегрировании LES-модели для двух расчетных областей, первая из которых служит генератором турбулентного потока, натекающего на городскую среду, а во второй рассчитывается динамика турбулентного течения между зданиями и над

городской поверхностью. Методика постановки подобного численного эксперимента описана в [Глазунов, Степаненко, 2015].

В качестве набегающего на город потока использовалось типичное для зимних условий турбулентное течение в квазистационарном устойчиво стратифицированном пограничном слое над плоской поверхностью. Это течение рассчитывалось в периодической по горизонтали расчетной области размером $1600 \times 400 \times 160$ м³ на равносторонней сетке с шагом 2 м (достаточно подробной для воспроизведения значительной части турбулентной изменчивости и деталей средних профилей температуры и скорости, включая низкоуровневое струйное течение на верхней границе пограничного слоя). Для первой области моделирования с однородной горизонтальной поверхностью LES-модель интегрировалась отдельно до достижения квазиравновесного состояния (7,5 ч модельного времени). Эта конфигурация модели во многом аналогична расчетам GABLS-1 [Beare et al., 2006], за исключением более быстрого охлаждения поверхности (-2 К/час) и меньшей начальной высоты перемешанного слоя (40 м).

Турбулентное течение, сгенерированное в первой расчетной области после достижения квазистационарных условий, использовалось в качестве граничных условий для второй расчетной области с реалистичной геометрией городской застройки. Сеточный размер этой области составлял $900 \times 720 \times 60$ узлов, шаг сетки – 2 м вблизи обтекаемых объектов, к боковым границам расчетной области и к ее верхней границе сетка растягивалась. На левой (наветренной) боковой границе второй расчетной области на каждом шаге по времени задавались значения скорости ветра и температуры, вычисленные в одном из вертикальных сечений первой области. Шаг по времени составлял 0,025 с. Период совместного интегрирования модели для двух областей составлял 40 мин модельного времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные наблюдений. Измерительная кампания 2018 г. позволила получить данные наблюдений для двух периодов морозной погоды с устойчивой стратификацией атмосферы (рис. 2). Первый, более короткий период наблюдался 20 декабря, когда температура за городом упала с -20 до -30°C , а интенсивность инверсии температуры в нижних 300 м достигала 10°C . В течение второго периода (с 22 по 26 декабря) температура резко упала с -5 до -40°C , а затем опустилась до -46°C на фоне мощной температурной инверсии с интенсивностью до 20°C в нижних 300 м. В течение обоих периодов фиксировался ярко выраженный эффект ОТ, интенсивность

которого (разность температуры между центром города и фоновыми точками) достигала 5°C и более.

По данным измерений установлена связь приземного ОТ с условиями стратификации нижнего 100-метрового слоя атмосферы. ОТ выражен наиболее ярко только в условиях существования приземной инверсии температуры. Например, после пика похолодания 22 декабря инверсия температуры в нижних 300 м осталась значительной, но приземные градиенты температуры уменьшились на фоне усиления скорости ветра (см. рис. 2). Также ослабили термические различия между городом и окружающими территориями.

Зондирование с использованием квадрокоптера позволило сравнить условия стратификации атмосферы над городом и фоновой территорией. Один из запусков был произведен вечером 22 декабря, на пике похолодания и развития приземного ОТ (см. рис. 2). Он позволил получить вертикальный профиль температуры воздуха над городом до высоты 130 м. Его сравнение с данными измерений профилимера МТР-5 в аэропорту показало, что положительная разность температуры между точками сохраняется в пределах всего диапазона измерений, но выше 50 м градиент температуры совпадает (рис. 3А). Опыт использования профилимера МТР-5 позволяет предположить, что в условиях сильных инверсий прибор занижает приземные градиенты температуры и, как следствие, температуру на высоте. Если ввести эмпирическую коррекцию и увеличить градиент температуры в слое 0–75 м на $2,8^\circ\text{C}$, профили температуры совпадают выше 50 м. Соответственно, вертикальную протяженность ОТ можно оценить в 50–60 м. Два последующих зондирования были проведены 23 декабря на фоне усиления скорости ветра и ослабления ОТ и не выявили значимых различий в стратификации атмосферы в городе и за городом.

Выводы о вертикальной протяженности ОТ и его связи с инверсиями температуры подтверждают и результаты последующих экспериментов, в ходе которых профильные измерения на городской и фоновой точках выполнялись единообразно, с использованием квадрокоптеров с датчиками iMet-XQ2. Эксперимент 2019 г. проходил с 20 по 21 декабря. Для измерений использовался один квадрокоптер, запускаемый поочередно в двух точках: рядом с круговым перекрестком в центре города (см. рис. 1) и около монумента «Мамонты в Надыме» на расстоянии около 4 км на юго-запад от города. Время между зондированиями составляло около 30 мин, всего было выполнено 16 зондирований (по 8 на каждой из точек). При анализе данных профиль для одной точки сопоставлялся с осредненными за два ближайших момента времени профилями для второй точки. Наблюдавшиеся

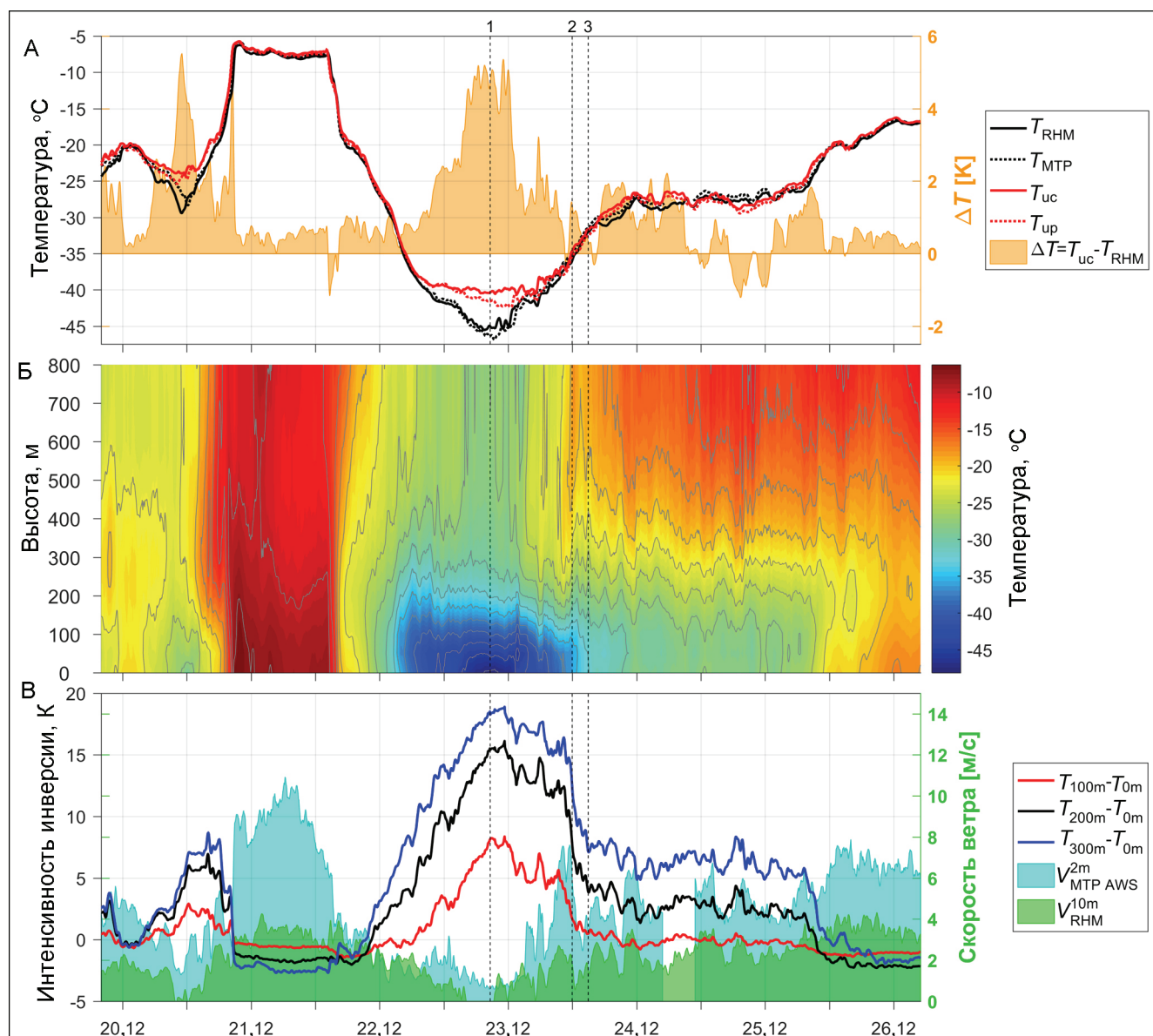


Рис. 2. Динамика основных исследуемых показателей за время интенсивной измерительной кампании в г. Надыме в 2018 г.:

А – температура приземного воздуха на метеостанции Росгидромета в аэропорту (T_{RHM}), в точке установки профилера МТП-5 (T_{MTP}), по данным датчика iButton в наиболее теплой части города (T_{uc}), по данным измерений датчика Нобо в парковой зоне в центре города (T_{up}), интенсивность городского острова тепла г. Надыма ($\Delta T = T_{uc} - T_{RHM}$); Б – температура в нижнем 800-метровом слое по данным профилера МТП-5 в аэропорту; В – интенсивность инверсий температуры в слоях 0–100, 0–200 и 0–300 м по данным профилера МТП-5 и скорость ветра по данным измерений метеостанции Росгидромета (V_{RHM}^{10m}) и в точке установки профилера (V_{MTP}^{2m}). Вертикальные пунктирные линии обозначают время проведения профильных измерений с использованием квадрокоптера

Fig. 2. Dynamics of the main studied indicators during the intensive measurement campaign in the city of Nadya in 2018:

А – the surface air temperature at the Roshydromet meteorological station at the airport (T_{RHM}), at the installation point of the MTP-5 profiler (T_{MTP}), according to the iButton sensor in the warmest part of the city (T_{uc}), according to the measurements of the Hobo sensor in the city center park zone (T_{up}), the intensity of the urban heat island of Nadya ($\Delta T = T_{uc} - T_{RHM}$); Б – temperature in the lower 800 m layer according to the MTP-5 profiler at the airport; В – the intensity of temperature inversions in the layers 0–100, 0–200, and 0–300 m according to the MTP-5 profiler and the wind speed according to the measurements of the Roshydromet meteorological station (V_{RHM}^{10m}) and at the MTP-5 profiler installation point (V_{MTP}^{2m}). Vertical dashed lines show the time of profile measurements using the quadcopter

погодные условия не способствовали формированию приземной инверсии и интенсивного ОТ. Различия приземной температуры между точками измерений не превышали 1,5°C (рис. 3Б) и были локализованы в нижних 50 м.

Следующий эксперимент был проведен в период с 9 по 10 января 2021 г. на фоне развития приземной инверсии и эффекта ОТ интенсивностью до 5°C. В ходе него удалось выполнить более 10 синхронных профильных измерений на городской (бульвар

Стрижева, см. рис. 1) и фоновой (монумент «Мамонты в Надыме») точках с использованием двух квадрокоптеров. Полученные данные в очередной раз подтвердили вывод о вертикальной протяженности ОТ до высот порядка 50 м (рис. 3В). Выше 50 м температура над городом оказалась ниже, чем

над фоновой точкой. Такая особенность известна из литературы как «кроссовер-эффект», который является следствием более интенсивного перемешивания атмосферы над городом в условиях инверсии [Duckworth, Sandberg, 1954; Локощенко и др., 2016; Varentsov et al., 2018].

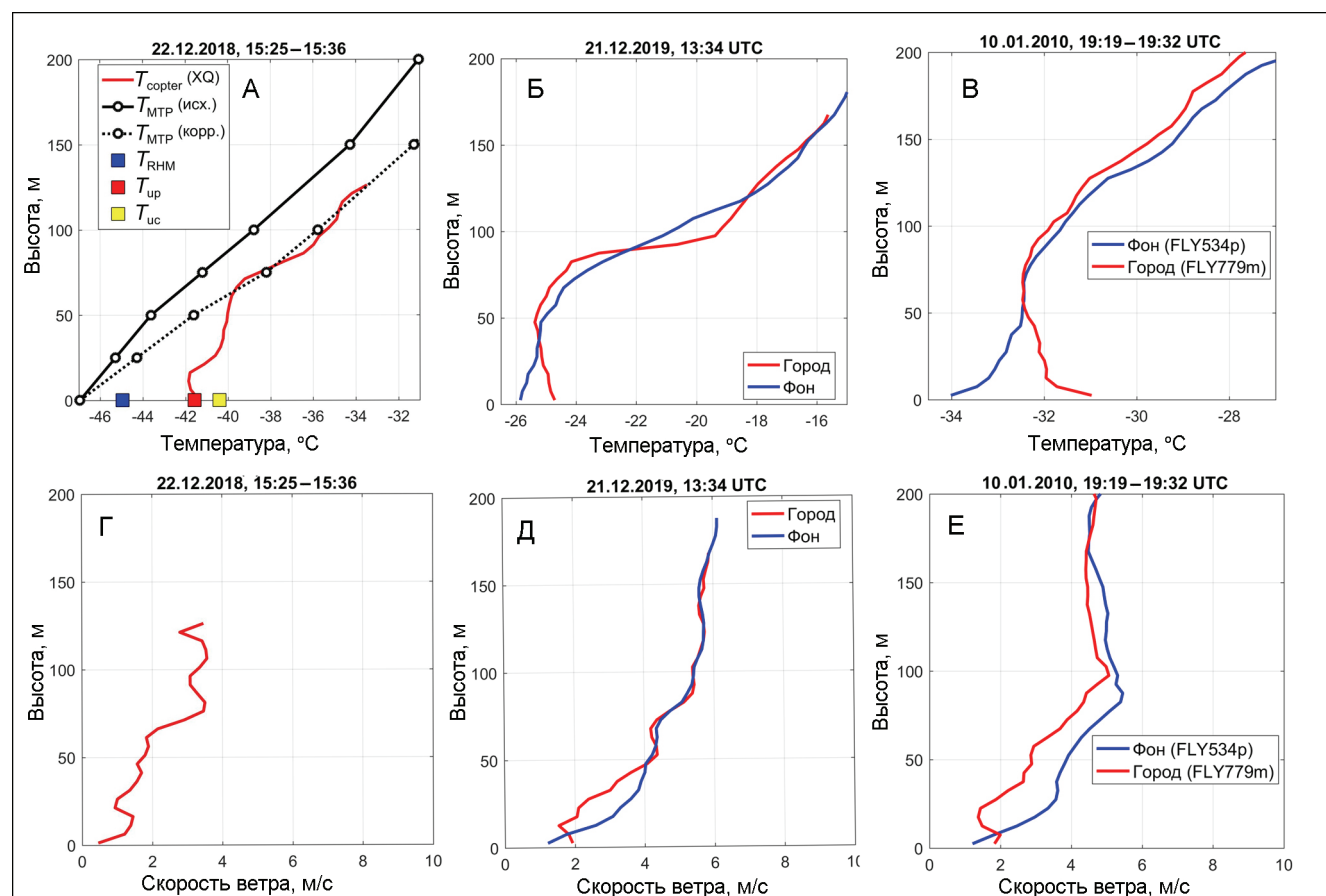


Рис. 3. Вертикальные профили температуры и скорости ветра по данным измерений:

А – сравнение вертикального профиля температуры, измеренного в южной части г. Надыма с использованием квадрокоптера с установленным на нем датчиком iMet-XQ (T_{copter}) с исходными (исх.) и скорректированными (корр.) данными измерений профилимера МТП-5 в аэропорту г. Надыма ($T_{\text{МТП}}$) для эксперимента в декабре 2018 г.; Б, В – сравнение профилей температуры, измеренных с использованием квадрокоптера в центре г. Надыма и в фоновых условиях за городом в декабре 2019 г. (Б) и в январе 2021 г. (В); Г, Д, Е – измеренные с помощью квадрокоптера профили скорости ветра в городе и за городом для тех же моментов времени, для которых приведены профили температуры. Квадратными маркерами показаны значения приземной температуры, измеренные на метеостанции Росгидромета в аэропорту (T_{RHM}), по данным датчика iButton в наиболее теплой части города (T_{uc}), по данным измерений датчика Hobo в парковой зоне в центре города (T_{up})

Fig. 3. Vertical profiles of temperature and wind speed from measurements.

А – Comparison of the vertical temperature profile measured in the southern part of the city of Nadym using a quadcopter with an iMet-XQ (T_{copter}) sensor installed on it with the original (raw) and corrected (corr) data of the MTP-5 profiler measurements at the Nadym airport ($T_{\text{МТП}}$) for the experiment in December 2018; Б, В – Comparison of temperature profiles measured using a quadcopter in the center of Nadym and in background conditions outside the city in December 2019 (Б) and in January 2021 (В); Г, Д, Е – Wind speed profiles measured with a quadcopter in the city and outside the city for the same time the temperature profiles are given. Square markers show the surface temperature values measured at the Roshydromet weather station at the airport (T_{RHM}), according to the iButton sensor in the warmest part of the city (T_{uc}), according to the Hobo sensor measurements in the city center park zone (T_{up})

Результаты зондирования также позволили диагностировать различия профилей скорости ветра над городом и фоновой территорией, восстановленных по данным телеметрии квадрокоптеров, и

сравнить условия ветровой стратификации для рассматриваемых примеров (рис. 3Д, Е). Для случая в декабре 2018 г. скорость ветра в нижних 100 м не превышала 3,5 м/с, что способствовало развитию

приземной инверсии и ОТ. В эксперименте 2019 г. скорость ветра была выше и на высоте 100 м достигала 5 м/с. Вероятно, это способствовало более интенсивному перемешиванию и не давало развиться интенсивной приземной инверсии за городом. Впрочем, в январе 2021 г. развитие более интенсивной инверсии наблюдалось на фоне лишь незначительно меньших скоростей ветра, что говорит о сложности процессов формирования приземной стратификации атмосферы и необходимости их дальнейшего исследования. Для большинства зондирований в 2019 и 2021 гг., скорость ветра в АПС в городе была меньше загородной, что демонстрируют и примеры на рис. 3Д, Е. Такие различия можно объяснить большей шероховатостью городской поверхности. При этом градиент скорости ветра вблизи поверхности в городе чаще всего был меньше загородного, что указывает на более интенсивное перемешивание.

Выполненные измерения однозначно указывают на взаимосвязь интенсивности приземного ОТ в зимний период со стратификацией АПС и наличием приземных инверсий. Во всех рассмотренных случаях инверсия температуры разной интенсивности наблюдалась за городом, а в городе вблизи поверхности сохранялась стратификация, близкая к нейтральной. Вертикальная протяженность ОТ в

подобных условиях составляет около 50 м. Ряд вопросов (влияние города на ветровую стратификацию, условия возникновения «кроссовер-эффекта» и т. д.) требуют дальнейшего изучения, для чего планируется расширить выборку данных путем проведения в Надыме квазирегулярных зондирований с участием сотрудников Научного центра изучения Арктики.

Результаты численного моделирования. В численном эксперименте с вихреразрешающей моделью ИВМ РАН для первой расчетной области был сформирован сильно устойчивый пограничный слой (масштаб Обухова у поверхности составляет приблизительно $1/5$ от высоты погранслоя). Некоторые характеристики полученного турбулентного течения, осредненные за последние 0,5 ч интегрирования, приведены на рис. 4. Вблизи верхней границы АПС, на высоте около 70 м, располагается низкоуровневая струя с выраженным максимумом скорости, температура воздуха увеличивается приблизительно на 14° от поверхности до верхней границы АПС. Турбулентное течение с указанными характеристиками задавалось в качестве граничных условий для второй расчетной области с реалистичной геометрией городской застройки (см. рис. 1). Далее обсуждаются результаты моделирования для второй расчетной области.

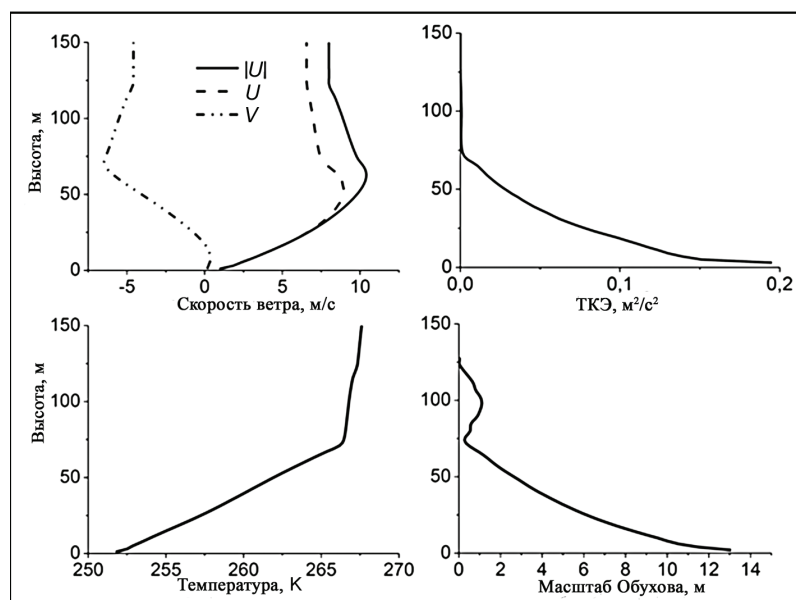


Рис. 4. Характеристики набегающего потока: средние профили скорости ветра; ТКЭ (оценка, включающая «подфильтровые» и «подсеточные» флуктуации скорости); средний профиль температуры; вертикальный профиль масштаба Обухова.

$|U|$ – модуль скорости ветра; U – продольная компонента горизонтальной скорости ветра; V – поперечная компонента горизонтальной скорости ветра

Fig. 4. Oncoming flow characteristics: average wind velocity profiles; TKE (the estimate includes “subfilter” and “subgrid” velocity fluctuations); average temperature profile; vertical profile of the Obukhov length.

$|U|$ – wind speed module; U – the longitudinal component of the horizontal wind speed; V – the transverse component of the horizontal wind speed

На рис. 5 изображена скорость ветра на высоте 1 м, среднее значение за последние 20 мин расчета (см. рис. 5А) и максимальные зафиксированные значения порывов ветра за тот же период (см. рис. 5Б). Приземная скорость ветра у поверхности в городской среде может существенно превышать ее значение за городом.

Результаты моделирования показали, что одним из важных механизмов формирования эффекта ОТ у поверхности может быть механическое перемешивание устойчиво стратифицированной атмосферы, обеспечивающее вовлечение к поверхности более теплого воздуха сверху. Ключевым фактором фор-

мирования ОТ в зимний период для умеренных и высоких широт принято считать антропогенный поток тепла, в первую очередь от отапливаемых зданий [Oke, 1982; Varentsov et al., 2018]. В проведенных расчетах антропогенные источники тепла отсутствовали, также не учитывалось влияние геометрических особенностей застройки на режим радиационного выхолаживания. Тем не менее аномалия средней приземной температуры воздуха (см. рис. 5В) достигала 4–5°, что отражает практически полное перемешивание и формирование слоя со стратификацией, близкой к нейтральной, в городской среде только за счет динамического перемешивания (было проверено,

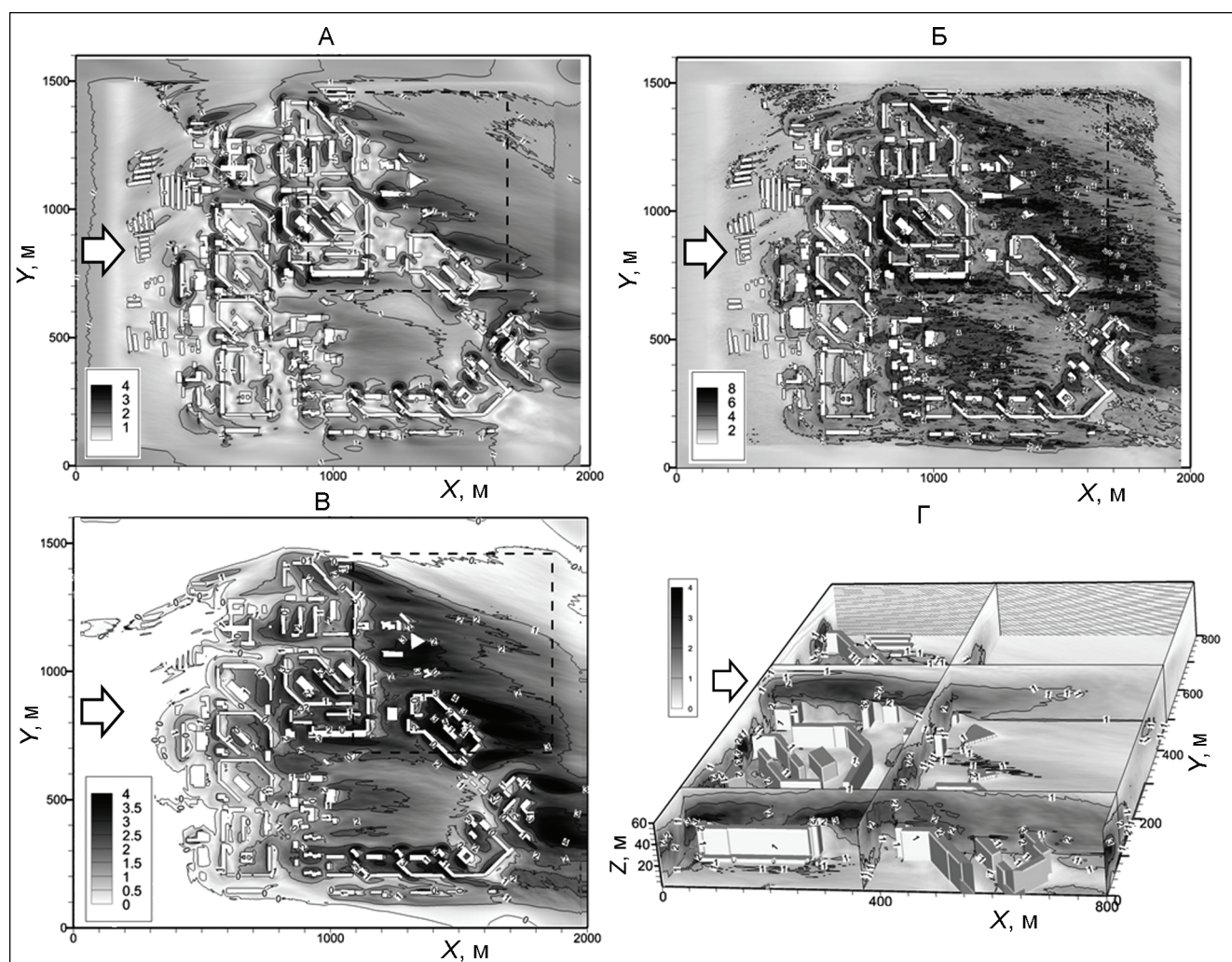


Рис. 5. Результаты моделирования структуры ветрового потока над реалистичной городской застройкой:

А – средняя скорость ветра на высоте 1 м; Б – максимальные порывы ветра на той же высоте, зафиксированные за 20 мин расчета; В – аномалии средней температуры у поверхности на высоте первого расчетного уровня модели (1 м) относительно температуры воздуха на той же высоте за городом; Г – турбулентная кинетическая энергия флуктуаций скорости ветра в городе, приведены изолинии в различных вертикальных сечениях и у поверхности для подобласти, показанной пунктиром на остальных рисунках. Стрелка показывает направление набегающего потока

Fig. 5. The results of numerical modelling of wind flow structure above realistic city buildings.

А – Average wind speed at a height of 1 m; Б – maximum wind gusts at the same height recorded during 20 minutes of calculation; В – anomalies of the average temperature near the surface at the height of first model level (1 m) as compared with the air temperature at the same altitude outside the city; Г – turbulent kinetic energy of wind speed fluctuations in the city (isolines in various vertical sections and at the surface) for the sub-area, shown by dotted line in subplots. Arrow indicates the inflow wind direction

что в значительной части расчетной области, занятой городской застройкой, осредненная по времени потенциальная температура приблизительно постоянна от поверхности до высот 40–60 м).

Выводы о более интенсивном турбулентном перемешивании в городе подтверждаются воспроизведенными моделью значениями турбулентной кинетической энергии (ТКЭ). На рис. 5Г в различных вертикальных сечениях показаны изолинии турбулентной кинетической энергии (ТКЭ) для фрагмента расчетной области (см. рис. 5А, Б). ТКЭ в городе существенно превышает ТКЭ за его границами (по нашим оценкам более чем в 10 раз, см. профиль ТКЭ в набегающем потоке на рис. 4 вверху слева). Основным источником ТКЭ в городе является ее сдвиговая генерация на высоте зданий при их обтекании.

ВЫВОДЫ

Актуальность исследования климатических особенностей арктических городов связана не только с их слабой изученностью по сравнению с другими регионами. В силу высокой повторяемости приземных инверсий в зимний период, города высоких широт представляют собой уникальные площадки по изучению механизмов взаимодействия атмосферы с неоднородной поверхностью в условиях устойчивой стратификации. Недавние исследования показали, что в периоды зимней морозной и безветренной погоды в городах высоких широт возникает ярко выраженный эффект острова тепла (ОТ). Однако, взаимосвязь приземного ОТ таких городов со структурой атмосферного пограничного слоя (АПС) до текущего момента оставалась не изучена.

В данном исследовании рассмотрена структура АПС над г. Надымом по данным экспериментальных наблюдений и численного вихреразрешающего моделирования. Экспериментальные измерения были направлены на мониторинг структуры и динамики устойчиво стратифицированного пограничного слоя атмосферы в условиях формирования ОТ. Наличие эффекта ОТ фиксировалось сетью приземных температурных датчиков, вертикальная структура атмосферы в городе и за городом измерялась с использованием квадрокоптеров и дистанционного температурного профилемера МТП-5. Результаты трех измерительных кампаний показали, что развитие ОТ интенсивностью до 5°C происходит на фоне замедления скорости ветра

и формирования приземной инверсии температуры за городом, при этом в городе сохраняется перемешанный слой со стратификацией, близкой к нейтральной. Высота слоя составляет порядка 50 м, что можно интерпретировать как вертикальное развитие городского ОТ. Измерение профилей скорости ветра также показало более интенсивное перемешивание атмосферы над городом.

Для объяснения выявленных эффектов было проведено вихреразрешающее моделирование турбулентного течения в условиях реалистичной застройки г. Надыма. Трехмерная модель застройки была получена на основе базы данных OpenStreetMap и уточнена по ЦМР ArcticDEM и визуальным оценкам этажности зданий. При этом в модели не учитывался антропогенный нагрев и радиационные эффекты. В качестве набегающего на город потока использовалось типичное для зимних условий турбулентное течение в квазистационарном устойчиво стратифицированном пограничном слое над плоской поверхностью. Результаты моделирования подтвердили формирование в городской среде перемешанного слоя со стратификацией, близкой к нейтральной, и аномалий приземной температуры до 4–5°C относительно фоновых территорий. Таким образом, несмотря на отсутствие в модели антропогенных источников тепла, результаты моделирования и наблюдений согласуются на качественном уровне. Это позволяет сделать вывод о том, что одним из важных механизмов образования приземного ОТ может быть механическое перемешивание устойчиво стратифицированной атмосферы. Он подтверждается тем, что турбулентная кинетическая энергия (ТКЭ) в городе по расчетам более чем в 10 раз превышает ТКЭ за его границами. Основным источником ТКЭ в городе является ее сдвиговая генерация на высоте зданий при их обтекании.

Проведенные экспериментальные исследования и численное моделирование подтвердили факт существования выраженного эффекта ОТ в условиях устойчивой стратификации для небольших городов высоких широт, позволили впервые оценить высоту его вертикального развития и установили связь данного феномена с перемешиванием пограничного слоя атмосферы. Последнее обстоятельство может иметь существенное значение для условий распространения загрязнений в городской застройке, что будет изучено более детально в наших дальнейших исследованиях.

Благодарности. Экспериментальные измерения в г. Надыме в 2018 и 2019 гг., расчеты с LES-моделью выполнены при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 18-05-60126. Экспериментальные измерения в Надыме в 2021 г. выполнены при поддержке гранта РФФИ № 20-55-71004. Анализ результатов измерений был проведен при поддержке гранта РНФ 21-17-00249. Анализ результатов LES-моделирования выполнен при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Московского центра фундаментальной и прикладной математики по соглашению № 075-15-2022-284. Разработка методики комплексного исследования поддержана грантом Минобрнауки России № 075-15-2021-574.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Варенцов М.И., Константинов П.И., Самсонов Т.Е., Репина И.А. Изучение феномена городского острова тепла в условиях полярной ночи с помощью экспериментальных измерений и дистанционного зондирования на примере Норильска // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 4. С. 329–337.
- Глазунов А.В. Численное моделирование устойчиво стратифицированных турбулентных течений над городской поверхностью. Спектры и масштабы, параметризация профилей температуры и скорости // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014а. Т. 50(4). С. 406–419.
- Глазунов А.В. Численное моделирование устойчиво стратифицированных турбулентных течений над плоской и городской поверхностями // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014б. Т. 50(3). С. 271–281.
- Глазунов А.В., Степаненко В.М. Вихреразрешающее моделирование стратифицированных турбулентных течений над неоднородными природными ландшафтами // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 4. С. 403–415.
- Константинов П.И., Гриценко М.Ю., Варенцов М.И. Картографирование островов тепла городов Заполярья по Совмещенным данным полевых измерений и космических снимков на примере г. Апатиты (Мурманская область) // *Исследования Земли из космоса*. 2015. № 3. С. 27–33.
- Локощенко М.А., Корнева И.А., Кочин А.В., Дубовецкий А.З., Новицкий М.А., Разин П.Е. О высотной протяженности городского «Острова тепла» над Москвой // *Доклады Академии наук*. 2016. Т. 466. № 2. С. 213–217.
- Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / под ред. Н.С. Касимова. М.: ИП «Филимонов М.В.», 2014. 560 с.
- Репина И.А., Варенцов М.И., Чечин Д.Г., Артамонов А.Ю., Бодунков Н.Е., Калягин М.Ю., Живоглозов Д.Н., Шевченко А.М., Варенцов А.И., Куксова Н.Е., Степаненко В.М., Шестакова А.А. Использование беспилотных летательных аппаратов для исследования атмосферного пограничного слоя // *Инноватика и экспертиза*. 2020. Т. 2. № 30. С. 20–39.
- Старченко А.В., Нутерман Р.Б., Данилкин Е.А. Численное моделирование турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2015. 252 с.
- Юшков В.П., Курбатова М.М., Варенцов М.И., Лезина Е.А., Курбатов Г.А., Миллер Е.А., Репина И.А., Артамонов А.Ю., Каллистратова М.А. Моделирование городского острова тепла в период экстремальных морозов в Москве в январе 2017 г. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55(5). С. 13–31.
- Anderson W., Li Q., Bou-Zeid E. Numerical simulation of flow over urban-like topographies and evaluation of turbulence temporal attributes, *Journal of Turbulence*, 2015, vol. 16, no. 9, p. 809–831.
- Baklanov A., Mestayer P., Clappier A., Zilitinkevich S., Joffre S., Mahura A., Nielsen N.W. Towards improving the simulation of meteorological fields in urban areas through updated / advanced surface fluxes description, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, vol. 8, p. 523–543.
- Beare R.J., Macvean M.K., Holtslag A.A.M., Cuxart J., Esau I., Golaz J.-C., Jimenez M.A., Khairoutdinov M., Kosovic B., Lewellen D. An intercomparison of large-eddy simulations of the stable boundary layer, *Boundary Layer Meteorol.*, 2006, vol. 118, p. 247–272.
- Benz S.A., Bayer P., Goettsche F.M., Olesen F.S., Blum P. Linking Surface Urban Heat Islands with Groundwater Temperatures, *Environ. Sci. Technol.*, 2016, vol. 50, no. 1, p. 70–78.
- Duckworth F.S., Sandberg J.S. The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradients, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1954, vol. 35, no. 5, p. 198–207.
- Esau I., Miles V.V., Davy R., Miles M.W., Kurchatova A. Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia, *Atmos. Chem. Phys.*, 2016, vol. 16, no. 15, p. 9563–9577.
- Geletić J., Lehnert M., Krč P., Resler J., Krayenhoff E.S. High-Resolution Modelling of Thermal Exposure during a Hot Spell: A Case Study Using PALM-4U in Prague, Czech Republic, *Atmosphere*, 2021, vol. 12, no. 2, p. 175.
- Garuma G.F. Review of urban surface parameterizations for numerical climate models, *Urban Clim.*, 2018, vol. 24, p. 830–851.
- Giometto M.G., Christen A., Meneveau C., Fang J., Krafczyk M., Parlange M.B. Spatial characteristics of roughness sublayer mean flow and turbulence over a realistic urban surface, *Boundary-layer meteorology*, 2016, vol. 160, no. 3, p. 425–452.
- Glazunov A., Rannik Ü., Stepanenko V., Lykosov V., Auvinen M., Vesala T., Mammarella I. Large-eddy simulation and stochastic modeling of Lagrangian particles for footprint determination in the stable boundary layer, *Geoscientific Model Development*, 2016, vol. 9, no. 9, p. 2925–2949.
- Han J.Y., Baik J.J., Lee H. Urban impacts on precipitation, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 2014, vol. 50, no. 1, p. 17–30.
- Hinkel K.M., Nelson F.E., Klene A.E., Bell J.H. The urban heat island in winter at Barrow, Alaska, *Int. J. Climatol.*, 2003, vol. 23, no. 15, p. 1889–1905.
- Huang Q., Lu Y. Urban heat island research from 1991 to 2015: a bibliometric analysis, *Theor. Appl. Climatol.*, 2017, no. 1, p. 1–13.
- Kadygrov E.N., Pick D.R. The potential for temperature retrieval from an angular scanning single channel microwave radiometer and some comparisons with in situ observations, *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modeling*, 1998, vol. 5, no. 4, p. 393–404.
- Konstantinov P., Varentsov M., Esau I. A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic, *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, no. 7, p. 075007.
- Li X.X., Britter R., Norford L.K. Effect of stable stratification on dispersion within urban street canyons: A large-eddy simulation, *Atmospheric Environment*, 2016, vol. 144, p. 47–59.
- Lokoshchenko M.A., Korneva I.A. Underground urban heat island below Moscow city, *Urban Clim.*, 2015, vol. 13, p. 1–13.

- Magee N., Curtis J., Wendler G. The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska, *Theor. Appl. Climatol.*, 1999, vol. 64, no. 1–2, p. 39–47.
- Miles V., Esau I. Seasonal and Spatial Characteristics of Urban Heat Islands (UHIs) in Northern West Siberian Cities, *Remote Sens.*, 2017, vol. 9, no. 10, p. 989–1004.
- Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, vol. 108, no. 455, p. 1–24.
- Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. *Urban climates*, Cambridge University Press, 2017, 520 p.
- Samsonov T.E., Konstantinov P.I. OpenStreetMap data assessment for extraction of urban land cover and geometry parameters required by urban climate modeling, *Ext. Abstr. Proc. GIScience*, 2014, p. 395–399.
- Samsonov T.E., Konstantinov P.I., Varentsov M.I. Object-oriented approach to urban canyon analysis and its applications in meteorological modeling, *Urban Clim.*, 2015, vol. 13, p. 122–139.
- Tomas J.M., Pourquie M., Jonker H.J.J. Stable stratification effects on flow and pollutant dispersion in boundary layers entering a generic urban environment, *Boundary-Layer Meteorology*, 2016, vol. 159, no. 2, p. 221–239.
- Tzavali A., Paravantis J.P., Mihalakakou G., Fotiadi A., Stigka E. Urban heat island intensity: A literature review, *Fresenius Environ. Bull.*, 2015, vol. 24, no. January, p. 4535–4554.
- Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A., Esau I., Miles V., Davy R. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city, *Atmos. Chem. Phys.*, 2018, vol. 18, p. 17573–17587.
- Varentsov M., Stepanenko V., Repina I., Artamonov A., Bogomolov V., Kuksova N., Marchuk E., Pashkin A., Varentsov A. Balloons and Quadcopters: Intercomparison of Two Low-Cost Wind Profiling Methods, *Atmosphere*, 2021, vol. 12, no. 3, p. 380–411.
- Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P. Megacity-Induced Mesoclimatic Effects in the Lower Atmosphere: A Modeling Study for Multiple Summers over Moscow, Russia, *Atmosphere (Basel)*, 2018b, vol. 9, no. 2, p. 50–73.
- Varentsov M.I., Artamonov A.Y., Pashkin A.D., Repina I.A. Experience in the quadcopter-based meteorological observations in the atmospheric boundary layer, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 2019, vol. 231, p. 12053.
- Wang W., Xu Y., Ng E. Large-eddy simulations of pedestrian-level ventilation for assessing a satellite-based approach to urban geometry generation, *Graphical Models*, 2018, vol. 95, p. 29–41.
- Zhou D., Zhao S., Zhang L., Sun G., Liu Y. The footprint of urban heat island effect in China, *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, p. 2–12.

Электронный ресурс

Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.J., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. ArcticDEM, 2018, Harvard Dataverse, V1, DOI: 10.7910/DVN/OHHUKH, URL: <https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/OHHUKH> (дата обращения 31.03.2021).

Поступила в редакцию 06.04.2021

После доработки 25.01.2022

Принята к публикации 13.05.2022

SPECIAL CHARACTERISTICS OF THE BOUNDARY ATMOSPHERE IN THE CITY OF NADYM ACCORDING TO EXPERIMENTAL MEASUREMENTS AND EDDY-RESOLVING MODELING

**M.I. Varentsov¹, I.A. Repina², A.V. Glazunov³, T.E. Samsonov⁴, P.I. Konstantinov⁵,
V.M. Stepanenko⁶, V.N. Lykosov⁷, A.Yu. Artamonov⁸, A.B. Debolskiy⁹, A.S. Pechkin¹⁰,
A.V. Soromotin¹¹**

^{1, 2, 3, 6, 7, 9} *Research Computing Center of the Lomonosov Moscow State University*

^{1, 2, 8, 9} *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS*

^{1-4, 6, 7} *Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics*

^{3, 7} *G.I. Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS*

^{1, 4, 5} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

¹⁰ *Scientific Center for Arctic Studies*

¹¹ *Tumen scientific center SB RAS, Research Institute of Ecology and Rational Utilization of Natural Resources,
Tyumen State University*

¹ *Senior Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: mikhail.varentsov@srcc.msu.ru*

² *Head of air-sea interaction laboratory, D.Sc. in Physics and Mathematics; e-mail: repina@ifaran.ru*

³ *Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Physics and Mathematics; e-mail: and.glas@gmail.com*

⁴ *Department of Cartography and Geoinformatics, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography;
e-mail: tsamsonov@geogr.msu.ru*

⁵ *Department of Meteorology and Climatology, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: kostadini@mail.ru*

⁶ *Deputy Director, D.Sc. in Physics and Mathematics; e-mail: stepanen@srcc.msu.ru*

⁷ *Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Physics and Mathematics; e-mail: lykosov@yandex.ru*

⁸ *Air-sea interaction laboratory, Junior Scientific Researcher; e-mail: sailer@ifaran.ru*

⁹ *Air-sea interaction laboratory, Junior Scientific Researcher; e-mail: and.debol@gmail.com*

¹⁰ *Department of scientific research, Scientific Researcher; e-mail: a.pechkin.ncia@gmail.com*

¹¹ *Department of methodology for the multidisciplinary research of cryosphere,
Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Biology; e-mail: a.v.soromotin@utmn.ru*

The paper presents the results of studying the urban heat island formation in winter under the stable atmospheric stratification for small Arctic and subarctic cities (case study of the Nadym city). As a result of three measurement campaigns using contact and remote measurements, information was obtained on the intensity and vertical extent of the urban heat island. Simultaneous measurements of temperature and wind speed profiles within and outside the city showed that, with a strongly stable stratification, a mixed boundary layer is formed in the city with close to neutral stratification and a height of about 50 m. To explain the revealed phenomenon, LES modeling of the turbulent flow was carried out. A turbulent flow typical for winter conditions in a quasi-stationary, stable-stratified boundary layer above a flat surface was used as a flow approaching the city. A real 3D model of urban built-up area was used, obtained from the OpenStreetMap database and refined using the ArcticDEM data and by visual evaluation of building height. The simulation results confirmed the formation of a mixed layer in the urban environment and showed that mechanical mixing of a stably stratified atmosphere is an important mechanism of urban heat island formation at the surface. This is confirmed by the fact that, according to calculations, the turbulent kinetic energy in the city is more than 10 times higher than the TKE outside its borders. The main source of TKE in the city is its shear generation at the height of buildings as they are flown around. Experimental studies and theoretical calculations have confirmed the existence of a pronounced urban heat island in small polar cities under stable stratification and for the first time made it possible to estimate the height of its vertical development.

Keywords: urban heat island, boundary atmosphere, stable stratification

Acknowledgements. Experimental measurements in the city of Nadym in 2018 and 2019 and the LES-model calculations were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-60126). Experimental measurements in the city of Nadym in 2021 were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 20-55-71004). The analysis of results was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 21-17-00249). LES-modeling results were analyzed with financial support from the RF Ministry of Science and Higher Education under the program of the Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics (agreement no. 075-15-2022-284 and contract no. 075-15-2021-574).

REFERENCES

- Anderson W., Li Q., Bou-Zeid E. Numerical simulation of flow over urban-like topographies and evaluation of turbulence temporal attributes, *Journal of Turbulence*, 2015, vol. 16, no. 9, p. 809–831.
- Baklanov A., Mestayer P., Clappier A., Zilitinkevich S., Joffre S., Mahura A., Nielsen N.W. Towards improving the simulation of meteorological fields in urban areas through updated / advanced surface fluxes description, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, vol. 8, p. 523–543.
- Beare R.J., Macvean M.K., Holtslag A.A.M., Cuxart J., Esau I., Golaz J.-C., Jimenez M.A., Khairoutdinov M., Kosovic B., Lewellen D. An intercomparison of large-eddy simulations of the stable boundary layer, *Boundary Layer Meteorol.*, 2006, vol. 118, p. 247–272.
- Benz S.A., Bayer P., Goettsche F.M., Olesen F.S., Blum P. Linking Surface Urban Heat Islands with Groundwater Temperatures, *Environ. Sci. Technol.*, 2016, vol. 50, no. 1, p. 70–78.
- Duckworth F.S., Sandberg J.S. The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradients, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1954, vol. 35, no. 5, p. 198–207.
- Esau I., Miles V.V., Davy R., Miles M.W., Kurchatova A. Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia, *Atmos. Chem. Phys.*, 2016, vol. 16, no. 15, p. 9563–9577.
- Garuma G.F. Review of urban surface parameterizations for numerical climate models, *Urban Clim.*, 2017, vol. 24, p. 830–851.
- Geletič J., Lehnert M., Krč P., Resler J., Krayenhoff E.S. High-Resolution Modelling of Thermal Exposure during a Hot Spell: A Case Study Using PALM-4U in Prague, Czech Republic, *Atmosphere*, 2021, vol. 12, no. 2, p. 175.
- Giometto M.G., Christen A., Meneveau C., Fang J., Krafczyk M., Parlange M.B. Spatial characteristics of roughness sublayer mean flow and turbulence over a realistic urban surface, *Boundary-layer meteorology*, 2016, vol. 160, no. 3, p. 425–452.
- Glazunov A., Rannik Ü., Stepanenko V., Lykosov V., Auvinen M., Vesala T., Mammarella I. Large-eddy simulation and stochastic modeling of Lagrangian particles for footprint determination in the stable boundary layer, *Geoscientific Model Development*, 2016, vol. 9, no. 9, p. 2925–2949.
- Glazunov A.V. Numerical simulation of stability stratified turbulent flows over an urban surface: spectra and scales and parametrization of temperature and wind-velocity profiles, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2014a, vol. 50, no. 4, p. 356–368.
- Glazunov A.V. Numerical simulation of stability stratified turbulent flows over flat and urban surfaces, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2014b, vol. 50, no. 3, p. 236–245.
- Glazunov A.V., Stepanenko V.M. Large eddy simulation of stratified turbulent flows over heterogeneous landscapes, *Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, vol. 51, no. 4, p. 351–361.
- Han J.Y., Baik J.J., Lee H. Urban impacts on precipitation, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 2014, vol. 50, no. 1, p. 17–30.
- Hinkel K.M., Nelson F.E., Klene A.E., Bell J.H. The urban heat island in winter at Barrow, Alaska, *Int. J. Climatol.*, 2003, vol. 23, no. 15, p. 1889–1905.
- Huang Q., Lu Y. Urban heat island research from 1991 to 2015: a bibliometric analysis, *Theor. Appl. Climatol.*, 2017, no. 1, p. 1–13.
- Kadygrov E.N., Pick D.R. The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons with in situ observations, *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling*, 1998, vol. 5, no. 4, p. 393–404.
- Konstantinov P.I., Grishchenko M.Yu., Varentsov M.I. Mapping urban heat islands of arctic cities using combined data on field measurements and satellite images based on the example of the city of Apatity (Murmansk Oblast), *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, vol. 51(9), p. 992–998.
- Konstantinov P., Varentsov M., Esau I. A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic, *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, no. 7, p. 0075007.
- Li X.X., Britter R., Norford L.K. Effect of stable stratification on dispersion within urban street canyons: A large-eddy simulation, *Atmospheric Environment*, 2016, vol. 144, p. 47–59.
- Lokoshchenko M.A., Korneva I.A. Underground urban heat island below Moscow city, *Urban Clim.*, 2015, vol. 13, p. 1–13.
- Lokoshchenko M.A., Korneva I.A., Kochin A.V., Dubovetsky A.Z., Novitsky M.A., Razin P.Y. Vertical extension of the urban heat island above Moscow, *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 466, no. 1, p. 70–74.
- Magee N., Curtis J., Wendler G. The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska, *Theor. Appl. Climatol.*, 1999, vol. 64, no. 1–2, p. 39–47.
- Miles V., Esau I. Seasonal and Spatial Characteristics of Urban Heat Islands (UHIs) in Northern West Siberian Cities, *Remote Sens.*, 2017, vol. 9, no. 10, p. 989.
- Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, vol. 108, no. 455, p. 1–24.
- Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. *Urban climates*, Cambridge University Press, 2017, 520 p.
- Regiony i goroda Rossii: integral'naya ocenka ekologicheskogo sostoyaniya* [Russian regions and cities: integration estimation of ecological condition], N.S. Kasimov (ed.), Moscow, IP "Filimonov M.V.", 2014, 560 p. (In Russian)
- Repina I.A., Varentsov M.I., Chechin D.G., Artamonov A.Yu., Bodunkov N.E., Kalyagin M.Yu., Zhivoglotov D.N., Shevchenko A.M., Varentsov A.I., Kuksova N.E., Stepanenko V.M., Shestakova A.A. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya issledovaniya atmosfernogo pogranichnogo sloya [Application of unmanned aircraft for studying of the atmospheric boundary layer], *Innovatika i eksperiment*, 2020, vol. 2, no. 30, p. 20–39. (In Russian)
- Samsonov T.E., Konstantinov P.I. OpenStreetMap data assessment for extraction of urban land cover and geometry parameters required by urban climate modeling, *Ext. Abstr. Proc. GIScience*, 2014, p. 395–399.
- Samsonov T.E., Konstantinov P.I., Varentsov M.I. Object-oriented approach to urban canyon analysis and its appli-

- cations in meteorological modeling, *Urban Clim.*, 2015, vol. 13, p. 122–139.
- Starchenko A.V., Nuterman R.B., Danilkin E.A. *Chislennoe modelirovanie turbulentnykh techenij i perenosa primesi v ulichnykh kan'onah* [Numerical modelling of turbulent flows and traces transport in the urban canyons], Tomsk, Tomsk universities publ., 2015, 252 p. (In Russian)
- Tomas J.M., Pourquie M., Jonker H.J.J. Stable stratification effects on flow and pollutant dispersion in boundary layers entering a generic urban environment, *Boundary-Layer Meteorology*, 2016, vol. 159, no. 2, p. 221–239.
- Tzavali A., Paravantis J.P., Mihalakakou G., Fotiadi A., Stigka E. Urban heat island intensity: A literature review, *Fre-senius Environ. Bull.*, 2015, vol. 24, p. 4535–4554.
- Varentsov M., Stepanenko V., Repina I., Artamonov A., Bogomolov V., Kuksova N., Marchuk E., Pashkin A., Varentsov A. Balloons and Quadcopters: Intercomparison of Two Low-Cost Wind Profiling Methods, *Atmosphere*, 2021, vol. 12, no. 3, p. 380.
- Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P. Megacity-Induced Mesoclimatic Effects in the Lower Atmosphere: A Modeling Study for Multiple Summers over Moscow, Russia, *Atmosphere*, 2018b, vol. 9, no. 2, p. 50.
- Varentsov M.I., Artamonov A.Y., Pashkin A.D., Repina I.A. Experience in the quadcopter-based meteorological observations in the atmospheric boundary layer, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 2019, vol. 231, p. 12053.
- Varentsov M.I., Konstantinov P.I., Samsonov T.E., Repina I.A. Izuchenie fenomena gorodskogo ostrova tepla v usloviyah polyarnoj nochi s pomoshch'yu eksperimental'nykh izmerenij i distancionnogo zondirovaniya na primere Noril'ska [Investigation of urban heat island phenomenon under polar night conditions with experimental measurements and remote sensing methods (case study of Norilsk)], *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, vol. 11, no. 4, p. 329–337. (In Russian)
- Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A., Esau I., Miles V., Davy R. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city, *Atmos. Chem. Phys.*, 2018, vol. 18, p. 17573–17587.
- Wang W., Xu Y., Ng E. Large-eddy simulations of pedestrian-level ventilation for assessing a satellite-based approach to urban geometry generation, *Graphical Models*, 2018, vol. 95, p. 29–41.
- Yushkov V.P., Kurbatova M.M., Varentsov M.I., Lezina E.A., Kurbatov G.A., Miller E.A., Repina I.A., Artamonov A.Y., Kallistratova M.A. Modeling an urban heat island during extreme frost in Moscow in January 2017, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, vol. 55(5), p. 389–406.
- Zhou D., Zhao S., Zhang L., Sun G., Liu Y. The footprint of urban heat island effect in China, *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, p. 2–12.
- Web source*
- Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.J., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. ArcticDEM, 2018, Harvard Dataverse, V1, DOI: 10.7910/DVN/OHHUKH, URL: <https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/OHHUKH> (access date 31.03.2021).

Received 06.04.2021

Revised 25.01.2022

Accepted 13.05.2022

АСИММЕТРИЯ ГОРОДА: ВЛИЯНИЕ ЛАНДШАФТНЫХ РУБЕЖЕЙ НА СТРУКТУРУ ПОСЕЛЕНИЯ И ЕГО ОКРУЖЕНИЕ

А.И. Зырянов¹, Н.В. Фирсова²

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, географический факультет, зав. кафедрой туризма, д-р геогр. наук; e-mail: aizyrianov@gmail.com

² Воронежский государственный технический университет, проф. кафедры градостроительства, д-р геогр. наук, канд. архитектуры; e-mail: kafgradvgasu@yandex.ru

Асимметрия – фундаментальное свойство городов как географических объектов. Асимметричные черты города связаны с контрастностью его природной основы. Ландшафтные рубежи контрастности соответствуют поясам с повышенным ресурсным разнообразием и являются линиями концентрации городов. Узлы ландшафтных рубежей контрастности особенно часто являются местами расположения городов. Узловая рубежная позиция города приводит к секторно-мозаичному строению окружающего района. Высокое ландшафтное разнообразие в месте расположения способствует эстетике крупного города и выражается в особой концентрации туристских объектов в его окружении. Рисунок основных природных рубежей в пространстве города и его окружения, как ландшафтная матрица, лежит в основе свойства асимметрии города и его дополняющего района. Асимметричные черты города особенно характерны для его ландшафтно-типологической картины, функционально-планировочной структуры, инженерно-геологического строения, микроклиматического районирования, биолого-почвенных условий.

Ключевые слова: ландшафтные рубежи контрастности, планировочная структура города, Пермский край, Воронеж

DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-79-89

ВВЕДЕНИЕ

«Пожалуйста, остановитесь здесь!» – попросил профессор, как только с холма открылся вид на Нытву. Анатолий Иванович молча сидел на полянке, завороченно любуясь картиной с уходящими вниз к огромному пруду замысловатыми улочками прикамского городка и волнистым горизонтом лесов. Почему же так засмотрелся профессор Чистобаев видом на самый обычный пермский город и самую обыкновенную для него природную обстановку? Ведь ленинградский географ бывал в пермских землях не раз, но сейчас, возвращаясь из Кудымкара, не удержался от удовольствия ощутить ландшафтно-городскую гармонию промышленного городка.

В этом коротком повествовании мы сделали преднамеренные ошибки. Прилагательное «обыкновенный» не подходит для описания картины города, не подходит оно к пейзажам и самого города, и его окружения. Если все же надо отразить географически похожее, то лучше обойтись словом «типичный». Каждый город своеобразен – обсуждению географических причин своеобразия городов будет посвящена эта статья. Постараемся отметить фундаментальные причины слабой применимости идеальных теоретических архитектурно-планировочных схем в градостроительстве.

Неповторимость города во многом заложена в его природной формуле, в положении систем городов по отношению к рисунку ландшафта, в его осо-

бенном расположении относительно ландшафтных рубежей. Природная «рубежность» – очень важный фактор своеобразия города, развития его асимметричных свойств, эта тема и будет предметом внимания данной статьи.

Своеобразие города – это его достоинство, это стимул всеобщего интереса, роста инвестиций и развития туризма, это и условие удовлетворенности жителей своим городом. Российские города переживают период быстрого улучшения в плане повышения комфортности городской среды. В этих условиях более глубокое понимание физико-географических закономерностей положения городов имеет большое значение и открывает новые перспективы в методологии проектирования городских поселений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среди многих общих свойств города как географического и социального феномена выделяется свойство многообразного влияния на окружающее пространство. Город является центром обслуживания, центром взаимодействия с окружающим пространством, концентрирует необходимые для этого возможности и выполняет разнообразные функции. Величина окружения, тяготеющего к городу, как правило, пропорциональна размеру города. Необходимость обеспечить широкий диапазон городских функций требует такого расположения города,

которое позволяет пользоваться наибольшим количеством и разнообразием природных ресурсов. Города, как правило, располагаются в местах с повышенным ландшафтным разнообразием, т. е. на границах ландшафтов.

Города пространственно тяготеют к ландшафтным рубежам контрастности. Этот термин введен Ф.Н. Мильковым [1986]. Он означает границы ландшафтов как однородных природно-территориальных комплексов разных иерархических рангов. В определенном смысле синонимом ландшафтного рубежа контрастности является термин «экотон», употребляемый в контексте не рубежа, а в смысле перехода или плавности замещения компонентов (индикаторов) одного ландшафта компонентами другого, соседнего. Однако и в понимании экотона заложено сгущение ландшафтной мозаики.

Проявления ландшафтной рубежности городов. Отмеченная фундаментальная закономерность находит разнообразные проявления.

Благодаря позиции в узле ландшафтных рубежей, город имеет в своем окружении различные в природном отношении территории, сходящиеся к городу определенными секторами с различным хозяйственным устройством.

К юго-востоку от Перми по направлению к Кунгуру находятся остепненные земли, благоприятные для земледелия, закарстованные, с карбонатными почвами территории долин Сылвы, Ирени и Уфимского плато. К югу тянется лесистая Тулвинская возвышенность с большими абсолютными отметками; на юго-запад уходит долина Камы с Воткинским водохранилищем, с хвойно-широколиственными лесами и лугами; к западу – Оханская возвышенность с сильной геоморфологической расчлененностью, мелкоконтурностью сельхозугодий и мелкоселенностью; к северу – Камское водохранилище с темнохвойной тайгой; к востоку – карстовое таежное Предуралье с долиной р. Чусовой.

Дистанционно близкие города одного порядка находятся, как правило, на разных ландшафтных рубежах, что способствует своеобразию городов и многообразию связей.

В Пермском крае это можно показать несколькими примерами пар близких городов одного порядка, тесно или достаточно хорошо для края связанных между собой транспортно (Лысьва и Чусовой, Красновишерск и Чердынь, Соликамск и Березники, Кизел и Губаха, Очер и Верещагино). Это же характерно для городов Чайковский и Воткинск, расположенных почти рядом, но в разных регионах. Можно сказать, что в крае нет таких пар, которые бы опровергали это правило. Чусовой и Лысьва находятся в 20 км друг от друга и уже полтора столетия взаимодействуют как единая территориальная

социально-экономическая система. Если Чусовой на подножье гор в «перекрестье» больших рек является значительным железнодорожным и автомобильным узлом, то Лысьва располагается на крупном пруду в поясе с увалистым рельефом, где ландшафтный рубеж четко не выражен, и город не является транспортным узлом.

Поднявшись на межрегиональный уровень и сравнивая тесно связанные центральные города регионов одного порядка, также обнаруживаем их индивидуальность в ландшафтно-рубежном положении. Это города Урала – Пермь, Екатеринбург, Челябинск и Уфа, города Дальнего Востока – Хабаровск и Владивосток. На государственном уровне это правило действует, учитывая резко различное природно-рубежное расположение Москвы и Санкт-Петербурга.

Ландшафтное разнообразие территории города и его пригородной зоны во многом определяет красоту города.

Можно привести много примеров городов с особым природным окружением. Красновишерск и Чердынь в Пермском крае, располагаясь на рубеже Уральских гор, имеют великолепные природные «декорации», силуэты на фоне неба. Отметим, что именно в Чердыни Б.Б. Родоман пришел к идее о «вдохновляющих далях, открывающихся с высоких речных берегов российских городов» [Родоман, 2010].

Высокое ландшафтное разнообразие в месте расположения крупнейшего города региона выражается в особой концентрации туристских объектов в окрестностях.

Эта особенность находит практическое применение в туроперейтинге, выражается в том, что при формировании короткой туристской программы следует ограничиться столицей страны и ее ближайшим окружением. Это не только потому, что здесь сосредоточены социально-экономические и культурно-исторические ресурсы, но и потому, что главный город часто находится в самом ландшафтно-контрастном месте страны. Отсюда и повышенная природная привлекательность окрестностей главного города. Приведем в качестве примера Норвегию. Осло располагается на самом большом фьорде страны (Осло-фьорд), на самой большой равнине, у самой крупной реки (Гломма), недалеко от крупнейшего озера (Мьеса), от наивысших вершин Скандинавских гор, от самых больших горных ледников, классических фьордов и их уникальных скальных обрамлений (Согне-фьорд, Хардангер-фьорд, Лиссе-фьорд, скала Прекестулен). Микро- и мезо-композиция Осло в физико-географическом отношении наиболее контрастна среди городов Норвегии.

Эти закономерности проявляются и в путешествиях по регионам России. Часто именно рядом

или недалеко от главного города располагаются очень известные природные объекты. Так, в экскурсионном пространстве Петрозаводска располагается водопад Кивач, Самары – Жигулевские горы, Перми – Кунгурская ледяная пещера, Екатеринбург – горные Бажовские места и природный парк «Оленьи ручьи», порог Ревун, утесистые берега Чусовой, Красноярска – заповедник «Красноярские Столбы», Иркутска – берега Байкала.

Контрастность вмещающего ландшафта и общественной компоненты города. Закономерное расположение городов на ландшафтных рубежах, в наиболее сложных по ландшафтной структуре местах, выражается в формировании асимметрии города. Контрастность природной основы – предпосылка архитектурно-планировочной асимметрии города и его ближайшего окружения, которая имеет очень разнообразные проявления и следствия. Планировочная асимметрия лежит в основе асимметрии пространственных связей, процессов, функций. На наш взгляд, наряду с понятием ландшафтной контрастности могут рассматриваться понятия ландшафтной симметрии и асимметрии и в некоторых случаях использоваться в контексте понятия контрастности.

Асимметрия – свойство мироздания. Это понятие используется во многих научных областях (биология, физика, математика и т. д.), оно трактуется двояко: как отсутствие симметрии и как глобальное свойство, частным случаем которого является симметрия. Симметрия и асимметрия природных комплексов рассматривалась многими исследователями в целом ряде географических и ландшафтоведческих работ на различных уровнях: от географической оболочки до локальных ландшафтных комплексов.

На конструктивную роль симметричного анализа при системном изучении ландшафтов обращает внимание В.Н. Солнцев [1981]. Увлекательно представил симметрию и асимметрию многих стран мира и регионов России А.И. Трейвиш, показав важность такой работы для теории и практики, при этом обращая внимание не только на морфологическую, но и на симметрию и асимметрию самого различного содержания. Интересен его вывод: «Географам важнее то, что всякая индивидуальность связана в первую очередь с асимметрией» [Трейвиш, 2009, с. 2].

Дилемма в том, что *общественная компонента города стремится к созданию симметричной территориальной системы, а его природная основа предопределяет асимметричное развитие города*. Городские системы всегда, во все времена теснейшим образом связаны с вмещающим природным ландшафтом, который является основой функцио-

нально-планировочной и архитектурно-пространственной организации, определяет характер транспортных связей, является основой рекреационной системы города и определяет характер визуального облика городов. Существует достаточно ограниченное количество типов планировочных структур (линейная, прямоугольная, радиально-кольцевая), которые используются при строительстве городов и определяются совокупностью ландшафтных условий и градостроительного замысла.

Склонность к симметрии в социально-экономической организации городского пространства показывают классические экономико-географические модели: изолированного государства И. Тюнена, центральных мест В. Кристаллера, экономического ландшафта А. Леша, поляризованного ландшафта Б.Б. Родомана [Тюнен, 1926; Christaller, 1933; Леш, 1959; Родоман, 2002].

Регулярность планировки города, прежде всего, диктуется требованиями компактности территорий и рациональности логистических связей, которые необходимы для сбережения времени, пространства, экономических затрат. Не случайно все «идеальные города» разных временных периодов характеризуются симметричностью планов; некоторые из них реализованы и сохранились именно в данной формальной структуре [Бунин, 1979; Бунин, Саваренская, 1979]. Идеальные модели городов, предлагаемые архитекторами, философами, градостроителями, как правило, обладают различного рода симметрией: круговой, центральной, осевой.

Современные архитектурно-планировочные модели городского пространства в своей основе также ориентируются в целом на симметричные формы. Функционально-градостроительные композиции тяготеют к симметричной геометрии планов (центрично-круговые, линейно-полосовые, квадратно-решетчатые, ветвистые, петлевые и др.) [Косицкий, Благовидова, 2007].

Даже на этапе градостроительного анализа природного ландшафта архитекторы, как правило, исходят из принципиальной симметрии городского пространства, принимая географические факторы чаще в виде локальной ситуации, в которую следует вписать модель, а не как природную формулу и ландшафтную матрицу. Однако при территориальном росте, экономическом и социальном развитии города они преобразуются в более сложные типы планировочных структур в соответствии с природной основой и появлением новых функционально-планировочных элементов.

Архитектурно-географические проявления городской асимметрии. Повышенная природная контрастность, сложные конфигурации ландшафтных границ, индивидуальность сочетания рубежей

контрастности – это факторы, приводящие к асимметрии города, это «силы», противодействующие симметрии города и стимулирующие его индивидуальность. Расположение на контрастных рубежах определяет природное многообразие биоклиматических и эколого-ландшафтных условий на территории городов, дополняемых многообразием характера городской застройки и технических систем.

Существует много примеров, свидетельствующих о тяготении городов к границам ландшафтов, к геоморфологическим и геологическим рубежам, к границам растительных и почвенных областей, к местам с повышенным гидрографическим разнообразием [Зырянов, 1995; Коломыц и др., 2000; Фирсова, 2011; Кашин, 2017]. К городам как бы сходятся границы любых природных районов, выделенных по принципу однородности. При таком расположении город оказывается в центре определенного социально-экономического района, но на границе районов природных. Пространственная противоположность экономического и природного районирования была замечена Ю.Г. Саушкиным [1959].

Такая особенность физико-географического положения городов является основой секторного строения территориальных социально-экономических систем, представляющих собой города и окружающие их районы. Транспортные пути при этом делятся на два типа. Пути, следующие вдоль ландшафтных рубежей, связывают опорные города систем расселения и являются основой территориальной организации региона. Пути, следующие

в направлении центров ареалов однородных ландшафтов, выполняют функцию связи центральных городов с менее значимыми поселениями. Крупнейший город региона (страны) обычно располагается в наиболее разнообразном в природном отношении месте, в узле ландшафтных рубежей контрастности высоких порядков. Положение города можно определить правилом «размер-позиция», которое выражается в том, что «позиции городов адекватны их размерам» [Зырянов, 2007].

Ландшафтоведы не раз обращали внимание на контрастные позиции населенных пунктов и формулировали закономерности в этом отношении. В.А. Низовцев и Н.М. Эрман, топографически детально изучая ландшафтное положение древнерусских городов Верхневолжья, особенно Ярославля, делают следующий вывод: «В ландшафтном плане почти все города (имеются в виду города рассматриваемого ареала. – А.З., Н.Ф.) занимают экотонное положение по границам (или рядом с ними) двух или трех и более ландшафтов с большим набором (от 30 до 40 видов) ландшафтных комплексов локального уровня с разнообразными природными свойствами» [Низовцев, Эрман, 2020, с. 81].

Приведем пример позиционного расположения города, используя классическую карту природного районирования [Физико-географическое районирование СССР..., 1968]. В районе Комсомольска-на-Амуре сходятся четыре ландшафтных рубежа, таким образом, стыкуются четыре природных комплекса уровня физико-географических областей (рис. 1).

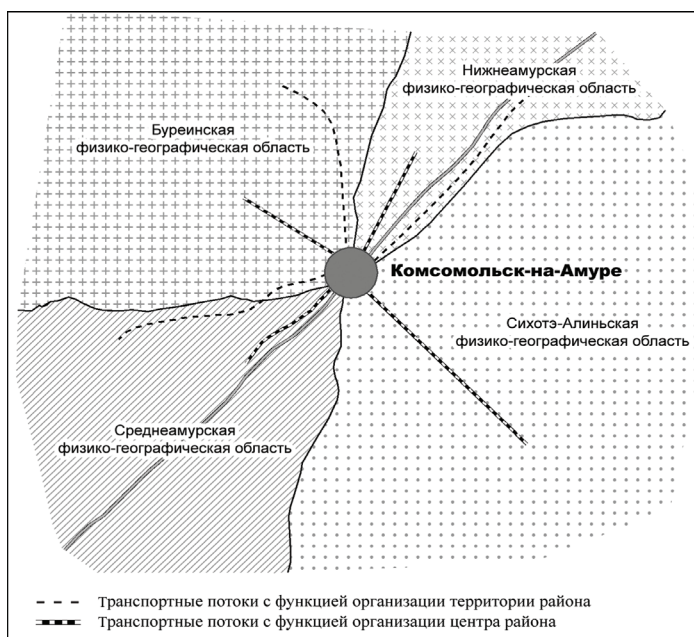


Рис. 1. Комсомольск-на-Амуре по отношению к ландшафтным рубежам. Физико-географическое районирование по А.Е. Криволицкому [Зырянов, 1995]

Fig. 1. The city of Komsomol'sk-na-Amure in relation to landscape boundaries. Physical-geographical zoning according to A.E. Krivolutsky [Zyryanov, 1995]

Прикамье, где стыкуются природные районы ранга физико-географических стран, можно отнести к территориям с повышенным ландшафтным разнообразием. Однако даже в районах, не обладающих подобной контрастностью природных рубежей, выявлены закономерности сопряжения городских поселений с природными границами разного ранга. В связи с этим авторы постарались раскрыть изучаемую тему на примере двух различающихся в этом отношении территорий – Пермского края и Воронежской области.

Ландшафтная рубежность и асимметрия города на примере городов Пермского края. Пространственное тяготение города к контрастной природной границе, к узлу природных гра-

ниц приводит к тому, что площадка города имеет контрастную природную основу, территорию со сложной ландшафтной мозаикой. Условно назовем основные пространственные линии, определяющие природную контрастность города, его ландшафтной матрицей, что не сильно противоречит пониманию *matrix* в экологии, где термин отражает ландшафтный сетевой фон [Forman, 1995]. Покажем это на примере двух городов Пермского края.

Средний по размерам город Чусовой располагается на границе горного Среднего Урала и равнинного Предуралья. Его территория имеет две разновеликие части: несколько меньшую горную и более обширную равнинную (рис. 2).

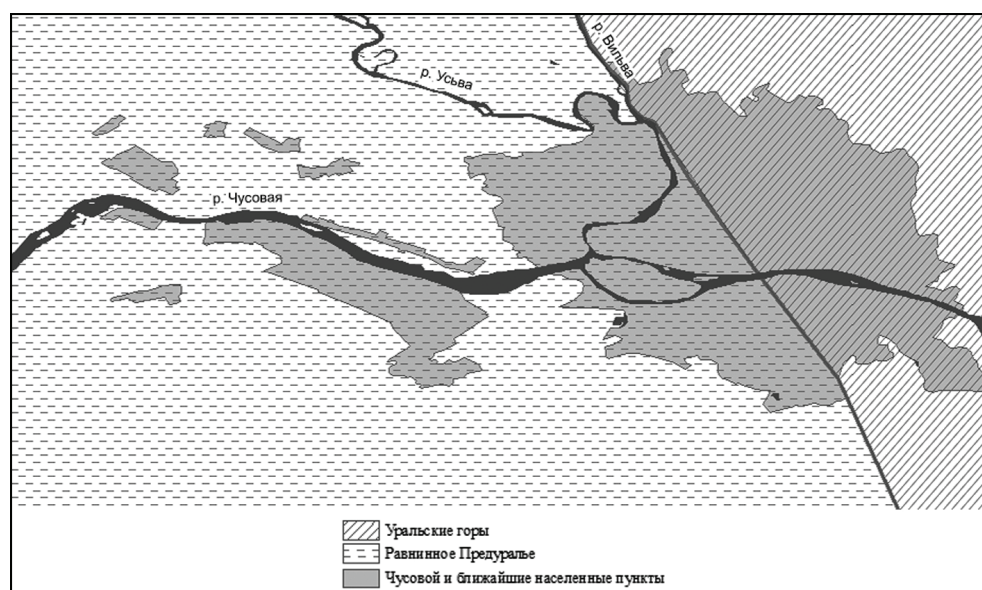


Рис. 2. Ландшафтная матрица Чусового [составлено авторами]

Fig. 2. Landscape matrix of the Chusovoy town [compiled by the authors]

Городское природное разнообразие формируется рекой Чусовой и ее крупным притоком Усьвой, который в свою очередь принимает свой крупнейший приток Вильву. В черте города кроме больших рек, имеющих острова и меандры, протекают еще и небольшие речки. Такое гидрографическое разнообразие повышает общую ландшафтную мозаичность города и ведет к тому, что две основополагающие природные, а именно геолого-геоморфологические, части города разделены речной сетью на большое число участков со сложной конфигурацией. Поэтому, город приобретает асимметричные свойства.

Красновишерск является малым городом и находится на стыке горного района Северного Урала и равнинного пояса Предуралья (рис. 3).

Горная часть Красновишерска составляет менее трети площади города. Город фактически находится

на одном, левом берегу полноводной Вишеры, которая в пределах города переходит от горного режима к равнинному. На правом берегу находится малоосвоенная из-за отсутствия мостов территория города. В Красновишерске «копилка» ландшафтного разнообразия, кроме геологии, рельефа и гидрографии, усиливается мозаикой беломошных боров, темнохвойной тайги и обширных низинных болот. Ландшафтный рисунок, концентрированное природное разнообразие выражаются в асимметрии города.

Проявления асимметрии на примере урбогеосистемы Воронежа. Наиболее детально предположки и проявления асимметричности города показаны на примере городского округа город Воронеж. Если изложенное выше касалось тем «расположение города», «город и окружение», то ниже мы перейдем к площадке города.

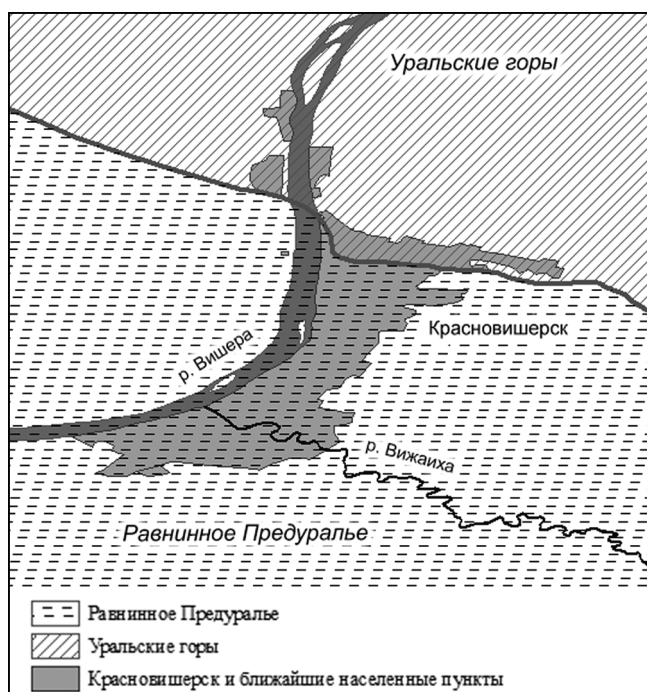


Рис. 3. Ландшафтная матрица Красновишерска
[составлено авторами]

Fig. 3. Landscape matrix of the Krasnovishersk town
[compiled by the authors]

Свойство асимметрии города лучше проявляется при обращении к геосистемной методологии, через конструкт урбогеосистем [Фирсова, 2012]. Асимметрия городов выражается в топографической, геологической, высотной, экспозиционной, функциональной, планировочной и других видах асимметрии урболандшафтных комплексов. Это определено как контрастностью и разнообразием природной среды, так и многообразием городской застройки (рис. 4).

Ландшафтная контрастность позиции города приводит к его асимметрии, которая проявляется в самых разнообразных аспектах. Опишем ряд проявлений урболандшафтной асимметрии Воронежа.

Ландшафтно-типологическая асимметрия. В связи с высокой природной мозаичностью районов города, разными исследователями выделяется в пространстве Воронежа большое число типов городских ландшафтов. В соответствии с эколого-географическим районированием Воронежской области, предложенным Ф.Н. Мильковым с соавторами [Мильков и др., 1996], территория Воронежа расположена в левобережном придолинно-террасовом эколого-географическом районе лесостепной провинции Окско-Донской низменной равнины. «Здесь можно встретить все семейства природных местностей Воронежской области, за исключением останцово-водораздельных комплексов» [Мильков и др., 1996, с. 117].

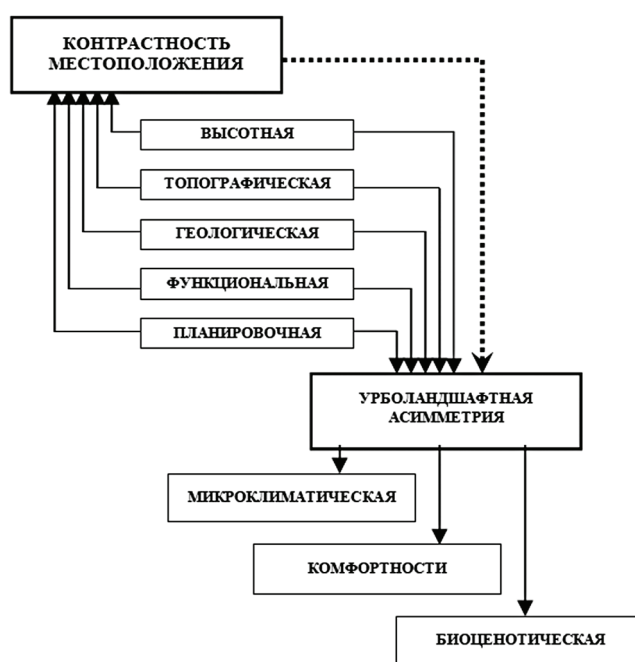


Рис. 4. Проявления урболандшафтной асимметрии

Fig. 4. Manifestation of urban landscape asymmetry

Г.Т. Гришин, М.В. Гончаров, И.С. Шевцов и др. выделяли на территории города: левобережный террасно-промышленный и жилой район; правобережный приречно-балочный селитебно-садовый микрорайон; плакорно-водораздельный административно-управленческий и торгово-распределительный район; плакорно-водораздельный селитебно-парковый и научно-учебный микрорайон; северо-запад, запад и юго-запад застроенной части города [Гришин и др., 1986].

Контрастная ландшафтно-типологическая картина Воронежа проявляется в асимметрии перечисленных сеток урбанизированных ландшафтных районов.

Инженерно-геологическая асимметрия. Городской округ Воронежа расположен в пределах динамически активной структуры – Кривоборского прогиба шириной около 30 км, располагающегося на границе Среднерусской возвышенности и Окско-Донской равнины. Это определяет контрастное расположение правобережной и левобережной частей города, которые значительно отличаются по абсолютным отметкам и характеру рельефа. Правобережная часть города расположена на междуречном холмистом плато с абсолютными отметками от 100 м в центральной части города до 164 м в северной части. Левобережная часть расположена на плоскоравнинной местности левобережья рек Воронеж и Усмань, постепенно переходящей в речную террасу с превышением над уровнем Воронежского водохранилища на 10–15 м.

По инженерно-геологическим условиям территория города условно разделена на три района:

район, не требующий инженерной подготовки; район, требующий инженерной подготовки; район, требующий весьма сложной подготовки и больших капиталовложений [Генеральный план..., 2007, с. 87]. Первый район охватывает водораздельное пространство с высокой несущей способностью грунтов. Более сложные инженерно-геологические условия на пологих склонах речных долин, на высоких террасах рек с развитыми эрозионными и суффозионными процессами, с наличием просадочных грунтов. Наиболее сложные участки расположены на крутых склонах правобережья водохранилища.

Функционально-планировочная асимметрия. В Воронеже функционально-планировочная и пространственно-композиционная контрастность города имеют меридиональный и широтный характер. Меридиональная асимметрия определяется, прежде всего, морфологическими различиями левого и правого берегов Воронежского водохранилища. В Воронеже, на первый взгляд компактном, тяготеющем к радиально-кольцевой организации города, сосуществуют два основных района, имеющих принципиально разные планировочные структуры: это его правобережная и левобережная части. Исторически сложившаяся наиболее древняя правобережная часть города, располагающаяся на склоновых территориях правого и возвышенной плакорной части берега р. Воронеж (Воронежского водохранилища), представляет собой компактную радиальную структуру. В отличие от правобережной части, левобережная часть города представляет собой линейную структуру, вытянутую вдоль Воронежского водохранилища. Линейной структуре левобережной части соответствует линейно-узловой характер системы общественных центров.

Рассматривая широтную асимметрию функционально-планировочной организации, можно выделить северную и южную части города. К северной части города приурочены селитебные, учебные, рекреационные зоны. В южной части, наряду с жилыми, общественными и рекреационными объектами, расположены промышленные предприятия, очистные сооружения, коммунально-складские зоны, территории режимного характера и специального назначения.

Микроклиматическая асимметрия. На климат Воронежа существенное влияние оказывает Воронежское водохранилище. В наибольшей степени водохранилище влияет на температурно-влажностный режим левобережной части, имеющей небольшое превышение отметок – на 10–15 м над уровнем водохранилища. В безветренную погоду разница в температуре воздуха у уреза воды и на расстоянии в 1200 м не превышает 1°C [Затулей, 1986, с. 41–42]. На правом берегу на этом же расстоянии отмечается

температура на 1,7–2,5°C выше, чем у уреза воды. Это обусловлено более крутыми склонами и плотной застройкой правобережья. Существует определенная разница в температурном режиме правого и левобережья – теплее на левом берегу. По данным В.Я. Хрипяковой, «на территории Воронежа можно выделить четыре типа погоды в границах застроенной части: 1) псевдоциклонально-городской („острова тепла“); 2) бризовый аквально-долинный; 3) городской умеренно-влажный; 4) городской умеренный» [Хрипякова, 1999, с. 82].

Асимметрия биоразнообразия. Исследование биоразнообразия Воронежа показывает чрезвычайную неоднородность территории города в этом отношении. Оценка геоморфологических условий и состояния лесной растительности позволила выделить на территории пригородной зеленой зоны Воронежа три района: 1) западный район правобережных дубрав Среднерусской возвышенности; 2) северо-восточный район дубово-сосновых лесов приречных террас Окско-Донской низменности; 3) юго-восточный малолесный район низкоствольных дубрав и искусственных сосновых насаждений Окско-Донской низменности [Шаталов и др., 1999].

Распределение зеленых участков общего пользования по территории города крайне неравномерно. Если на каждого из 90 тыс. жителей Центрального района приходится 19 м² зеленых насаждений, то в Ленинском и Железнодорожном районах города этот показатель составляет 3,4 и 2,8 м² соответственно. Обеспеченность Левобережного района составляет 5,5 м², в Коминтерновском районе на одного жителя приходится 16,2 м² зеленых насаждений с учетом лесопарков, без учета лесопарков – 3,3 м², в Советском районе – 8,4 м², без учета лесопарков – 3,4 м² [Фирсова и др., 2007].

Размещение особо охраняемых природных территорий в границах городского округа также свидетельствует о высокой контрастности городских земель по уровню биоразнообразия. Из семнадцати памятников природы, расположенных на территории Воронежа, подавляющее большинство размещено в северной части города, включая гидрологический памятник (левобережный приток р. Воронеж – р. Усмань), геологический памятник (Лысая гора в районе санатория им. Горького), старовозрастные участки Воронежской нагорной дубравы, ботанический сад ВГУ, ботаническую станцию ВГАУ, дендропарки ВГЛТА и ВГАУ, посадки по ул. Дуговой. В южной части города статус особо охраняемых территорий получили всего два участка: остатки вековой дубравы в окрестностях поселка Тенистый и остепненная поляна в нагорной дубраве [Биоразнообразие..., 2004].

Таким образом, на территории Воронежа наблюдается выраженная асимметричность урбо-ландшафтных комплексов, которая проявляется во многих аспектах: ландшафтном, архитектурно-планировочном, климатическом, экологическом и др.

ВЫВОДЫ

Географическая наука всегда отмечала сложность изучаемой действительности, уникальность земных объектов, явлений и ситуаций, но пыталась найти типичное, всеобщее. Два географических феномена – город и ландшафт – имеют некоторые типичные пространственные отношения, которые приводят к закономерной асимметрии города и выражаются в индивидуальности городов.

Ландшафтное разнообразие, которое отражает природно-ресурсное разнообразие территории, является необходимым условием формирования города. Карта ландшафтов или карта физико-географического районирования с контурами границ – это карта ландшафтных рубежей контрастности, которые являются одновременно ресурсными поясами и линиями концентрации городов. Город оказывается в центре определенного социально-экономического района, но на границе районов природных.

Города располагаются в узлах ландшафтных рубежей контрастности, при этом иерархия городов и рубежей согласуются. Система городов Урала, и особенно Пермского края, а также система городов Центрального Черноземья соответствует этому правилу. В Пермском регионе особое значение имеют геолого-геоморфологические рубежи. В Центрально-Черноземном регионе наибольшее влияние на размещение, величину, рост, территориальную организацию и композиционные приемы застройки городов оказывают речные долины.

Позиционные закономерности тяготения городов к ландшафтным рубежам контрастности выражаются в сложном рисунке рубежей в пределах города и его окружения. Уникальность рисунка ландшафта и индивидуальность рубежной структуры формируют индивидуальность города. Рисунок основных ландшафтных рубежей контрастности, его абрис, можно считать природной «матрицей» города, т. е. фундаментальной особенностью, определяющей «географическую формулу» места. Ландшафтная матрица города является важным фактором его индивидуальности.

Город имеет сильное «поле», организует окружение, является центром окружающего района вели-

чиной, находящейся в соответствии с размером города. Секторность рисунка ландшафтных рубежей города способствует секторному строению окружающего его района. Рубежно-узловое положение города ведет к мозаичному строению городского окружения, индивидуальности функционально-территориальной структуры.

Ландшафтное разнообразие природной основы формирует функционально-планировочную и архитектурно-пространственную асимметрию города как универсального свойства городов любого иерархического ранга. Асимметрия города дополняется асимметрией окружающего его района. На примере городского округа города Воронежа показано, что положение на природных рубежах и концентрированная ландшафтная мозаика проявляются в асимметрии инженерно-геологических условий, функционально-планировочной структуры, микроклиматического районирования, биолого-почвенной среды, условий озеленения, системы особо охраняемых природных территорий.

Контрастность природной основы города – фундаментальное географическое свойство, которое находит выражение во многих аспектах городского устройства и функционирования. Расположение на контрастных рубежах определяет природное многообразие биоклиматических и эколого-ландшафтных условий на территории городов, дополняемых многообразием характера городской застройки и технических систем.

Общественная компонента города стремится к созданию симметричной территориальной системы, а его природная основа предопределяет асимметричное развитие города. Пространственно-планировочная асимметрия лежит в основе асимметрии пространственных связей, процессов и функций. Архитектурно-планировочные модели городского пространства в своей основе ориентируются в целом на симметричные формы. Таким образом, некоторые аспекты формирования города оказываются вне зоны внимания в градостроительной деятельности и недостаточно учитываются при прогнозировании, проектировании и регулировании городских систем.

Изучение закономерностей взаимодействия природных рубежей и городских систем приводит к выводу о необходимости изменения методологических подходов к формированию и развитию городов, включая использование современных информационных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Биоразнообразие города Воронежа / под ред. О.П. Негрובה. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2004. 98 с.
- Бунин А.В. История градостроительного искусства. Т. I: Градостроительство рабовладельческого строя и феодализма. М.: Стройиздат, 1979. 495 с.
- Бунин А.В., Саваренская Т.Ф. История градостроительного искусства. Т. II: Градостроительство XX века в странах капиталистического мира. М.: Стройиздат, 1979. 411 с.
- Генеральный план городского округа г. Воронеж // Воронежский курьер. 2007. 162 с.
- Гришин Г.Т., Гончаров М.В., Швецов И.С. Воронеж: экономико-географическое исследование. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1986. 224 с.
- Затудей К.С. Влияние водохранилища на метеорологические условия побережья // Воронежское водохранилище: комплексное изучение, использование и охрана. Воронеж, 1986. С. 139–144.
- Зырянов А.И. Ландшафтные рубежи контрастности и территориальные социально-экономические системы. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1995. 144 с.
- Зырянов А.И. Правило размер-позиция // Известия РАН. Сер. геогр. 2007. № 6. С. 16–25.
- Кашин А.А. Ландшафтные границы как фактор расселения населения (на примере Удмуртии) // Россия и ее регионы в полимасштабных интеграционно-дизинтеграционных процессах: материалы Международной научной конференции в рамках VIII ежегодной научной ассамблеи Ассоциации российских географов-обществоведов. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2017. С. 225–230.
- Коломыц Э.Г., Розенберг Г.С., Глебова О.В. Природный комплекс большого города: Ландшафтно-экологический анализ. М.: Наука, 2000. 286 с.
- Косицкий Я.В., Благовидова Н.Г. Основы теории планировки и застройки городов. М.: Архитектура, 2007. 75 с.
- Леш А. Географическое размещение хозяйства / пер. с англ. Л.А. Азенштадта [и др.]. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. 455 с.
- Мильков Ф.Н. Физическая география: современное состояние, закономерности, проблемы. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1986. 398 с.
- Мильков Ф.Н., Мухно В.И., Федотов В.И. Эколого-географические районы Воронежской области / под ред. проф. Ф.Н. Милькова. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1996. 216 с.
- Низовцев В.А., Эрман Н.М. Ландшафтные условия развития древнерусских городов в средневековый период на верхневолжском отрезке Волжско-Каспийского пути (на примере г. Ярославля) // Вестник Академии наук Чеченской Республики. 2020. № 3(50). С. 73–83.
- Родоман Б.Б. Вдохновляющие заречья // География. 2010. № 13(909). С. 3–12; № 14(910), С. 12–20.
- Родоман Б.Б. Поляризованная биосфера: сб. статей. Смоленск: Ойкумена, 2002. 336 с.
- Саушкин Ю.Г. Сопоставление сеток основных экономических и тектонических районов СССР // Вопросы географии. 1959. Сб. 47. С. 104–122.
- Солнцев В.Н. Системная организация ландшафтов: Проблемы методологии и теории. М.: Мысль, 1981. 239 с.
- Трейвиш А.И. Симметрия и асимметрия геопространства в страноведческом анализе // Вопросы экономической и политической географии зарубежных стран. Вып. 18: Территориальная структура хозяйства и общества зарубежного мира. М.; Смоленск: Ойкумена, 2009. С. 7–23.
- Тюнен И.Г. Изолированное государство. М.: Изд-во газеты «Экономическая жизнь», 1926. 326 с.
- Физико-географическое районирование СССР. Характеристика региональных единиц / под ред. Н.А. Гвоздецкого. М., 1968. 576 с.
- Фирсова Н.В., Негрбов О.П., Побединский Г.Д. Ландшафтно-экологическая организация природного комплекса общегородского центра // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2007. № 1. С. 100–107.
- Фирсова Н.В. Типология урбогеосистем ЦЧР по положению в системе физико-географических и биogeографических рубежей региона // Проблемы региональной экологии. 2011. № 6. С. 87–92.
- Фирсова Н.В. Урбогеосистемы Центрально-Черноземного региона: природно-ландшафтные особенности, типология, землепользование. Воронеж: Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т, 2012. 268 с.
- Хрипякова В.Я. Микроклимат большого города // Экологические проблемы крупного города. Экологический вестник Черноземья. Воронеж, 1999. Вып. 7. С. 81–98.
- Шаталов В.Г., Кругляк В.В., Венгеров П.Д., Масалыкин А.И. Комплексная биологическая оценка современного состояния зеленой зоны города Воронежа // Лесные экосистемы зеленой зоны города Воронежа. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1999. С. 15–19.
- Christaller W. Die zentralen Orte in Süddeutschland: Eine ökonomisch-geographische Untersuchung über die Gesetzmäßigkeit der Verbreitung der Siedlungen mit städtischen Funktionen, Ph.D. thesis, Erlangen, Gustav Fischer, Jena, 1933.
- Forman R.T. Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 1995, 652 p.

Поступила в редакцию 20.07.2021

После доработки 04.02.2022

Принята к публикации 13.05.2022

CITY ASYMMETRY: THE INFLUENCE OF LANDSCAPE BORDERS ON THE STRUCTURE OF THE SETTLEMENT AND ITS SURROUNDINGS

A.I. Zyryanov¹, N.V. Firsova²

¹ Perm State National Research University, Faculty of Geography, Department of Tourism, Head of the Department, D.Sc. in Geography; e-mail: aizyrianov@gmail.com

² Voronezh State Technical University, Department of Urban Planning, Professor, D.Sc. in Geography, Ph.D. in Architecture; e-mail: kafgradvgasu@yandex.ru

Asymmetry is a fundamental property of cities as geographical objects. Asymmetric features of a city are associated with the contrast of its natural basis. Landscape contrast lines correspond to belts with increased resource diversity and are lines of concentration of cities. The nodes of contrast landscape boundaries are often the locations of cities. The nodal boundary position of a city leads to the sector-mosaic structure of surrounding area. The high landscape diversity at the location contributes to the aesthetics of a large city and is expressed in higher concentration of tourist sites in its surroundings. The pattern of main natural boundaries, or landscape matrix, in the space of a city and its surroundings form the basis for asymmetry properties of the city and its complementary region. Asymmetric features of the city are particularly characteristic for its landscape-typological plan, functional-planning scheme, engineering-geological structure, microclimatic zoning, as well as biological and soil conditions.

Keywords: landscape contrast lines, planning structure of the city, Permskiy Kray, Voronezh

REFERENCES

- Bioraznoobraziye goroda Voronezha [Biodiversity of the city of Voronezh], O.P. Negrobov (ed.), Voronezh, Voronezh State University Publ., 2004, 98 p. (In Russian)
- Bunin A.V. *Istoriya gradostroitel'nogo iskusstva, t. I, Gradostroitel'stvo rabovladel'cheskogo stroya i feodalizma* [History of urban planning art, vol. I, Urban planning during the slave system and feudalism], Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 495 p. (In Russian)
- Bunin A.V., Savarenskaya T.F. *Istoriya gradostroitel'nogo iskusstva, t. II, Gradostroitel'stvo XX veka v stranakh kapitalisticheskogo mira* [History of urban planning art, vol. II, Urban planning of the 20th century in the countries of the capitalist world], Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 411 p. (In Russian)
- Christaller W. *Die zentralen Orte in Süddeutschland: Eine ökonomisch-geographische Untersuchung über die Gesetzmäßigkeit der Verbreitung der Siedlungen mit städtischen Funktionen*, Ph.D. thesis, Erlangen, Gustav Fischer, Jena, 1933.
- Firsova N.V. Tipologiya urbogeosistem TsChR po polozeniyu v sisteme fiziko-geograficheskikh i biogeograficheskikh rubezhej regiona [The typology of urban geosystems of the Central Chernozem region according to their position in the system of physico-geographical and biogeographic boundaries of the region], *Problemy regional'noy ekologii*, 2011, no. 6, p. 87–92. (In Russian)
- Firsova N.V. *Urbogeosistemy Tsentral'no-Chernozemnogo regiona: prirodno-landshaftnyye osobennosti, tipologiya, zemlepol'zovaniye* [Urbogeosystems of the Central Chernozem Region: natural landscape features, typology, land use], Voronezh state architectural building Univ., Voronezh, 2012, 268 p. (In Russian)
- Firsova N.V., Negrobov O.P., Pobedinsky G.D. *Landshaftno-ekologicheskaya organizatsiya prirodnogo kompleksa obshchegorodskogo tsentra* [Landscape-ecological organization of the natural complex of the city-wide center], *Bulletin of the Voronezh State University, Ser.: Chemistry. Biology. Pharmacy*, 2007, no. 1, p. 100–107. (In Russian)
- Fiziko-geograficheskoye rayonirovaniye SSSR, *Kharakteristika regional'nykh edinit* [Physico-geographical zoning of the USSR, Description of regional units], N.A. Gvozdetzky (ed.), Moscow, 1968, 576 p. (In Russian)
- Forman R.T. *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 1995, 652 p.
- Grishin G.T., Goncharov M.V., Shevtsov I.S. *Voronezh: ekonomiko-geograficheskoye issledovaniye* [Voronezh: economic and geographical research], Voronezh, Publishing House of Voronezh State University, 1986. (In Russian)
- Kashin A.A. [Landscape boundaries as a factor of population distribution (case study of Udmurtia)], *Rossiya i eyo regiony v polimashtabnykh integratsionno-dezintegratsionnykh protsessakh, materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii v ramkakh VIII Yezhegodnoy nauchnoy assamblei Assotsiatsii rossiyskikh geografov-obshchestvovedov* [Russia and its regions in multi-scale integration and disintegration processes, materials of the International scientific conference in the framework of the VIII Annual Scientific Assembly of the Association of Russian Geographers-Social scientists], Perm, 2007, p. 225–230. (In Russian)
- Khripyakova V.Ya. [Microclimate of a large city], *Ekologicheskoye problem krupnogo goroda, Ekologicheskij vestnik Chernozemiya* [Environmental problems of a large city, Ecological Bulletin of Chernozem Region], Voronezh, 1999, iss. 7, p. 81–98. (In Russian)
- Kolomyts E.G., Rosenberg G.S., Glebova O.V. *Prirodnyy kompleks bol'shogo goroda: landshaftno-ekologicheskii analiz* [The natural complex of a big city: Landscape-ecological analysis], Moscow, Nauka Publ., 2000. (In Russian)
- Kositsky Ya.V., Blagovidova N.G. *Osnovy teorii planirovki i zastroyki gorodov* [Fundamentals of the theory of urban planning and development], Moscow, Architecture Publ., 2007, 75 p. (In Russian)
- Lesh A. *Geograficheskoye razmeshcheniye khozyaystva* [Geographic location of the economy], Moscow, Inostr. Lit. Publ., 1959, 455 p. (In Russian)

- Milkov F.N. *Fizicheskaya geografiya: sovremennoye sostoyaniye, zakonomernosti, problemy* [Physical geography: current status, patterns, problems], Voronezh, 1981, 398 p. (In Russian)
- Milkov F.N., Mikhno V.I., Fedotov V.I. *Ekologo-geograficheskiye rayony Voronezhskoy oblasti* [Ecological and geographical areas of the Voronezh region], F.N. Milkov (ed.), Voronezh, Publishing House of Voronezh State University, 1996, 216 p. (In Russian)
- Nizovtsev V.A., Erman N.M. *Landshaftnye usloviya razvitiya drevnerusskikh gorodov v srednevekovy period na verkhnevolzhskom otrezke Volzhsko-Kaspiyskogo puti (na primere g. Yaroslavl)* [Landscape conditions for the development of old Russian cities in the medieval period in the Upper Volga stretch of the Volga-Caspian route (by the example of Yaroslavl)], *Vestn. Akademii nauk Chechenskoy Respubliki*, 2020, no. 3(50), p. 73–83. (In Russian)
- Rodoman B.B. *Polyarizovannaya biosfera*, Sbornik statej [Polarized biosphere, Digest of articles], Smolensk, Oikumena Publ., 2002, 336 p. (In Russian)
- Rodoman B.B. *Vdokhnovlyayushchiye zarech'ya* [Inspirational panoramas across the rivers], *Geografiya*, 2010, no. 13(909), p. 3–12; no. 14(910), p. 12–20. (In Russian)
- Saushkin Yu.G. [Comparison of the grids of the main economic and tectonic regions of the USSR], *Voprosy geografii* [Problems of Geography], 1959, no. 47, p. 104–122. (In Russian)
- Shatalov V.G. Kruglyak V.V., Vengerov P.D., Masalykin A.I. [Complex biological assessment of the current state of the green zone of the city of Voronezh], *Lesnye ekosistemy zelenoy zony goroda Voronezh* [Forest ecosystems of the green zone of the city of Voronezh], Voronezh, Voronezh Publ. House, State University, 1999, p. 15–19. (In Russian)
- Soltsev V.N. *Sistemnaya organizatsiya landshaftov: Problemy metodologii i teorii* [Systemic organization of landscapes: Problems of methodology and theory], Moscow, Mysl' Publ., 1981, 239 p. (In Russian)
- The General plan of the urban district of Voronezh*, Voronezh courier Publ., 2007, 162 p. [In Russian]
- Treivish A.I. [Symmetry and asymmetry of geospace in regional geographic analysis], *Voprosy ekonomicheskoy i politicheskoy geografii zarubezhnykh stran*, vyp. 18, *Territorial'naya struktura khozyaystva i obshchestva zarubezhnogo mira* [Problems of economic and political geography of foreign countries, iss. 18, Territorial structure of economy and society of the foreign world], 2009, Moscow, Smolensk, Oikumena Publ., p. 7–23. (In Russian)
- Tyunen I.G. *Izolirovannoe gosudarstvo* [An isolated state], Moscow, Ekonomicheskaya zhizn' Publ., 1926, 326 p. (In Russian)
- Zatuley K.S. [Influence of the reservoir on the meteorological conditions of the coast], *Voronezhskoe vodokhranilische: kompleksnoe izuchenie, ispolzovanie i okhrana* [Voronezh reservoir: comprehensive study, use and protection], Voronezh, 1986, p. 139–144. (In Russian)
- Ziryanov A.I. *Pravilo razmer-pozitsiya* [Rules size-position], *Izvestiya RAN, Ser. Geogr.*, 2007, no. 6, p. 16–25. (In Russian)
- Zyryanov A.I. *Landshaftnyye rubezhi kontrastnosti i territorial'nyye sotsial'no-ekonomicheskiye sistemy* [Landscape contrast lines and territorial socio-economic systems], Perm', 1995, 144 p. (In Russian)

Received 20.07.2021

Revised 04.02.2022

Accepted 13.05.2022

ЭКСТРЕМУМЫ И ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ ГОРОДА МОСКВЫ

Е.В. Горбаренко

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: catgor@mail.ru

Представленная работа продолжает исследование причин климатических изменений в Московском регионе на базе наблюдений МО МГУ. Проведен анализ многолетней динамики основного климатообразующего фактора – радиационного режима атмосферы. На протяжении 65-летнего периода наблюдений на фоне квазипериодических изменений отмечены значимые тенденции для всех радиационных параметров атмосферы, наиболее выраженные в зимний период. Наибольший рост на 26, 16 и 49% отмечен для среднегодовых значений и на 73, 41 и 34% для зимних значений радиационного, длинноволнового балансов и температуры поверхности почвы соответственно. В XXI в. усилились тенденции уменьшения аэрозольной мутности атмосферы, роста прямой и уменьшения рассеянной радиации. Практически вдвое увеличилась скорость повышения длинноволнового и радиационного баланса, температуры поверхности почвы. В отсутствии значительных вулканических извержений главным естественным фактором стал «парниковый эффект» облачности. Антропогенная составляющая аэрозольной мутности в последние годы существенно снизилась, что связано с рядом мер правительства Москвы по улучшению экологии в городе. Антропогенное влияние на радиационный режим в городе проявилось в усилении длинноволновых потоков, что привело к росту интенсивности «острова тепла» в XXI в.

Ключевые слова: мониторинг, радиационные потоки, облачность, аэрозоль, альbedo, изменение климата

DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-90-103

ВВЕДЕНИЕ

Для оценки климатических изменений и понимания их причин первостепенное значение имеет обобщение и анализ результатов мониторинга за метеорологическими величинами и климатообразующими факторами. Основой такого мониторинга являются репрезентативные, однородные, долговременные ряды данных, получаемые на сети наземных метеорологических и актинометрических станций.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова стал одним из первых университетов в мире, где в 1808 г. начались регулярные метеорологические наблюдения, которые продолжались до августа 1812 г. С тех пор наблюдения в МГУ возобновлялись неоднократно, но были эпизодическими и проводились на разных площадках [Шиловцева, 2014]. При формировании новой территории МГУ на Ленинских горах для практического обучения студентов географического факультета была построена и оснащена самым передовым оборудованием метеорологическая обсерватория (МО МГУ). В настоящее время МО МГУ является единственной станцией России, где более 65 лет проводится уникальный комплекс актинометрических наблюдений. МО МГУ входит в российскую актинометрическую сеть, а также в Мировой центр радиационных данных (МЦРД) (<http://wrdc.mgo>.

[rrssi.ru](http://wrdc.mgo)). Данные МО МГУ используются в оценочных докладах Росгидромета об изменениях климата и в мировых обзорах тенденций изменчивости радиационных потоков [Второй оценочный..., 2014; Wild, 2009; Ohmura, 2009].

В 2020 г. по гранту на обновление приборной базы в рамках федерального проекта «Развитие передовой инфраструктуры для проведения исследований и разработок в Российской Федерации» национального проекта «Наука» в МО МГУ был поставлен комплекс актинометрических приборов голландской фирмы Kipp & Zonen. Приборами этой фирмы оснащена сеть базовых станций по исследованию радиационных процессов (BSRN) мирового радиационного центра [Schmithüsen et al., 2019]. Модернизация актинометрического комплекса МО МГУ позволит соответствовать мировым исследованиям в этой области и продлить уникальный многолетний мониторинг за радиационным режимом атмосферы, начатый в МО МГУ в 1955 г.

Представленная работа продолжает исследование причин климатических изменений в Московском регионе на базе наблюдений МО МГУ [Абакумова и др., 2012; Климат Москвы..., 2017]. Проведен анализ многолетней (1955–2020) динамики основного климатообразующего фактора – радиационного режима атмосферы. Оценены особенности радиа-

ционного режима в XXI в. Рассмотрены изменения 30-летних климатических норм радиационных параметров атмосферы. Выделены и оценены их экстремальные сезонные и годовые значения, многолетние изменения. Экстремальные значения, выбранные за большой период наблюдений, определяют возможные пределы естественной изменчивости климата региона. Направленные тенденции – тренды отражают современные климатические изменения, вызванные естественными и антропогенными процессами. Исследование сезонной структуры трендов дает возможность через влияние облачности, отражающей особенности региональной циркуляции атмосферы на радиационные потоки, оценить важный естественный фактор изменения климата – изменение общей циркуляции атмосферы. Климатические изменения, вызванные естественными факторами, усиливаются городской средой [Кислов и др., 2017]. Это влияние прослеживается при подробном анализе временных рядов радиационных потоков и факторов, определяющих их изменчивость.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

За основу работы взяты инструментальные ежедневные наблюдения МО МГУ за потоками интегральной солнечной радиации: прямой (S), рассеянной (D), суммарной (Q), отраженной (R_k); за радиационным балансом (B) и его длинноволновой составляющей (B_d). Составляющие длинноволнового баланса – собственное излучение поверхности и противоизлучение атмосферы (E_a) – рассчитываются. По данным регистрации рассчитываются часовые, суточные, месячные и годовые суммы радиации. В конце каждого месяца формируется электронная база данных и электронная версия «Бюллетеня МО МГУ».

В качестве факторов, регулирующих изменчивость потоков, в работе рассмотрены: продолжительность солнечного сияния в часах (ПСС), балл общей (N) и нижней (n) облачности, форма облаков, аэрозольная оптическая толщина атмосферы (АОТ), температура и альbedo (A) подстилающей поверхности. Подробное описание приборов и методов измерений приведено на сайте МО МГУ (www.momsu.ru).

Анализ многолетней изменчивости радиационных параметров атмосферы проведен для месячных, сезонных и годовых значений. Значения сумм радиационных потоков приведены в МДж/м². Динамика их климатических норм, в соответствии с требованиями ВМО, рассмотрена за 30-летние периоды (1961–1990, 1971–2000, 1981–2010, 1991–2020). В работе [Gorbarenko, 2016] было показано, что, начиная с середины 1990-х гг., для многих радиационных параметров отмечаются значимые тенденции, отличные от прошлых лет. Представляется инте-

ресным проследить, сохраняются ли эти тенденции в последние десятилетия. Особенности радиационного режима XXI в. оценены путем сравнения между собой норм 1961–1990 и 1991–2020 и оценки относительно этих норм средних значений радиационных параметров за период с 2000 по 2020 г. Сравнение произведено по следующим формулам:

$$d = (\text{норма (1991–2020)} - \text{норма (1961–1990)}) / \text{норма (1961–1990)} \cdot 100\%;$$

$$d_1 = (\text{среднее (2000–2020)} - \text{норма (1961–1990)}) / \text{норма (1961–1990)} \cdot 100\%;$$

$$d_2 = (\text{среднее (2000–2020)} - \text{норма (1991–2020)}) / \text{норма (1991–2020)} \cdot 100\%.$$

Аномалии радиационного баланса и температуры воздуха оценивались как отклонения соответствующих величин от текущей нормы 1981–2010, выраженные в процентах. Для анализа условий изменений атмосферной циркуляции использовались временные ряды среднемесячных значений индексов атмосферной циркуляции – STANDARDIZED NORTHERN HEMISPHERE TELECONNECTION INDICES (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>), среди которых выделены следующие циркуляционные моды: Североатлантический (NAO), Полярно-Евразийский (Polar-Eurasia – POL), Скандинавский (Scandinavian – SCAN), Восточно-Атлантический (East Atlantic – EA), Восточно-Атлантический – Западно-Российский (East Atlantic – West Russia – EAWR).

Временные ряды аппроксимировались линейными функциями и полиномиальными уравнениями второго порядка. Оценка линейных трендов осуществлялась методом наименьших квадратов. Рассчитывалась относительная величина тренда $\Delta = (\Delta y / y_1) 100\%$. Где $\Delta y = y_n - y_1$ – общее линейное изменение параметра за рассматриваемый период; y_1 и y_n – значения параметра в первый и последний годы рассматриваемого периода, рассчитанные по уравнению линейного тренда ($y = ax + b$). Статистическая значимость линейного тренда оценивалась с помощью критерия Стьюдента. В качестве характеристик тренда в работе приведены коэффициент линейного тренда, характеризующий среднюю скорость соответствующей тренду переменной, отнесенный к 10 годам ($a \cdot 10$), уровень значимости (P) и относительная величина тренда в процентах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетняя изменчивость факторов, определяющих приход и перераспределение радиационных потоков. Величины радиационных потоков в определенной точке земной поверхности зависят от ее географических координат, высоты солнца,

состояния атмосферы и подстилающей поверхности. Отклонения радиационных потоков от периодического хода являются откликом на колебания факторов, определяющих их изменчивость. Причины временной изменчивости этих факторов опосредованно определяют и изменчивость радиационных потоков.

Основной естественный процесс, влияющий на приход и перераспределение радиации, – режим облачности. За 1965–2020 гг. на фоне квазипериодических изменений количества облаков наблюдается значимый линейный тренд к увеличению средних годовых значений балла общей и нижней облачности (табл. 1; рис. 1А, 2А). В период последних 30 лет относительно периода 1961–1990 гг. разница (d) в среднем за год составила 3% как для общей, так и для нижней облачности, прежде всего за счет роста на 6 и 14% балла общей и нижней облачности в зимний период (табл. 2). Тенденция к увеличению общей облачности отмечается во все сезоны года. В XXI в. тенденция увеличения общей облачности сохранилась ($d_2 = 1\%$), для нижней облачности изменилась на противоположную ($d_2 = -1\%$) (табл. 1, 2; рис. 3А). При аппроксимации линейной зависимостью годовых значений ПСС за 1955–2020 гг. отмечается значимая положительная тенденция с увеличением на 20 часов в 10 лет. В годовых значениях она проявилась в основном за счет роста ПСС в весенние и летние, в меньшей степени осенние месяцы года, d равнялось 9, 6, и 4% соответственно (см. табл. 1, 2). Казалось бы, в тенденциях этих метеорологических величин есть несоответствие. Однако для облаков нижнего яруса, оказывающих основное влияние на ПСС для пяти месяцев в году, наметилась тенденция уменьшения балла. Наибольшее уменьшение на 1,4 балла за 10 лет наблюдалось в апреле, на 0,8 балла в августе и 0,3 балла в октябре (рис. 4А). Климатическая норма балла нижней облачности 1991–2020 гг., с весны до осени уменьшилась по сравнению с нормой 1961–1990 гг., d составило –5, –4, –2% соответственно (см. табл. 1; рис. 3А). Это уменьшение произошло за счет существенного снижения с середины 1990-х гг. повторяемости пасмурного (10/10 балла) неба, а также уменьшения повторяемости слоисто-дождевой облачности. Подобная тенденция проявилась в разных регионах [Второй оценочный доклад..., 2014; Chernokulsky et al., 2016; Foster et al., 2020]. Основным фактором изменчивости облачности является крупномасштабная атмосферная циркуляция, которая описывается индексами атмосферной циркуляции (АЦ). Их временная изменчивость играет важную роль в современных климатических изменениях Северного полушария [Кононова, 2013; Попова и др., 2018]. Для Северного полушария во внетропических широтах наиболее

значительно влияние индексов NAO и SCAN. При рассмотрении связи между количеством нижней облачности и индексами АЦ, характеризующими зональные и меридиональные залоки, обнаруживается ее внутригодовая изменчивость (табл. 3). В зимние месяцы повышение как общей, так и нижней облачности связано с повышением индекса NAO. Для нижней облачности эта связь более значима, при таких ситуациях, как правило, образуется дождевая облачность. NAO в основном определяет режим зимнего сезона, в летний период его влияние на облакообразование ослабевает, большую роль играет термическая конвекция. Усиление меридиональной составляющей циркуляции SCAN в течение всего года определяет уменьшение количества облачности, что связано с большей повторяемостью малооблачной погоды. Интересно сопоставить тренды балла нижней облачности с трендами основных индексов, определяющих синоптические особенности региона (см. рис. 2А). В межгодовой изменчивости периоды роста облачности совпадают с повышением индекса NAO и понижением индекса SCAN. Такие изменения индексов отражают преобладание зональной циркуляции. В эти же периоды отмечается понижение суммарного солнечного потока, о чем будет сказано ниже. Малооблачная погода в большей степени наблюдается при отрицательных фазах индекса NAO и увеличении индекса SCAN, при усилении меридиональной составляющей циркуляции. Ярким примером стало лето 2010 г. В течение почти всего июля и до 18 августа над всей ЕТР установился обширный, малоподвижный, блокирующий антициклон, сохранялась аномально жаркая погода. Москву накрыла дымная мгла, что привело к экстремальному аэрозольному загрязнению атмосферы. Подобные ситуации в Москве наблюдались и ранее, в 1972 и 2002 гг. В период дымной мглы от лесных и торфяных пожаров в августе 2010 г. среднее месячное значение АОТ (0,90) было наибольшим месячным значением АОТ, а значение АОТ (3,29) 7 августа – наибольшим суточным значением за весь период наблюдений МО МГУ. Сезонный летний максимум отмечен в 2010 г. (см. табл. 2).

Аэрозольная составляющая прозрачности атмосферы для солнечных лучей играет важную роль в изменении радиационных потоков в безоблачной атмосфере. Межгодовые колебания АОТ вызваны прежде всего влиянием естественных факторов. Экстремальные годовые значения АОТ наблюдались в периоды извержений вулканов Эль-Чичон (1982) и Пинатубо (1991) – самых мощных взрывных извержений, оказавших глобальное влияние на загрязнение атмосферы в последующие два года (см. табл. 2, рис. 3Б). Годовой максимум АОТ (0,33) в 1983 г. соответствовал периоду наибольшего

Таблица 1

**Статистические характеристики сезонных и годовых значений
радиационных параметров атмосферы (1955–2020)**

Статистические характеристики	Радиационные параметры атмосферы									
	<i>N</i>	<i>n</i>	АОТ	ПСС	<i>t</i> _н	<i>A</i>	<i>Q</i>	<i>R</i>	<i>B</i>	<i>B</i> _д
	балл			час	°С	%	МДж/м²			
<i>Зима</i>										
Среднее	8,7	7,2	0,13	38	–7,7	59	75,1	46,1	–23,0	–51,9
Мин.	6,6	4,0	0,02	15	–14,0	39	50,7	25,7	–55,7	–89,7
Макс.	9,5	8,4	0,33	74	–2,7	76	102,3	68,3	–3,7	–28,3
<i>V</i> , %	7	13	61	29	33	11	14	19	46	25
Год, мин.	1969	1969	1989	1960	1969	2008	1990	2008	1969	1969
Год, макс.	2000	2000	1966	1969	2020	1959	1969	1969	2013	2013
<i>a</i> ·10	0,19	0,3	–0,03	–0,90	0,47	–1,70	–2,5	–2,77	4,4	4,2
<i>P</i>	0,99	0,99	0,99	0,80	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
<i>Весна</i>										
Среднее	7,7	5,1	0,21	196	6,3	29	420,6	108,4	159,1	–153,2
Мин.	6,7	3,7	0,08	148	–4,0	21	360,7	74,7	121,3	–182,0
Макс.	8,7	6,3	0,47	266	10,3	41	503,0	181,7	212,7	–113,3
<i>V</i> , %	6	11	38	12	36	18	7	18	12	10
Год, мин.	1972	2014	2018	1955	1954	1995	1974	2008	1994	1960
Год, макс.	1966	1980	1983	2002	1975	1963	1963	1963	2014	2012
<i>a</i> ·10	0,06	–0,03	–0,02	4,40	0,53	–0,18	0,87	–0,44	4,8	3,5
<i>P</i>	0,8	0,5	0,99	0,99	0,99	0,40	0,4	0,35	0,99	0,99
<i>Лето</i>										
Среднее	7,3	271	0,21	271	21,0	20	561,3	112,7	273,8	–174,8
Мин.	5,7	213	0,09	213	16,7	16	500,3	93,7	238,0	–233,0
Макс.	8,3	324	0,43	324	26,7	24	627,0	138,7	326,0	–137,0
<i>V</i> , %	8	11	32	11	9	8	6	9	7	12
Год, мин.	1972	1980	>3 лет	1980	1962	2002	1976	2003	1993	1992
Год, макс.	1987	2011	2010	2011	2010	1965	1972	2015	2011	2020
<i>a</i> ·10	0,14	–0,006	–0,02	2,40	0,39	–0,21	0,99	–0,93	4,6	2,7
<i>P</i>	0,99	0,10	0,99	0,80	0,99	0,95	0,4	0,8	0,99	0,95
<i>Осень</i>										
Среднее	8,6	6,9	0,14	87	5,2	26	164,0	36,4	36,6	–91,0
Мин.	7,3	5,0	0,02	51	1,0	17	114,3	23,3	18,7	–125,7
Макс.	9,4	8,4	0,34	131	8,3	38	213,3	48,0	57,3	–61,7
<i>V</i> , %	5	10	45	21	29	19	11	17	25	14
Год, мин.	1975	1967	2013	1960	1993	2008	2013	2013	1973	1967
Год, макс.	2013	1997	1984	2018	2020	1960	1967	1965	2009	2013
<i>a</i> ·10	0,07	–0,005	–0,01	0,50	0,3	–1,37	–1,47	–1,67	2,8	2,6
<i>P</i>	0,95	0,10	0,99	0,35	0,99	1	0,75	0,99	0,99	0,99
<i>Год</i>										
Среднее	8,1	6,0	0,18	1776	6,3	25	3663	911	1338	–1413
Мин.	8,3	6,0	0,12	1868	7,3	25	3683	893	1490	–1298
Макс.	7	4,8	0,08	1478	4	19	3346	682	1117	–1726
<i>V</i> , %	8,6	6,8	0,33	2169	8,6	32	4065	1239	1690	–1061
Год, мин.	1972	1967	2017, 2018	1980	>3 лет	2002	1990	2008	1980	1967
Год, макс.	>3 лет	>3 лет	1983	2014	2020	2013	1963	1963	2014	2013
<i>a</i> ·10	4	8	33	9	19	10	5	11	11	10
<i>P</i>	0,1	0,06	–0,02	20	0,38	–0,3	–6	–17	50	40

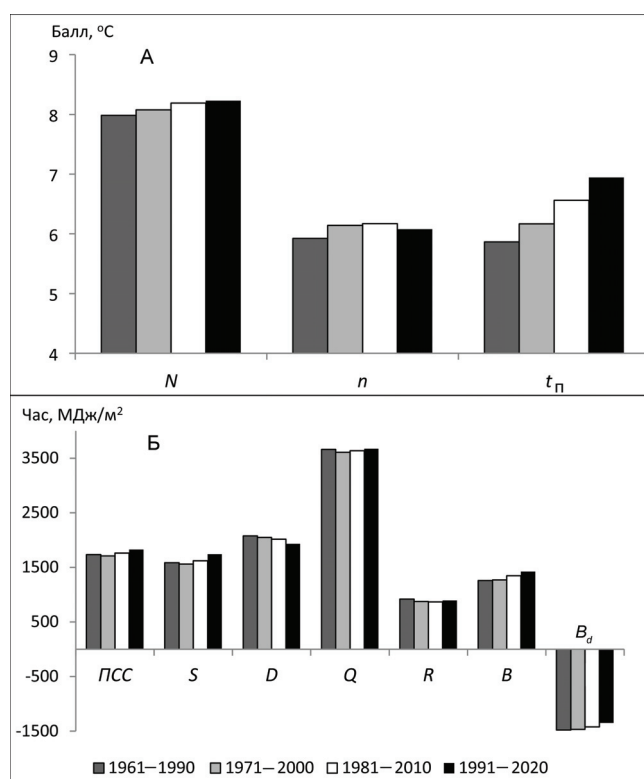


Рис. 1. Изменение климатических норм средних годовых значений: А – балл общей (N), нижней (n) облачности, температуры поверхности почвы (t_n , °C); Б – продолжительность солнечного сияния (ПСС, час), прямой на горизонтальную поверхность (S , МДж/м²), рассеянной (D , МДж/м²), суммарной (Q , МДж/м²), отраженной (R , МДж/м²) солнечной радиации, радиационного баланса (B , МДж/м²), длинноволнового баланса (B_d , МДж/м²)

Fig. 1. Change in climatic norms of average annual values: А – total cloudiness (N , cloud amount), low (n , cloud amount) cloudiness, soil surface temperature (t_n , °C); Б – sunshine duration (SSD, hour), direct on a horizontal surface (S , MJ/m²), diffuse (D , MJ/m²), total (Q , MJ/m²), reflected (R , MJ/m²) solar radiation, radiation balance (B , MJ/m²), longwave balance (B_d , MJ/m²)

влияния стратосферного аэрозоля вулканического происхождения, достигшего Московского региона [Горбаренко, 2019]. Наибольший рост АОТ, вызванный метеорологическими условиями, наблюдается при длительном их влиянии. В зимний период увеличение АОТ обусловлено ростом повторяемости приземных инверсий, при их существовании в течение нескольких дней АОТ повышается в 3–5 раз от среднего уровня. Минимальные годовые (0,08) и сезонные (0,02; 0,08) значения АОТ связаны с преобладанием чистых арктических воздушных масс и с благоприятными условиями, способствующими быстрому вымыванию аэрозоля из атмосферы. Городская среда оказывает влияние на аэрозольное загрязнение, однако, выделить антропогенную составляющую АОТ непросто из-за большой естественной ее изменчивости. Антропогенное влияние на аэрозольное загрязнение города возможно оценить в сравнении АОТ города и пригорода. В период с 1955 по 1985 г. разница в аэрозольном загрязнении города с пригородом, как в Москве и Подмоскowie, так и в других городах, достигала 30%, в последую-

щие годы разница сократилась до нескольких процентов. С середины 1980-х гг. в результате резкого сокращения промышленного производства в Москве и в России антропогенное загрязнение уменьшилось [Битюкова и др., 2017]. Начиная с 1994 г., после полного очищения атмосферы от вулканического аэрозоля средние месячные, сезонные и годовые значения АОТ значительно снижаются во все сезоны, особенно в последние годы (см. табл. 1; рис. 2Б, 3Б). Средние годовые значения АОТ в XXI в. на 40–60% ниже нормы 1961–1990 гг., значения АОТ в 2017 и 2018 гг. (0,08) стали абсолютными годовыми минимумами за весь период наблюдений. Аналогично с многолетними изменениями АОТ по данным МО МГУ меняется общая минерализация осадков [Еремина и др., 2014]. По данным ГПБУ «Мосэкомониторинг» наблюдается отрицательная динамика основных веществ, загрязняющих воздушную среду Москвы (<http://www.mosecom.ru>). Уменьшение антропогенной составляющей аэрозольной мутности явилось отражением действий правительства Москвы по улучшению экологии

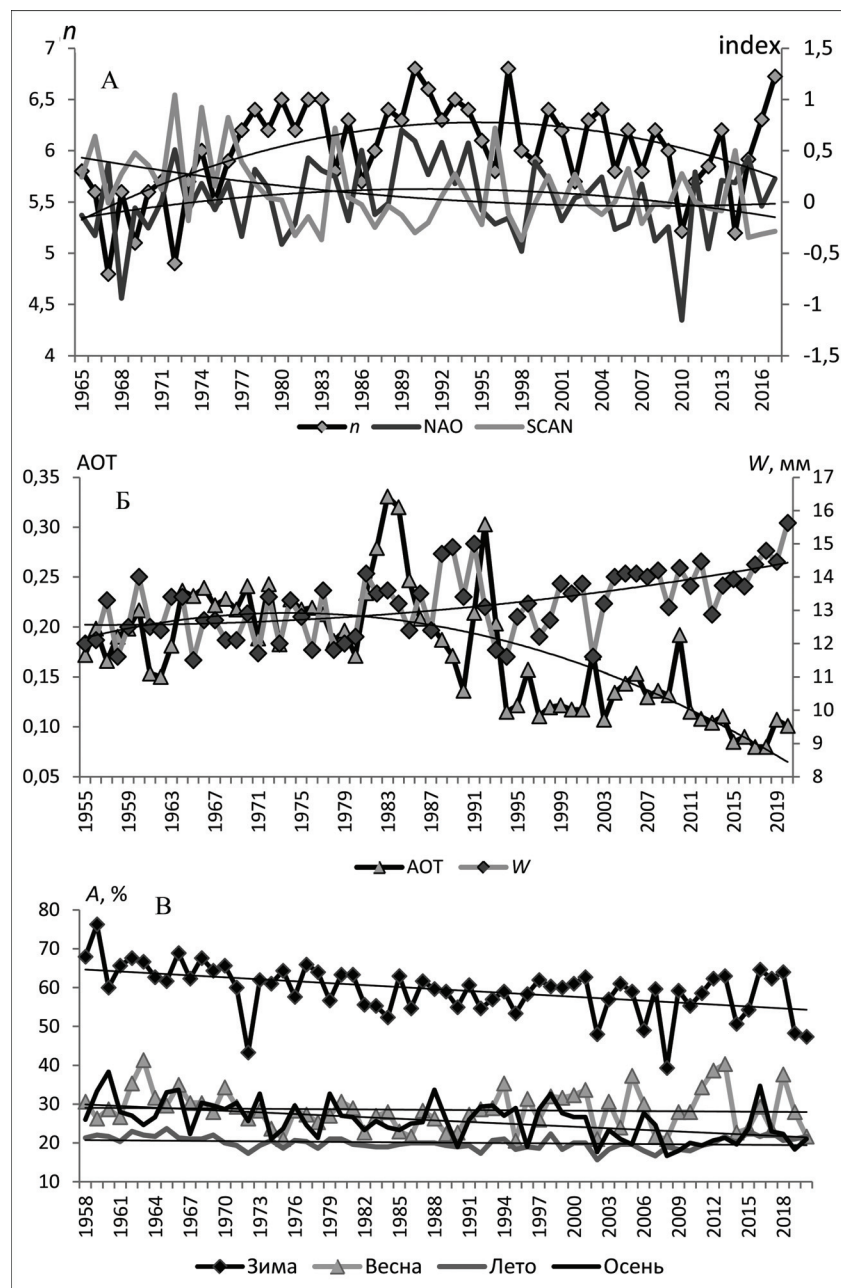


Рис. 2. Многолетние изменения метеорологических характеристик: А – средние годовые значения балла нижней облачности и индексов атмосферной циркуляции атмосферы; Б – средние годовые значения аэрозольной оптической толщины атмосферы (АОТ) и общего влагосодержания атмосферы (W , мм); В – сезонные значения альbedo (A , %) подстилающей поверхности. Тонкие черные кривые – линии тренда

Fig. 2. Long-term changes of meteorological parameters: A – average annual values of the lower cloud cover and atmospheric circulation indices; Б – average annual values of the aerosol optical thickness of the atmosphere (AOT) and the total moisture content of the atmosphere (W , mm); В – seasonal values of albedo (A , %) of the underlying surface. Thin black curves are trend lines

города [Доклад..., 2020]. Снижение АОТ зафиксировано на большинстве станций сети АЭРОНЕТ и на всех станциях АЭРОНЕТ, расположенных в Европе [Li et al., 2014]. При отсутствии вулканического аэрозоля единообразие в тенденциях изменения АОТ в Европе свидетельствует о существенной роли глобальных процессов, связанных с изменениями общей циркуляции атмосферы Северного

полушария. Влажная составляющая интегральной прозрачности атмосферы увеличивается, так как с ростом температуры воздуха растет содержание водяного пара в атмосфере. Влагосодержание атмосферы (W) в Москве значительно увеличивается со скоростью 0,3 мм в 10 лет (см. рис. 2Б), подобная тенденция отмечена и в других климатических регионах [Obregón et al., 2021].

Таблица 2

**Сравнение норм радиационных параметров и отклонение их средних значений за 2000–2020 гг.
от норм 1961–1990 и 1991–2020 гг., %**

	Радиационные параметры атмосферы										
	N	n	AOT	ПСС	t_{Π}	S	D	Q	R	B	B_d
<i>Зима</i>											
d	6	14	–57	–13	24	–14	–11	–12	–17	48	26
d_1	7	14	–64	–12	27	–10	–13	–12	–18	61	32
d_2	1	0	–18	1	4	4	–2	–1	–2	24	9
<i>Весна</i>											
d	2	–2	–39	9	11	13	–6	2	5	9	6
d_1	2	–5	–47	13	15	18	–9	3	6	15	9
d_2	0	–3	–13	3	4	4	–2	1	1	5	4
<i>Лето</i>											
d	4	–3	–31	6	7	10	–7	1	–2	7	5
d_1	5	–4	–34	8	8	12	–8	2	–1	9	7
d_2	2	–2	–5	2	1	2	–1	0	1	2	3
<i>Осень</i>											
d	1	–1	–33	4	17	4	–6	–2	–10	29	10
d_1	2	–2	–40	6	28	6	–7	–3	–14	43	14
d_2	1	–1	–9	2	9	1	–2	–1	–5	11	4
<i>Год</i>											
d	3	3	–38	6	18	10	–7	0	–3	13	9
d_1	4	1	–44	8	24	13	–9	1	–3	19	12
d_2	1	–1	–10	2	4	3	–2	0	0	5	4

Наиболее значимые сезонные различия отмечаются в состоянии подстилающей поверхности. Отражательные свойства подстилающей поверхности характеризует альbedo. На площадке МО МГУ самые высокие значения ($A > 75\%$) отмечаются для свежеснежного покрова, самые низкие (10–11%) – для поверхности, покрытой прошлогодней травой. Загрязнение снега приводит к уменьшению его альbedo более чем на 20%. Увлажнение всех видов поверхностей уменьшает их альbedo на 1–2% [Абакумова и др., 2012]. Снижение альbedo зимой связано с повышением температуры воздуха в зимние месяцы, увеличением повторяемости оттепелей, что приводит к изменению структуры снега. В последние десятилетия в холодный период альbedo все чаще не соответствует альbedo снега. Так, в декабре 2019 г. не отмечено ни одного дня со снежным покровом. Декабрьское значение альbedo 18% характеризует отражательные свойства зеленой травы. Это значение A и месячная сумма отраженной радиации в 2019 г. (4 МДж/м²) стали минимальными значениями за весь период наблюдений. В период установления и схода снежного покрова отмечается

наибольшая изменчивость значений A , коэффициент вариации (V) весной составил 18%, осенью – 19% (см. рис. 2В; табл. 2). В последние годы дата окончательного схода снежного покрова смещается на все более ранние сроки, а установление – на все более поздние, что приводит к уменьшению периода со снежным покровом. Наибольшее число дней со снежным покровом (170) наблюдалось в 1976 г., наименьшее (92) – в 2020-м. Бесснежный октябрь и ноябрь стали для Москвы нормой. Значения альbedo согласуются с изменением температуры поверхности почвы, для которой отмечается значимый рост (с уровнем значимости 0,99) на протяжении всего периода наблюдений во все сезоны года. Скорость роста средних годовых значений температуры почвы в целом за весь период наблюдений – 0,4, в XXI в. – 0,6°C в 10 лет. Наибольший рост произошел в зимний ($d=24\%$, $d_1=27\%$, $d_2=4\%$) и осенний ($d=17\%$; $d_1=28\%$, $d_2=9\%$) периоды (см. табл. 1, 2; рис. 1А, 3Ж). Зима, осень и в целом 2020 г. стали рекордными по температуре почвы и воздуха в Москве и в среднем по всему земному шару. Интересной особенностью весны 2013, 2016, 2018, 2019 гг.

стал сход снежного покрова в марте и установление снежного покрова в первой декаде апреля. С этим явлением связано повышение значений альбедо в период климатической нормы 1991–2020 гг. относительно предыдущей с 24 до 25%.

Многолетняя изменчивость радиационных потоков. Изменения облачного покрова, а следовательно, и продолжительности солнечного сияния

приводит к существенным изменениям радиационных потоков [Фейгельсон, Краснокутская, 1978; Li et al., 2020; Orsini et al., 2002; Wan et al., 2021]. Коэффициенты корреляции между потоками Q , B_d и баллом общей облачности значимы и имеют обратный годовой ход (см. рис. 4Б). Увеличение облачности в летние месяцы приводит к уменьшению суммарной радиации и месячных сумм радиационного

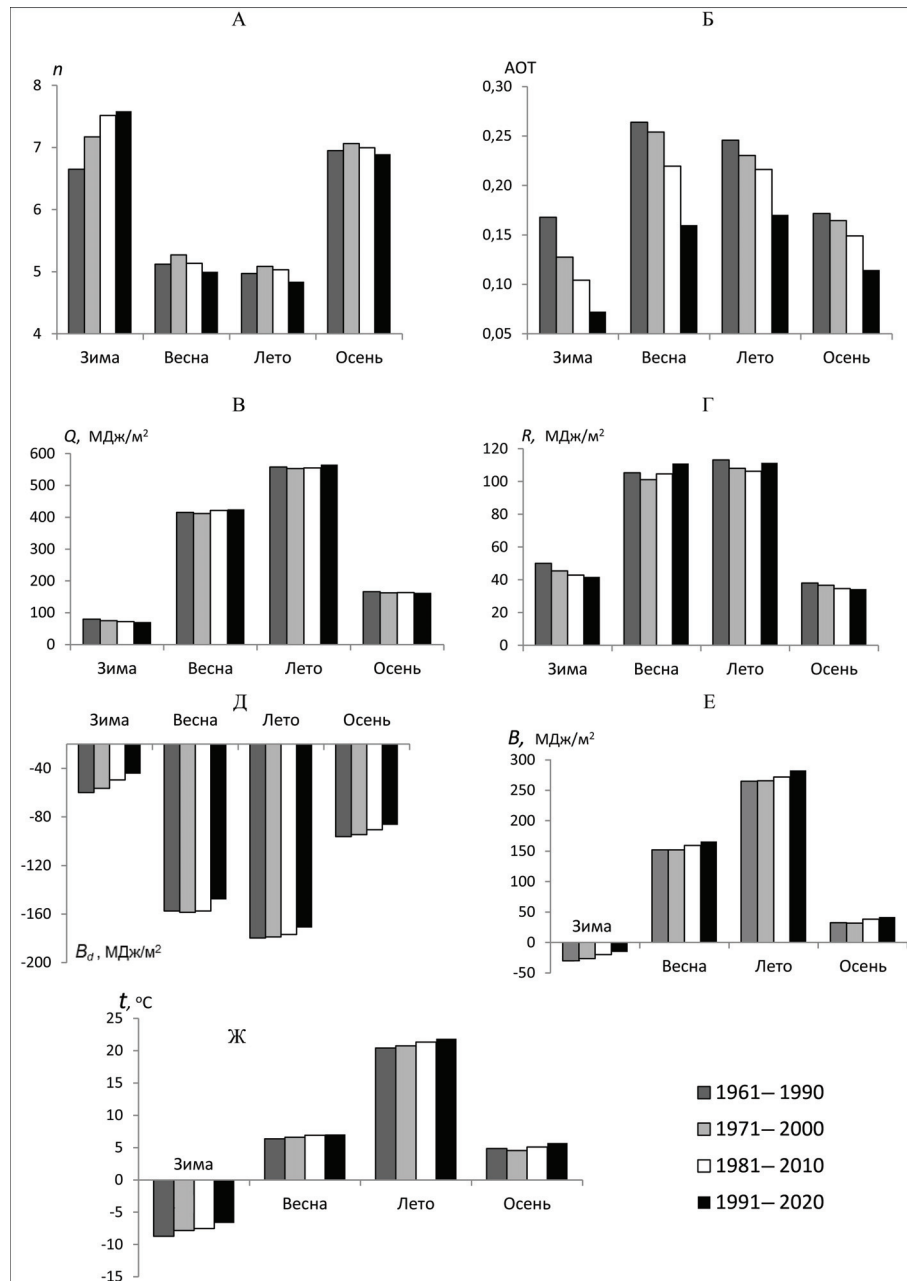


Рис. 3. Изменение сезонных климатических норм: А – балл нижней облачности (n); Б – аэрозольная оптическая толщина атмосферы (AOT); В – суммарная солнечная радиация (Q); Г – отраженная солнечная радиация (R , МДж/м²); Д – длинноволновый баланс (B_d , МДж/м²); Е – радиационный баланс (B , МДж/м²); Ж – температура поверхности почвы (t_s , °C)

Fig. 3. Changes in seasonal climatic norms: А – lower cloudiness score (n); Б – aerosol optical thickness of the atmosphere (AOT); В – total solar radiation (Q , MJ/m²); Г – reflected solar radiation (R , MJ/m²); Д – longwave balance (B_d , MJ/m²); Е – radiation balance (B , MJ/m²); Ж – soil surface temperature (t_s , °C)

Таблица 3

Годовой ход коэффициентов корреляции между баллом нижней облачности и индексами атмосферной циркуляции

Индекс	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
NAO	0,40	0,40	0,28	0,06	-0,16	-0,08	0,04	-0,17	-0,16	-0,08	-0,02	0,31
EA	0,27	0,28	0,05	-0,16	-0,28	0,05	-0,21	-0,14	0,05	-0,07	0,41	0,13
WP	0,18	0,24	-0,22	0,09	0,39	0,33	0,34	0,14	0,26	0,06	-0,06	0,01
PNA	0,21	0,24	-0,07	0,15	-0,10	-0,03	-0,12	-0,33	-0,19	-0,38	0,00	0,10
SCAN	-0,45	-0,44	-0,18	-0,10	-0,33	-0,26	-0,15	-0,29	-0,43	-0,07	-0,24	-0,08
POL	0,19	-0,10	-0,16	-0,12	-0,28	-0,28	-0,37	-0,35	-0,48	-0,10	0,02	-0,06

Примечание. Полужирным указаны значимые коэффициенты корреляции.

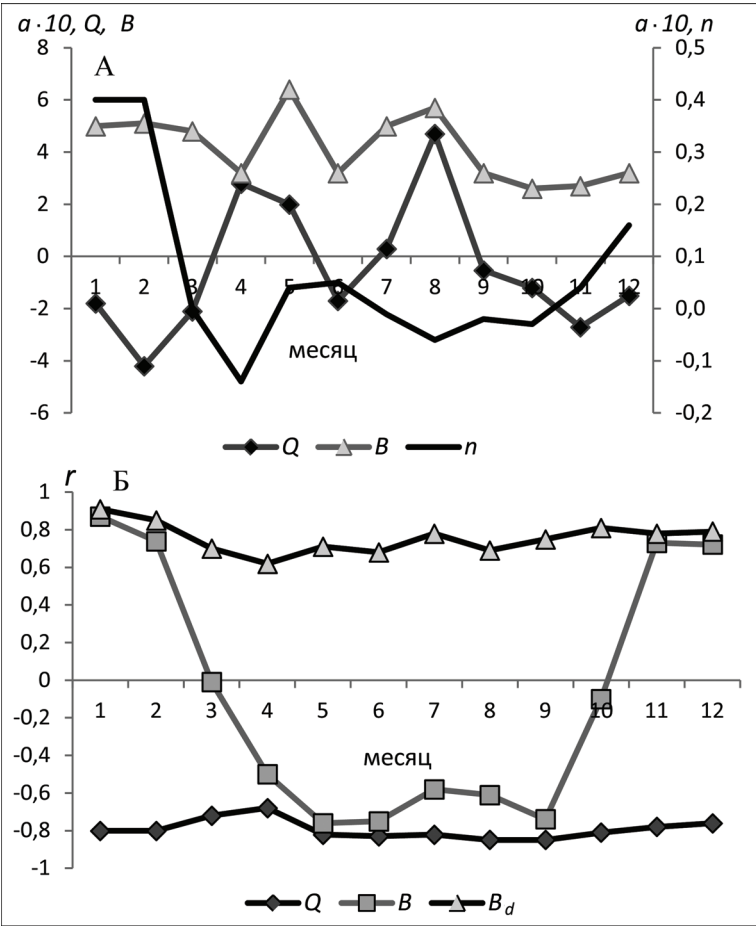


Рис. 4. Годовой ход радиационных характеристик: А – трендов ($a \cdot 10$) суммарной радиации, радиационного баланса и балла нижней облачности; Б – коэффициента корреляции (r) между баллом общей облачности и потоками (суммарная радиация (Q , МДж/м²), длинноволновый баланс (B_d , МДж/м²), радиационный баланс (B , МДж/м²))

Fig. 4. Annual variation of radiation parameters: А – characteristics of trends ($a \cdot 10$) of total radiation, radiation balance and low cloudiness; Б – correlation coefficient (r) between the total cloud cover and the streams (total radiation (Q , MJ/m²), longwave balance (B_d , MJ/m²), radiation balance (B , MJ/m²))

баланса, в зимние, за счет значительного парникового эффекта облачности, – к росту его длинноволновых составляющих. Во временной изменчивости годовых сумм суммарной радиации с 1955 г. прослеживается тенденция к понижению ее значений, ко-

торая в конце 1980-х гг. сменилась ростом. Периоды изменения Q , связанные с изменениями облачности и прозрачности атмосферы, описаны в научной литературе как global dimming и brightening. Наблюдения мировой сети показывают, что потепление,

вызванное парниковым эффектом, в XX в. сильно модулировалось изменениями солнечной радиации. Снижение поступления Q в период global dimming, вероятно, было одной из причин ослабления глобального потепления, тогда как brightening могло способствовать быстрому потеплению в конце XX и начале XXI в., а возможно, и в первой половине XX в. [Wild, 2009]. При рассмотрении годового хода показателя тренда, приведенного на рис. 2А, очевидна зависимость между тенденциями в изменениях Q и баллом нижней облачности. За весь период наблюдения в годовых значениях, зимой и осенью наблюдается тенденция к понижению Q , весной и летом – к повышению (см. табл. 1, 2; рис. 3В). Однако статистически значим только отрицательный линейный тренд в зимний период. Климатическая норма суммарной радиации за период 1991–2020 гг. наибольшая из рассматриваемых, тем не менее в период с 2000 по 2020 г. отмечен незначимый тренд уменьшения Q (см. рис. 1Б). В 2008 и 2017 гг. годовые значения Q приблизились к минимуму, от-

меченному в 1990 г., и стали соответственно третьим и вторым значениями с конца ранжированного ряда Q . Снижение повторяемости пасмурного неба, уменьшение в некоторые месяцы балла нижней облачности и рост прозрачности атмосферы для солнечных лучей привели к значимым тенденциям увеличения прямой и уменьшению рассеянной солнечной радиации (рис. 5А; см. табл. 2). Для XXI в., в отличие от XX в., стало характерным увеличение доли прямой радиации в суммарном потоке. Статистически значимая тенденция к уменьшению годовых, зимних и весенних значений сумм отраженной солнечной радиации при рассмотрении всего периода наблюдений обусловлена уменьшением альbedo поверхности. За счет роста отраженной радиации в снежные апрельские дни в последние годы, о чем сказано выше, наблюдалось повышение значений весенней нормы R 1991–2020 гг. относительно нормы 1961–1990 гг. на 5%, отмечена незначимая тенденция роста годовых значений отраженной радиации в 2000–2020 гг. (см. табл. 1; рис. 1Б, 3Г).

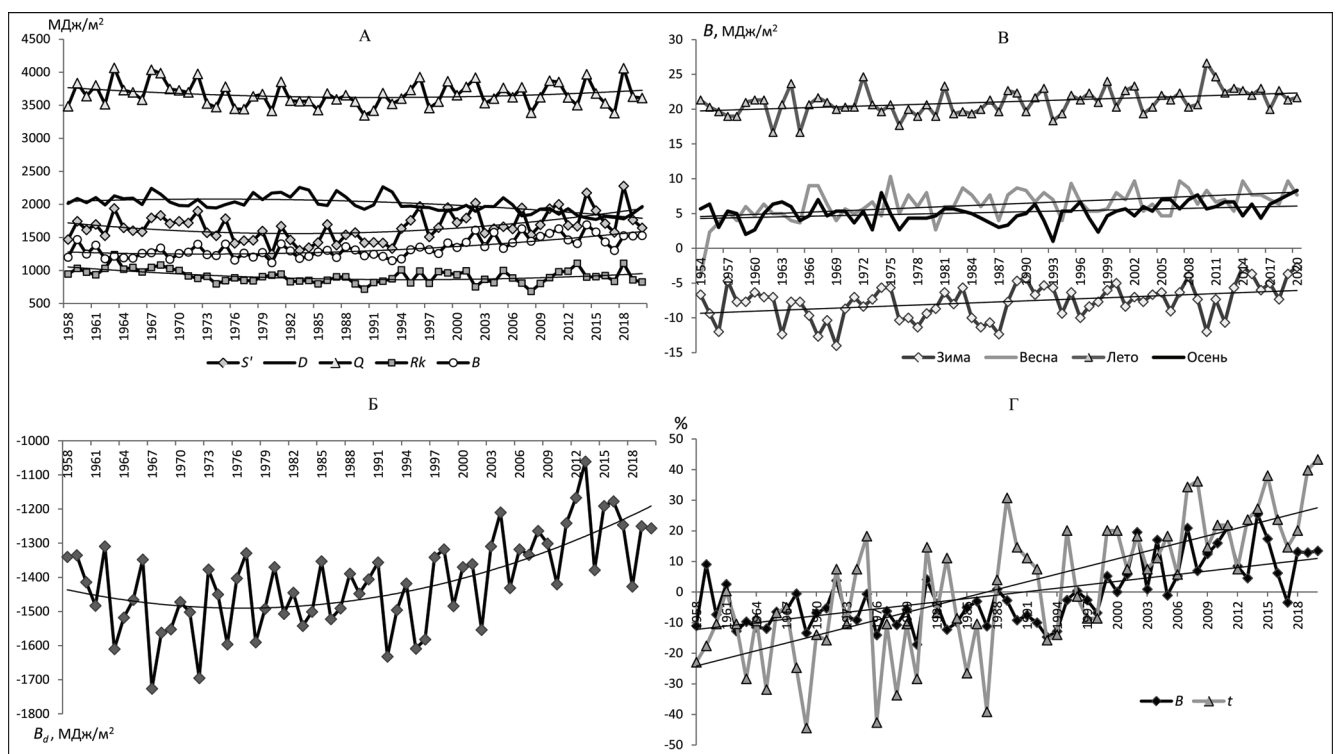


Рис. 5. Многолетние изменения радиационных характеристик: А – средние годовые значения потоков солнечной радиации; Б – средние годовые значения длинноволнового баланса; В – сезонные значения радиационного баланса; Г – аномалии радиационного баланса и температуры воздуха. Тонкие черные линии – линии тренда

Fig. 5. Long-term changes of radiation parameters: А – average annual values of solar radiation fluxes; Б – average annual values of the long-wave balance; В – seasonal values of the radiation balance; Г – anomalies of the radiation balance and air temperature. Thin black lines are the trends

Нисходящий и восходящий длинноволновые потоки одинаково зависят от температуры, облачности и влажности воздуха, но имеют противоположные направления, величина длинноволнового баланса меняется в соответствии с соотношением их величин. Скорость роста длинноволнового баланса в XXI в. увеличилась практически в два раза: за весь период наблюдений средняя скорость изменения составила $40 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot 10 \text{ лет})$, в период с 2000 по 2020 г. – $76 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot 10 \text{ лет})$. Причиной стабильного значимого увеличения длинноволнового баланса во все сезоны года (средняя скорость изменения для зимы, весны, лета и осени составила 4,2; 3,5; 2,7; $2,6 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot 10 \text{ лет})$ соответственно) (см. табл. 1, 2; рис. 1Б, 3Д, 5Б) является повышение противоизлучения атмосферы [Gorbarenko, 2020]. Именно за счет повышения противоизлучения атмосферы, по мнению многих ученых, связанного с повышением содержания «парниковых газов» в атмосфере, происходят основные изменения климата [IPCC..., 2013]. Оценка влияния углекислого газа на противоизлучение атмосферы по результатам модельных расчетов показала, что увеличение E_a при изменении количества CO_2 в атмосфере на 50 млн^{-1} (с 330 до 380 млн^{-1}) составило 0,3 и $0,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ для лета и зимы соответственно [Gorbarenko, 2013]. Город с его асфальтированными улицами, плотной многоэтажной застройкой, системой отопления, развитой транспортной структурой становится самостоятельным источником длинноволновой радиации, что является дополнительным источником тепла и определяет повышение температуры в центре города относительно окраин. Такое явление получило название «остров тепла» [Климат Москвы..., 2017; Кислов и др., 2017].

Радиационный баланс подстилающей поверхности – результирующая величина приходящей и уходящей радиации – является основной составляющей теплового баланса. С уменьшением периода залегания снежного покрова значимо уменьшается число дней с отрицательными суточными суммами радиационного баланса. В XXI в. число таких дней уменьшилось практически в два раза. Максимальные изменения B произошли в зимний период – разница между нормами и периодом 2000–2020 гг. составила $d = 48\%$, $d_1 = 61\%$, $d_2 = 24\%$ (см. табл. 1, 2; рис. 1Б, 3Е). Годовые и сезонные значения радиационного баланса подвержены наибольшим из всех радиационных параметров изменениям в период наблюдений МО МГУ. Значимый тренд повышения значений B наблюдается во все месяцы, во все сезоны года и в целом за год, резкий рост значений годовых сумм B наблюдается с 1994 г. (см. рис. 4А, 5В). В 2000–2020 гг. за счет увеличения отраженной радиации отмечается некоторое замедление роста его значений. Так, при рассмотрении всего периода наблюдений скорость роста сред-

них годовых значений составила $50 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot 10 \text{ лет})$, а за 2000–2020 гг. уменьшилась до $33 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot 10 \text{ лет})$ (см. табл. 1). Максимальные значения годовых и сезонных значений радиационного и длинноволнового баланса наблюдались во втором десятилетии XXI в. (см. табл. 1). Абсолютный максимум годового значения радиационного баланса $1690 \text{ МДж}/\text{м}^2$, отмеченный в 2014 г., на 26% больше нормы 1961–1990 гг. и на 19% больше нормы 1991–2020 гг. Ученые НАСА и Национального управления океанических и атмосферных исследований по данным спутниковых наблюдений и наблюдений в точке показали значительное увеличение значений баланса океана с середины 2005 до середины 2019 г. [Norman et al., 2021]. С конца 1990-х гг. наблюдается практически синхронное межгодовое колебание аномалий значений радиационного баланса и температуры воздуха, при этом с 2000 г. наблюдаются только положительные значения аномалий этих величин (см. рис. 5Г). Подобная временная изменчивость характерна для интенсивности «острова тепла» в Москве [Кислов и др., 2017]. «Остров тепла» является проявлением антропогенного влияния города на радиационный режим.

ВЫВОДЫ

Оценка относительной величины тренда для средних годовых значений за 65-летний период наблюдений МО МГУ показала: увеличение на 8 и 7% общей и нижней облачности; уменьшение на 50% аэрозольной оптической толщины атмосферы; увеличение на 15% влагосодержания атмосферы; уменьшение на 1% суммарной и на 11% отраженной солнечной радиации; рост продолжительности солнечного сияния на 7%. Сократился период со снежным покровом, бесснежные октябрь, ноябрь стали для Москвы нормой. Значительный рост на 26 и 16% наблюдается в тенденциях изменения радиационного и длинноволнового баланса, на 49% температуры поверхности почвы. В XXI в. усилились тенденции уменьшения аэрозольной мутности атмосферы, практически вдвое увеличилась скорость повышения длинноволнового баланса, температуры поверхности почвы.

Тренды в зимний период для всех радиационных параметров имеют значения, превышающие тренды среднегодовых значений и величин в другие сезоны. На 28% произошло уменьшение главной расходной части радиационного баланса – отраженной радиации. Основная причина – сокращение на 17% числа дней со снежным покровом и уменьшение альбедо. В зимний период радиационный баланс увеличился на 73%, его длинноволновая часть – на 41%, что привело к росту температуры поверхности почвы на 34%.

Совокупность оценок причин тенденций в изменчивости факторов, оказывающих основное влия-

яние на формирование радиационного режима, а также проявление подобных тенденций на территории Европы позволяют предположить глобальный характер процессов, определяющих эти изменения. Основным из них является изменение общей циркуляции атмосферы в Северном полушарии. В отсутствии значительных вулканических извержений радиационный эффект облаков существенно выше радиационного эффекта аэрозоля.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность всему инженерно-техническому персоналу метеорологической обсерватории МГУ, осуществляющему мониторинг радиационных параметров атмосферы.

Работа частично выполнялась за счет мегагранта Минобрнауки 075-15-2021-574 и выполнена в рамках научной темы госзадания «Погодные и климатические процессы различных пространственно-временных масштабов в условиях антропогенного воздействия», номер ЦИТИС: 121051400081-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В., Незваль Е.И., Шиловцева О.А. Климатические ресурсы солнечной радиации Московского региона. М.: ЛИБРОКОМ, 2012. 312 с.
- Битюкова В.Р., Саульская Т.Д. Изменение антропогенного воздействия производственных зон Москвы за последние десятилетия // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 3. С. 24–33.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации // М.: Росгидромет, 2014. 58 с.
- Горбаренко Е.В. Локальные и глобальные факторы, определившие многолетние изменения аэрозольной оптической толщины атмосферы в Москве в 1955–2018 годах // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. № 595. С. 169–190.
- Еремич И.Д., Чубарова Н.Е., Алексеева Л.И., Суркова Г.В. Кислотность и химический состав осадков на территории Московского региона в теплый период года // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2014. № 5. С. 3–11.
- Кислов А.В., Варенцов М.И., Горлач И.А., Алексеева Л.И. «Остров тепла» московской агломерации и урбанистическое усиление глобального потепления // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 4. С. 12–19.
- Климат Москвы в условиях глобального потепления / под ред. А.В. Кислова, М.: Изд-во Моск. ун-та, 2017. 288 с.
- Кононова Н.В. Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2003. Т. 1. С. 133–162.
- Попова В.В., Мацковский В.В., Михайлов А.Ю. Современные изменения климата суши внетропической зоны Северного полушария // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 1. С. 3–12.
- Фейгельсон Е.М., Краснокутская Л.Д. Потоки солнечного излучения и облака. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 158 с.
- Шиловцева О.А. История метеорологических наблюдений в Московском университете – эколого-климатические характеристики атмосферы в 2014 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ / под ред. О.А. Шиловцевой. М.: МАКС Пресс, 2015. 236 с.
- Chernokulsky A., Esau I., Bulygina O., Davy R., Mokhov I., Outten S., Semenov V. Climatology and interannual variability of cloudiness in the Atlantic Arctic from surface observations since the late 19th century, *J. Climate*, 2016, DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0329.1.
- Foster M.J., Di Girolamo L., Frey R.A., Heidinger A.K., Phillips C., Menzel W., Zhao G. Global Cloudiness, State of the Climate in 2019, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2020, vol. 101(8), p. S51–53, DOI: 10.1175/2020BAMS.
- Gorbarenko E.V. Long-term variations of long-wave radiation in Moscow Russian, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013, vol. 38, p. 669–676.
- Gorbarenko E.V. Radiation climate of Moscow, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, vol. 45, p. 478–487.
- Gorbarenko E.V. Climate changes in atmospheric radiation parameters from the MSU meteorological observatory data, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, vol. 41, no. 11/12, p. 789–797.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2013, 1535 p.
- Li J., Carlson B.E., Dubik O., Lacis A.A. Recent trends in aerosol optical properties derived from AERONET measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, vol. 14, p. 1227112289.
- Li J., You Q., He B. Distinctive spring shortwave cloud radiative effect and its inter-annual variation over southeastern China, *Atmospheric Science Letters*, 2020, vol. 21(6), e970, DOI: 10.1002/asl.970.
- Loeb N.G., Johnson G.C., Thorsen T.J., Lyman J.M., Rose F.G., Kato S. Satellite and Ocean Data Reveal Marked Increase in Earth's Heating Rate, *Geophysical Research Letters*, 2021, vol. 48, iss. 13, e2021GL093047, DOI: 10.1029/2021GL093047.
- Obregón M., Serrano A., Costa M.J., Silva A.M. Global Spatial and Temporal Variation of the Combined Effect of Aerosol and Water Vapour on Solar Radiation, *Remote Sensing*, 2021, vol. 13(4), p. 708, DOI: 10.3390/rs13040708.

- Ohmura A. Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes, *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, D00D05, DOI: 10.1029/2008JD011290.
- Orsini A., Tomasi C., Calzolari F., Nardino M., Cacciari A., Georgiadis T. Cloud cover classification through simultaneous ground-based measurements of solar and infrared radiation, *Atmospheric Research*, 2002, vol. 61(4), p. 251–275, DOI: 10.1016/S0169-8095(02)00003-0.
- Schmithüsen H., Koppe R., Sieger R., König-Langlo G. *BSRN Toolbox V2.5 – a tool to create quality checked output files from BSRN datasets and station-to-archive files*, 2019, Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Bremerhaven, PANGAEA, DOI: 10.1594/PANGAEA.901332.
- Wan X., Qin F., Cui F., Chen W., Ding H., Li C. Correlation between the distribution of solar energy resources and the cloud cover in Xinjiang, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 675(1), p. 012060, DOI: 10.1088/1755-1315/675/1/012060.
- Wild M. How well do IPCC-AR4/CMIP3 climate models simulate global dimming/brightening and twentieth century daytime and nighttime warming? *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, D00D11, DOI: 10.1029/2008JD011372.

Электронный ресурс

Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2019 году» / под ред. А.О. Кульбачевского. Москва. 2020. 222 с. URL: http://www.ecology.moscow/eco/ru/report_result (дата обращения 15.05.2020).

Поступила в редакцию 07.08.2021

После доработки 09.01.2022

Принята к публикации 13.05.2022

EXTREMES AND GENERAL TRENDS IN LONG-TERM VARIABILITY OF ATMOSPHERIC RADIATION PARAMETERS IN MOSCOW

E.V. Gorbarenko

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: catgor@mail.ru

The work continues the study of the causes of climatic changes in the Moscow region basing on the observations of the MSU Meteorological Observatory. Long-term dynamics of the main climate-forming factor, i. e. the radiation regime of the atmosphere, was analyzed. During the 65 year observation period in Moscow, significant trends were noted for all radiation parameters of the atmosphere, most pronounced in winter. The average annual values of radiation, long-wavelength balances and soil surface temperature increase by 26, 16 and 49% respectively, and their winter values by 73, 41 and 34%. In the 21st century, the decrease in aerosol turbidity of the atmosphere, the increase in direct and the decrease in scattered radiation have intensified. The rate of increase in the long-wave and radiation balance, as well as in the soil surface temperature, has almost doubled. In the absence of significant volcanic eruptions, the “greenhouse effect” of cloud cover has become a principal natural factor. The anthropogenic component of aerosol turbidity has significantly decreased in recent years, which is associated with a number of measures taken by the Moscow government to improve the state of the environment in the city. The anthropogenic influence on the radiation regime in the city manifested itself in higher long-wave fluxes, which led to increased intensity of the “heat island” in the 21st century.

Keywords: monitoring, radiation fluxes, cloudiness, aerosol, albedo, climate change

Acknowledgements. The author is deeply grateful to all engineers and technicians of the MSU Meteorological Observatory who monitored the radiation parameters of the atmosphere. The study was partly financed by the Ministry of Science and Higher Education (megagrant 075-15-2021-574) and carried out under the research theme of the state task “Weather and climatic processes of different spatio-temporal dimensions under anthropogenic pressure” (CITIS no. 121051400081-7).

REFERENCES

- Abakumova G.M., Gorbarenko E.V., Nezval' E.I., Shilovceva O.A. *Klimaticheskie resursy solnechnoj radiatsii Moskovskogo regiona* [Climatic resources of solar radiation of the Moscow region], Moscow, LIBROKOM Publ., 2012, 312 p. (In Russian)
- Bitukova V.R., Saul'skaya T.D. *Izmenenie antropogennogo vozdeistviya proizvodstvennykh zon Moskvy za poslednie desyatiletiya* [Changes of the anthropogenic impact of Moscow industrial zones during the recent decades], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2017, no. 3, p. 24–33. (In Russian)
- Chernokulsky A., Esau I., Bulygina O., Davy R., Mokhov I., Outten S., Semenov V. Climatology and interannual variability of cloudiness in the Atlantic Arctic from surface observations since the late 19th century, *J. Climate*, 2016, DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0329.1.
- Eremina I.D., Chubarova N.E., Alekseeva L.I., Surkova G.V. *Kislotsnost' i khimicheskii sostav osadkov na territorii*

- Moskovskogo regiona v teplyi period goda [Acidity and chemical composition of summer precipitation within the Moscow region], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2014, no. 5, p. 3–11. (In Russian)
- Feigel'son E.M., Krasnokutskaya L.D. *Potoki solnechnogo izlucheniya i oblaka* [Streams of solar radiation and clouds], Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., 1978, 158 p. (In Russian)
- Foster M.J., Di Girolamo L., Frey R.A., Heidinger A.K., Phillips C., Menzel W., Zhao G. Global Cloudiness, State of the Climate in 2019, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2020, vol. 101(8), p. S51–S53, DOI: 10.1175/2020BAMS.
- Gorbarenko E.V. Lokal'nye i global'nye faktory, opredelivshie mnogoletnie izmeneniya aerol'noi opticheskoi tolshchiny atmosfery v Moskve v 1955–2018 godakh [Local and global factors that determined long-term changes in the aerosol optical thickness of the atmosphere in Moscow in 1955–2018], *Proceedings of the A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory*, 2019, no. 595, p. 169–190. (In Russian)
- Gorbarenko E.V. Long-term variations of long-wave radiation in Moscow Russian, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013, vol. 38, p. 669–676.
- Gorbarenko E.V. Radiation climate of Moscow, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, vol. 45, p. 478–487.
- Gorbarenko E.V. Climate changes in atmospheric radiation parameters from the MSU meteorological observatory data, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, vol. 41, no. 11/12, p. 789–797.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2013, 1535 p.
- Kislov A.V., Varentsov M.I., Gorlach I.A., Alekseeva L.I. “Ostrov Tepla” Moskovskoi aglomeratsii i urbanisticheskoe usilenie global'nogo potepeniya [“Heat island” of the Moscow agglomeration and the urban-induced amplification of global warming], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2017, no. 4, p. 12–19. (In Russian)
- Klimat Moskvy v usloviyakh global'nogo potepeniya* [Climate of Moscow in conditions of global warming], A.V. Kislov (ed.), Moscow, MSU Publ., 2017, 288 p. (In Russian)
- Kononova N.V. Izmeneniya tsirkulyatsii atmosfery severnogo polushariya v XX–XXI stoletiyakh i ikh posledstviya dlya klimata [Changes in the circulation of the atmosphere of the northern hemisphere in the XX–XXI centuries and their consequences for the climate], *Fundamental and Applied Climatology*, 2003, vol. 1, p. 133–162. (In Russian)
- Li J., Carlson B.E., Dubik O., Laci A.A. Recent trends in aerosol optical properties derived from AERONET measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, vol. 14, p. 12271–12289.
- Li J., You Q., He B. Distinctive spring shortwave cloud radiative effect and its inter-annual variation over southeastern China, *Atmospheric Science Letters*, 2020, vol. 21(6), e970, DOI: 10.1002/asl.970.
- Loeb N.G., Johnson G.C., Thorsen T.J., Lyman J.M., Rose F.G., Kato S. Satellite and Ocean Data Reveal Marked Increase in Earth's Heating Rate, *Geophysical Research Letters*, 2021, vol. 48, iss. 13, e2021GL093047, DOI: 10.1029/2021GL093047.
- Obregón M., Serrano A., Costa M.J., Silva A.M. Global Spatial and Temporal Variation of the Combined Effect of Aerosol and Water Vapour on Solar Radiation, *Remote Sensing*, 2021, vol. 13(4), p. 708, DOI: 10.3390/rs13040708.
- Ohmura A. Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes, *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, D00D05, DOI: 10.1029/2008JD011290.
- Orsini A., Tomasi C., Calzolari F., Nardino M., Cacciari A., Georgiadis T. Cloud cover classification through simultaneous ground-based measurements of solar and infrared radiation, *Atmospheric Research*, 2002, vol. 61(4), p. 251–275, DOI: 10.1016/S0169-8095(02)00003-0.
- Popova V.V., Matskovskii V.V., Mikhailov A.Yu. Sovremennye izmeneniya klimata sushi vnetropicheskoi zony severnogo polushariya [Recent climate change over the terrestrial part of the extratropical northern hemisphere zone], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2018, no. 1, p. 3–12. (In Russian)
- Schmithüsen H., Koppe R., Sieger R., König-Langlo G. *BSRN Toolbox V2.5 – a tool to create quality checked output files from BSRN datasets and station-to-archive files*, 2019, Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Bremerhaven, PANGAEA, DOI: 10.1594/PANGAEA.901332.
- Shilovtseva O.A. [History of meteorological observations at Moscow University], *Ekologo-klimaticheskie kharakteristiki atmosfery v 2014 g. po dannym Meteorologicheskoy Observatorii MGU imeni M.V. Lomonosova* [Environmental and climate characteristics of the atmosphere in 2014 according to the measurements of the Meteorological Observatory of Moscow State University], O.A. Shilovtseva, E.I. Nezval' (eds.), Moscow, MAKSPress Publ., 2015, p. 181–214. (In Russian)
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [The second assessment report of Roshydromet on climate changes and their consequences on the territory of the Russian Federation], Moscow, Roshydromet Publ., 2014, 58 p. (In Russian)
- Wan X., Qin F., Cui F., Chen W., Ding H., Li C. Correlation between the distribution of solar energy resources and the cloud cover in Xinjiang, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 675(1), p. 012060, DOI: 10.1088/1755-1315/675/1/012060.
- Wild M. How well do IPCC-AR4/CMIP3 climate models simulate global dimming/brightening and twentieth century daytime and nighttime warming? *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, D00D11, DOI: 10.1029/2008JD011372.
- Web source*
Doklad “O sostoyanii okruzhayushchei sredy v gorode Moskve v 2019 godu” [Report “On the state of the environment in the city of Moscow in 2019”], A.O. Kulbachevsky (ed.), Moscow, 2020, 222 p., URL: http://www.ecology.moscow/eco/ru/report_result (access date 15.05.2020) (In Russian)

Received 07.08.2021
 Revised 09.01.2022
 Accepted 13.05.2022

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 911.52 (551.3)(470.51)(045)

ЛИТОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КАК ФАКТОР ХОЗЯЙСТВЕННОГО ОСВОЕНИЯ И РАССЕЛЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

В.А. Обатнин¹, А.А. Кашин², М.А. Пермяков³

^{1–3} Удмуртский государственный университет, Институт естественных наук,
кафедра географии, картографии и геоинформатики

¹ Студент; e-mail: vobatnin@mail.ru

² Канд. геогр. наук, доцент; e-mail: kashin.alexey@mail.ru

³ Студент; e-mail: maximpermiakov@yandex.ru

На характер освоения территории и расселения населения исторически оказывали влияние природно-ландшафтные характеристики местности. Одним из важнейших факторов ландшафтной дифференциации территории Удмуртской Республики является чередование типов четвертичных отложений, усложняющее зональную смену типов и видов почв. В зависимости от плодородия почв внутри каждого природного ландшафта формировалось два фоновых типа природопользования – сельскохозяйственный и лесохозяйственный. Целью данной работы являлось подтверждение связей между типами четвертичных отложений (как субстратом для формирования почв) и расселенческими показателями (как индикаторами типов природопользования). Эти связи изучались в разрезе схемы ландшафтного районирования Удмуртии В.И. Стурмана. Основным методом для установления характера изучаемых связей был расчет коэффициентов парной корреляции. На основании проведенных исследований подтвердилось, что в ландшафтах с высокой долей эоловых, болотных и аллювиальных отложений наблюдается пониженная плотность населения и населенных пунктов, невысокая густота дорожной сети, повышенная людность сельских поселений. Для ландшафтов с высокой долей элювиальных, элювиально-делювиальных и делювиально-солифлюкционных отложений характерна противоположная тенденция по всем упомянутым выше показателям. Было доказано, что теснота связей между типами четвертичных отложений и расселенческими показателями изменяется в разных частях республики на фоне зональных изменений климата и аazonальной смены рельефа. Выяснилось, что наиболее сильное влияние на характер расселения населения играет распределение эоловых и элювиально-делювиальных отложений, которые имеют наибольшие площади распространения и являются территориально несовместимыми. Было установлено, что за 1970–2020 гг. теснота практически всех исследуемых связей ослабла на фоне общей тенденции оттока населения из сельской местности в города. Это произошло из-за проявления «эффекта низкой базы», который сгладил территориальные контрасты в расселении населения между ландшафтами Удмуртии.

Ключевые слова: четвертичные отложения, ландшафт, тип природопользования, расселение населения, Удмуртская Республика

DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-104-118

ВВЕДЕНИЕ

В историческом прошлом природные факторы оказывали решающее влияние на характер расселения населения. Сочетание характеристик климата, рельефа и почвообразующих пород определяет тип почвы. Плодородие почв ландшафта, в свою очередь, определяло фоновый тип природопользования – сельскохозяйственный на относительно плодородных почвах и лесохозяйственный на относительно бедных [Природопользование..., 2013, с. 73–81]. Для разных типов природопользования характерны разные типы расселения. Например, в лесном Нечерноземье

сложилась сеть мелких деревень, поскольку территория не позволяла прокормить большое население. На таежном севере формировались более крупные села, сеть которых разрежена и привязана к речным долинам: заливные луга обеспечивали кормом скот. В степной зоне и предгорных районах Кавказа располагаются самые крупные населенные пункты, однако они формируют негустую сеть поселений [Ковалев, 1963]. Хорошо прослеживается связь между природными условиями и особенностями расселения населения на примере территории Удмуртской Республики [Кашин, 2015; Кашин и др., 2019].

О важности изучения взаимодействия природных ландшафтов и человека указывают многие исследователи. В.С. Жекулин утверждает, что изменение естественных и возникновение новых геокомплексов связано главным образом с хозяйственной деятельностью населения, поэтому одна из основных задач ландшафтоведения – исследование истории освоения населением ландшафтов. Многовековая деятельность человека привела к образованию различных по степени переработки и генезису геокомплексов, однако их особенности зависят также от характера природного ландшафта. Поэтому, говоря об изменении геокомплексов, следует подчеркивать роль взаимодействия географической среды и населения в этом процессе [Жекулин, 1972]. Важность изучения роли природного ландшафта в расселении населения и характере природопользования отмечает и А.Г. Исаченко: несмотря на уменьшение зависимости человека с течением времени от «непосредственного природного окружения», вся искусственная среда построена из природных материалов [Исаченко, 2008]. Некоторые авторы обращают внимание на то, что природные условия территории и характер природопользования на определенном историческом этапе являются факторами формирования «вмещающих» («кормящих») ландшафтов – природных комплексов, в пределах которых возникают и развиваются этнические образования [Гумилев, 1990; Кульпин, 1997; Антипова, 2006].

Разные элементы ландшафтной структуры оказывают разное влияние на расселение. Так, температура на территории Удмуртии изменяется постепенно с севера на юг [Атлас Удмуртской Республики, 2016, с. 71] и служит «фоном» для зональной смены почв. Характеристики рельефа и геологического субстрата объединяет такой элемент ландшафта, как четвертичные отложения. Каждый тип отложений приурочен к определенным элементам рельефа и имеет определенный состав, что напрямую влияет на свойства почв. В этом заключается основное влияние четвертичных отложений на характер расселения населения.

Что касается самих почв, то их связь с расселенческими показателями в рамках территории Удмуртии не всегда сильно выражена [Кашин, 2015]. Зонально типы почв на Русской равнине сменяются быстрее, чем формации отложений [Национальный атлас России, 2007, с. 60–61, 298–299], и относительная ценность того или иного типа почв в разных частях Удмуртии меняется. Так, дерново-среднеподзолистые почвы на крайнем севере региона (на фоне сильноподзолистых) могут считаться относительно плодородными, а на крайнем юге региона (на фоне серых лесных) – неплодородными.

Если сравнивать типы отложений, то на эоловых песках дерновый процесс всегда будет проявляться менее интенсивно, чем на делювиально-солифлюкционных суглинках. Это предопределило исследование связи расселенческих показателей ландшафтов Удмуртии именно с характеристиками покрова четвертичных отложений.

Изучение влияния литогенной основы и почвенно-растительного покрова территории на сельское расселение чаще проводится на региональном уровне. Ландшафтным закономерностям размещения сельского населения Белорусского Полесья посвящена статья А.С. Соколова, в которой он приходит к выводу, что наибольшие плотность населения и доля селитебных ландшафтов характерны для рода холмисто-моренно-эрозионных и вторично моренных ландшафтов с покровом водно-ледниковых и лессовидных суглинков. Именно на них формируются почвы, более плодородные по сравнению с возникающими на песках [Соколов, 2015]. Известны работы по ландшафтному анализу размещения сельского населения в Якутии [Горохов, 2015], Грузии [Элизбарашвили, Николаешвили, 2006], Заонежье (Карелия) [Богданова, 2014], Новгородской области [Жекулин, 1982, с. 134–172], округе Шаклава в Иракском Курдистане [Khaleel et al., 2011]. Другие авторы отмечали, что совокупность природных условий определяла и этническую характеристику территории. В частности, коренные народы, как правило, заселяли наиболее благоприятные для ведения сельского хозяйства территории. Так, в Башкирии коренным народом заселялись равнинные участки, на которых формировались плодородные почвы, а в Марий Эл – участки на возвышенностях, свободных от болот [Имангулов и др., 2021]. Природные условия (рельеф и характер речной сети) определили и характер расселения в сербской провинции Воеводине [Bubalo-Živković et al., 2018]. В других зарубежных работах влияние ландшафта на человека рассматривается через его емкость – способность ландшафта поддерживать современное и будущее население в пределах конкретной территории [Scott, 1975; Marchetti, 2002]. В некоторых статьях выявлена взаимосвязь ландшафтных компонентов с динамикой населения [Богданова, 2014; Элизбарашвили, Николаешвили, 2006]. Впрочем, авторы не отрицают влияние и социально-экономических процессов, роль которых на современном уровне развития цивилизации становится все более значительной.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Связи между четвертичным покровом и характером расселения населения Удмуртии изучались

в разрезе схемы ландшафтного районирования В.И. Стурмана, в которой территория республики поделена на 46 ландшафтов [Природопользование..., 2013, с. 25–40]. Для получения данных о четвертичном покрове каждого ландшафта применялась авторская карта четвертичных отложений Удмуртской Республики масштаба 1:200 000, созданная на основе листов государственной геологической карты с рядом исправлений и дополнений [Обатнин, Сергеев, 2020]. Было рассмотрено шесть генетических типов четвертичных отложений, суммарно покрывающих почти всю площадь региона.

Это элювиальные, элювиально-делювиальные, делювиально-солифлюкционные, эоловые, болотные и аллювиальные отложения (рис. 1). Двучленные отложения идентифицировались по генезису их верхней части, так как именно на ней формируются почвы. Основным показателем пространственной дифференциации четвертичного покрова служила доля каждого типа отложений от площади ландшафта.

Расселенческие показатели ландшафтов на 2020 г. (табл. 1) рассчитывались на основе данных Росстата [Каталог населенных пунктов..., 2020] и топографических материалов [Удмуртская..., 2013].

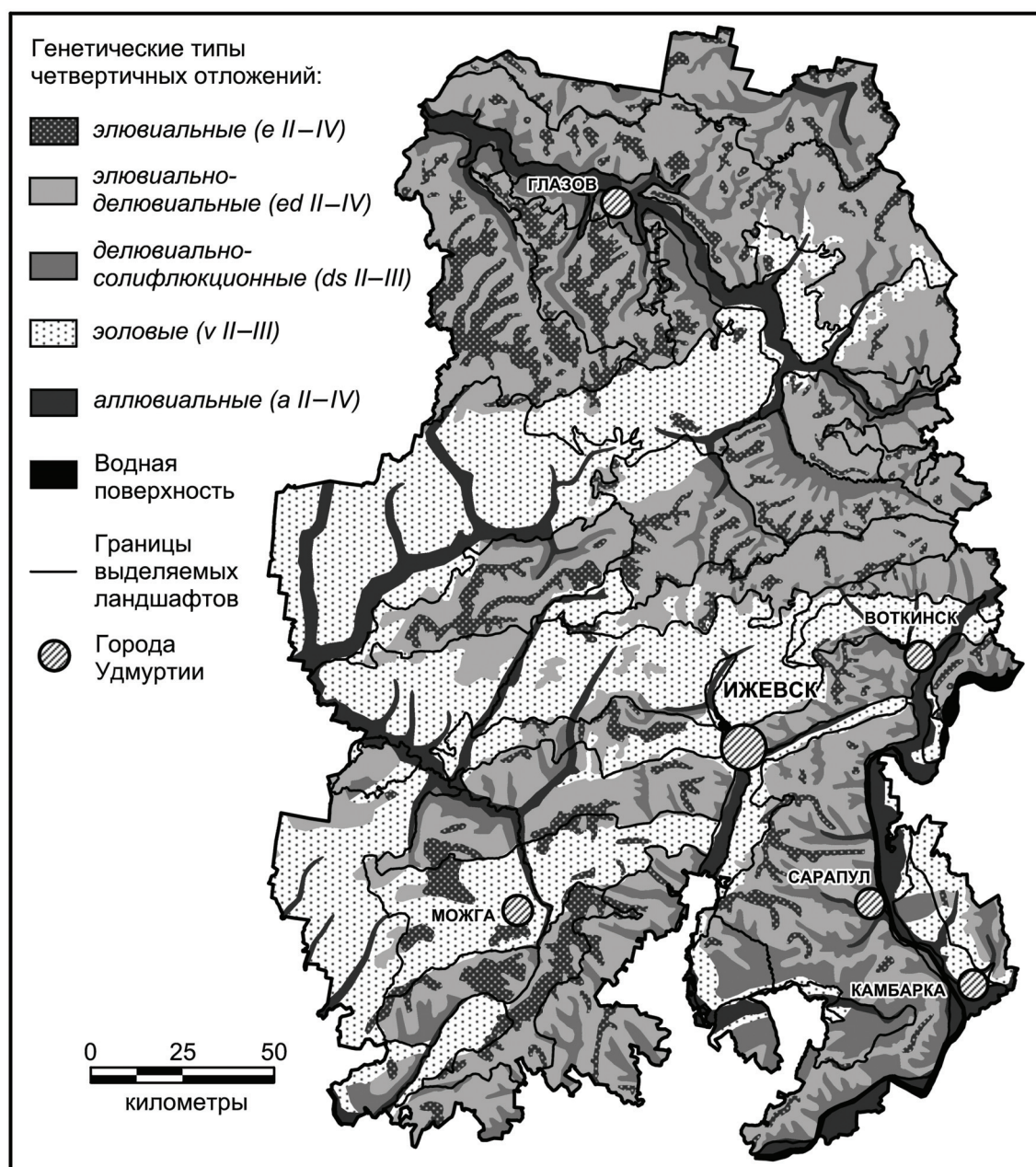


Рис. 1. Схема четвертичных отложений Удмуртской Республики

Fig. 1. Scheme of the Quaternary deposits of the Udmurt Republic

Таблица 1

Расселенческие показатели ландшафтов Удмуртии [Кашин, 2015]

Показатель, единица измерения	Методика расчета
Густота дорожной сети, км/км ²	Учитывались автодороги всех категорий, кроме лесных и полевых (имеющих непостоянную сеть и сезонный характер) и улично-дорожной сети поселений. Рассчитывалась суммарная длина автодорог в пределах ландшафта и делилась на его площадь
Плотность сельского населения, чел./км ²	Определялся перечень сельских/сельскохозяйственных поселений в пределах ландшафта (без учета районных центров). Вычислялась общая численность их населения и делилась на площадь ландшафта. К сельскохозяйственным поселениям ландшафта были отнесены все сельские, которые НЕ возникли как ж/д станции и НЕ имели лесо-, торфо- или иного промышленного предприятия
Плотность сельскохозяйственного населения, чел./км ²	
Людность сельских поселений, чел.	Определялась как среднее арифметическое людности по всем сельским/сельскохозяйственным поселениям ландшафта (без учета районных центров). Учитывались только жилые населенные пункты
Людность сельскохозяйственных поселений, чел.	
Плотность сельских поселений, ед./100 км ²	Показатель вычислялся как отношение числа жилых сельских/сельскохозяйственных поселений ландшафта (без учета районных центров) к площади этого ландшафта, уменьшенной в 100 раз
Плотность сельскохозяйственных поселений, ед./100 км ²	

Очевидно, что понятия «сельский» и «сельскохозяйственный» не тождественны, поскольку сельское население может быть занято в лесной отрасли, добыче полезных ископаемых, обслуживании железнодорожных станций и пр. Поэтому сельскохозяйственное население и поселения рассматриваются не только в составе сельского населения и поселений, но и отдельно (рис. 2).

При анализе не учитывались районные центры Удмуртии и их население, так как, несмотря на сельский статус, главной их функцией является административная. Она создает подобие агломерационного эффекта, и численность населения в райцентрах растет непропорционально их аграрным (ландшафтно-обусловленным) функциям, искажая многие исследуемые показатели.

За последние полвека рисунок расселения населения Удмуртии изменился. Это связано с оттоком населения из сельской местности, вызванным политикой ликвидации «неперспективных деревень» в 1970–1980-х гг. и социально-экономическими потрясениями 1990-х гг. Чтобы понять, как меняется степень влияния четвертичных отложений на расселение населения во времени, все расселенческие показатели (кроме густоты дорожной сети) были рассчитаны не только на 2020 г., но и на 1970 г. [Населенные..., 1971], когда массового оттока населения еще не наблюдалось. Густота дорожной сети за полвека изменилась несущественно (в отличие от качественных характеристик дорог), поскольку до-

рожная сеть является более устойчивым во времени элементом ландшафта.

Основным методом для установления связи между типами отложений и расселенческими показателями стал расчет коэффициентов парной корреляции. При выборке из 46 единиц-ландшафтов и уровне значимости 0,05 (по распределению Стьюдента) значимыми можно считать коэффициенты корреляции от |0,29|.

Помимо азональных факторов, на расселение населения оказывают влияние климатические факторы, такие как коэффициент увлажнения территории. В пределах Удмуртии величина этого показателя постепенно уменьшается с севера на юг, причем южная часть региона пересекается изолинией единичного коэффициента увлажнения [Атлас Удмуртской Республики, 2016, с. 73]. Можно считать, что в северной половине Удмуртии наблюдается избыточное увлажнение, а в южной – в целом достаточное. В области избыточного увлажнения для расселения более благоприятен расчлененный рельеф, так как условия для свободного стока воды препятствуют заболачиванию и создают необходимую мозаичность почвенного покрова. Мелкоконтурность угодий создает неудобства для обработки земли, но позволяет обеспечить относительную устойчивость хозяйственной деятельности. К югу от изолинии единичного коэффициента увлажнения для расселения более благоприятен выровненный рельеф, удобный для обработки. Угодья здесь крупнее по площади, населенные пункты многочисленнее, а их густота понижена [Кашин, 2015].

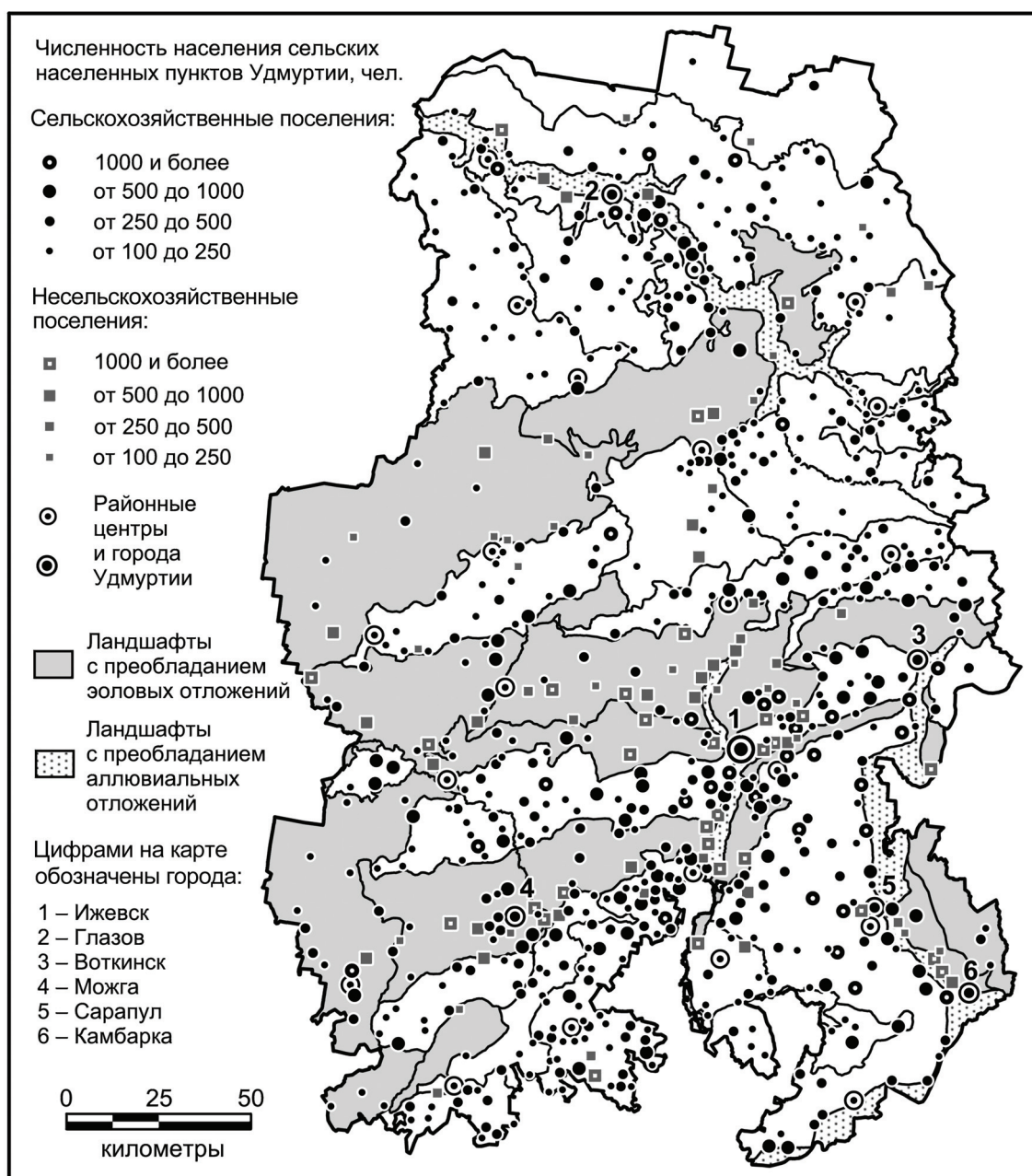


Рис. 2. Сеть населенных пунктов на 2020 г. и ландшафты Удмуртской Республики

Fig. 2. The 2020 settlement network and landscapes of the Udmurt Republic

Исходя из этого, было решено условно разделить территорию Удмуртии на северную и южную части и вычислять коэффициенты корреляции отдельно для каждой части. Условная граница была проведена по южному краю Центрально-Удмуртской низины, так как он широтно пересекает Удмуртию в центральной части и сам по себе является значимым природным рубежом (рис. 3–6). Число ландшафтов к северу и к югу от этого ландшафтного рубежа почти одинаково (22 и 24 соответственно), что практически уравнивает статистическую значимость коэффициентов корреляции в обеих частях республики (значимыми являются значения более $|0,42|$ для северной Удмуртии

и более $|0,40|$ для южной). Это позволяет сравнить степень влияния разных типов четвертичных отложений на расселение населения при разном характере увлажнения.

Таким образом, коэффициенты корреляции с долей каждого типа четвертичных отложений вычислялись отдельно для семи расселенческих показателей. При этом все показатели, кроме густоты дорожной сети, брались за 1970 и за 2020 гг., и все коэффициенты вычислялись отдельно для всей Удмуртии, ее северной и южной частей. Наиболее значимые результаты представлены в табл. 2, статистически значимые коэффициенты выделены полужирным шрифтом.

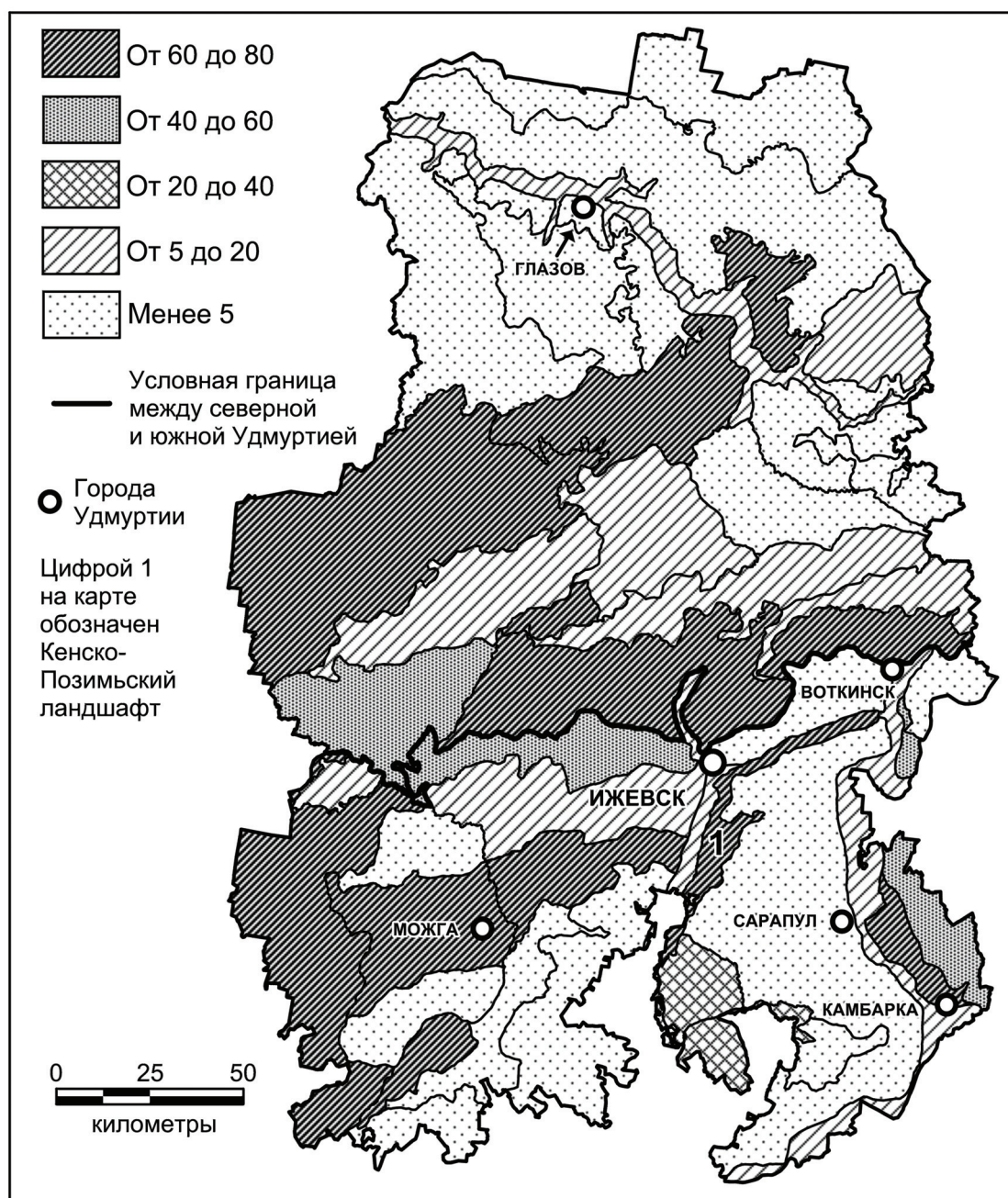


Рис. 3. Доля эоловых отложений в ландшафтах Удмуртии, % от площади

Fig. 3. The share of aeolian deposits in the landscapes of Udmurtia, % of the area

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эоловые отложения Удмуртии (см. рис. 3) формируют отдельные массивы, приуроченные к долинам крупных рек. Эти массивы имеют резкие границы, с которыми часто совпадают границы выделяемых ландшафтов. Из 46 ландшафтов Удмуртии 16 приурочены к эоловым массивам, а 30 в целом расположены за их пределами.

Эоловые отложения представлены песками и супесями, для которых характерен промывной водный режим и бедный, преимущественно кварце-

вый состав. В Удмуртии на них часто формируются сильноподзолистые и дерново-сильноподзолистые почвы [Почвенная карта..., 1990]; коэффициент парной корреляции между долей эоловых отложений и суммарной долей этих видов почв для Удмуртии равен 0,65. Для сельского хозяйства такие почвы малопригодны, поэтому эоловые массивы имеют разреженную дорожную сеть, низкую плотность сельскохозяйственного населения и поселений (см. табл. 2).

Отток сельскохозяйственного населения в города в своих абсолютных значениях слабо затронул

эоловые массивы Удмуртии, так как плотность сельскохозяйственного населения здесь изначально была мала («эффект низкой базы»). С 1970 по 2020 г. величина этого показателя в ландшафтах на эоловых песках сократилась в среднем на 2,2 чел./км², а в остальных ландшафтах – на 6,6 чел./км². Это сделало размещение населения по территории Удмуртии более равномерным и ослабило обратную корреляционную связь между долей эоловых отложений и плотностью сельскохозяйственного населения.

Обратная корреляционная связь между долей эоловых отложений и плотностью сельскохозяй-

ственных поселений за полвека усилилась. Это значит, что в пределах эоловых массивов сельскохозяйственные поселения забрасывались чаще, чем в других местах. За 50 лет более чем в два раза сократилось число сельскохозяйственных поселений в 38% ландшафтов на эоловых песках и лишь в 17% остальных ландшафтов. Вне эоловых массивов плодородные почвы стимулируют часть населения остаться, и сеть поселений в целом сохраняется. Низкое плодородие почв на эоловых песках, напротив, стимулирует жителей населенного пункта покинуть его.

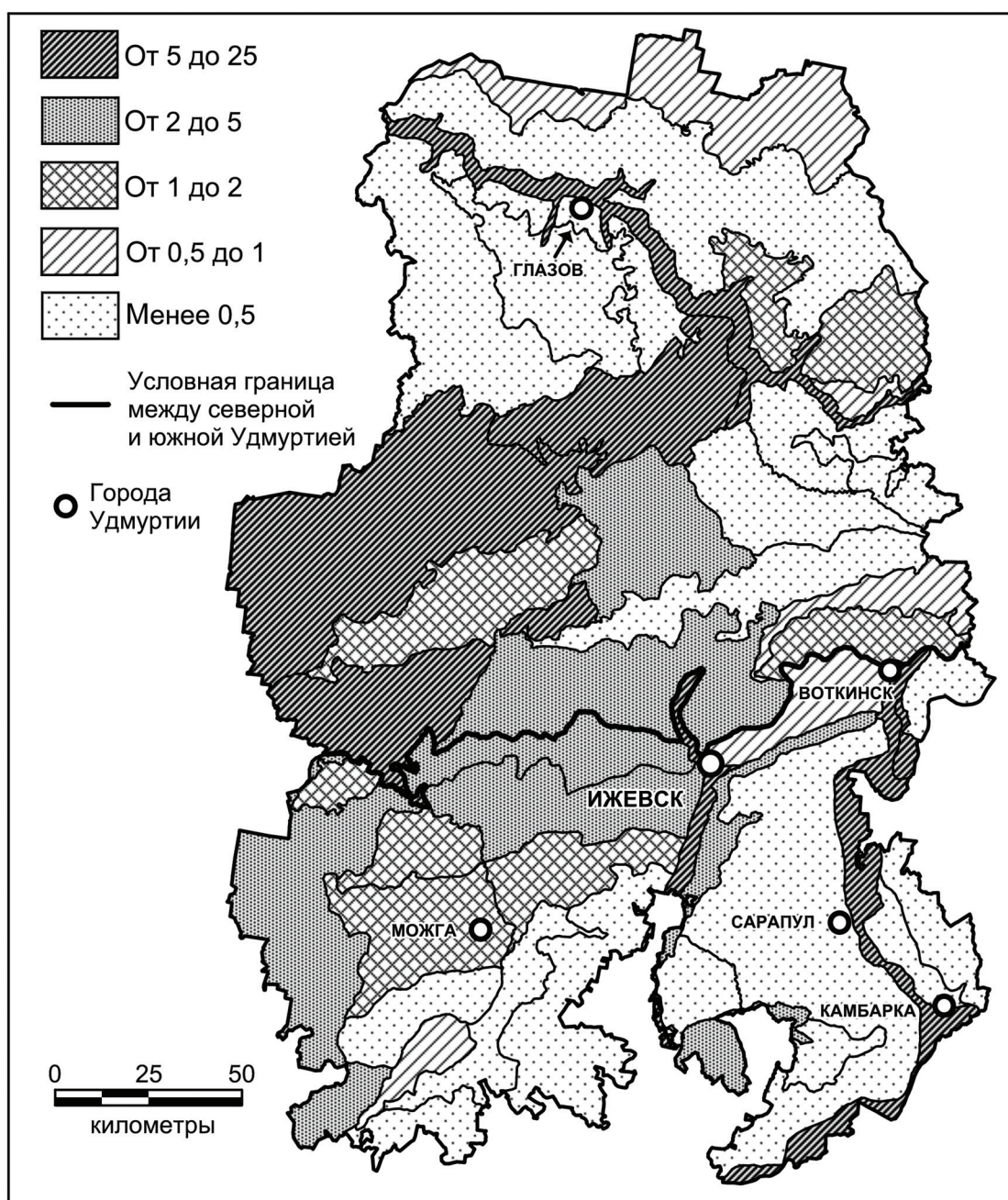


Рис. 4. Доля болотных отложений в ландшафтах Удмуртии, % от площади

Fig. 4. The share of marsh deposits in the landscapes of Udmurtia, % of the area

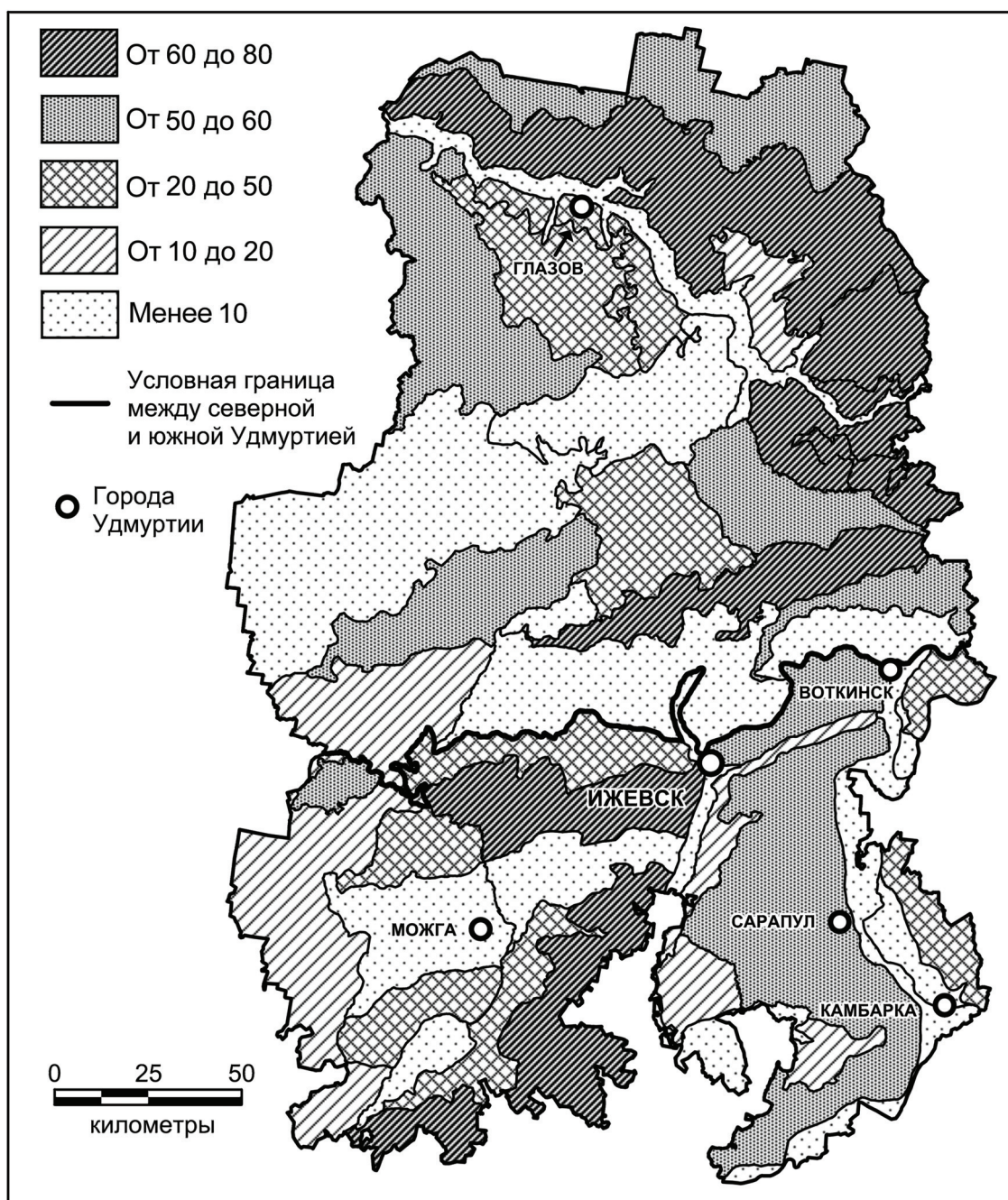


Рис. 5. Доля элювиально-делювиальных отложений в ландшафтах Удмуртии, % от площади

Fig. 5. The share of eluvial-deluvial deposits in the landscapes of Udmurtia, % of the area

Непривлекательные для аграрной деятельности золотые массивы остались покрытыми лесом; коэффициент парной корреляции между долей эоловых отложений и залесенностью для Удмуртии равен 0,76. Для этих территорий характерен лесохозяйственный тип природопользования с преобладанием несельскохозяйственных поселений. Корреляционная связь между плотностью этих поселений и долей эоловых отложений является обратной, так как каждый леспромхоз осваивал большие участки леса.

В прошлом наблюдалась прямая корреляционная связь между людностью сельских поселений и долей эоловых отложений, высокая людность местных поселков объяснялась трудоемкостью лесной отрасли. Но за 50 лет эта связь практически исчезла, что объясняется механизацией лесной отрасли и, как следствие, невостребованностью в современных условиях прежней сети постоянных поселений, связанных с лесозаготовкой. За последние годы большая часть леспромхозов оказалась закрыта, что привело к оттоку населения из соответствующих поселений.

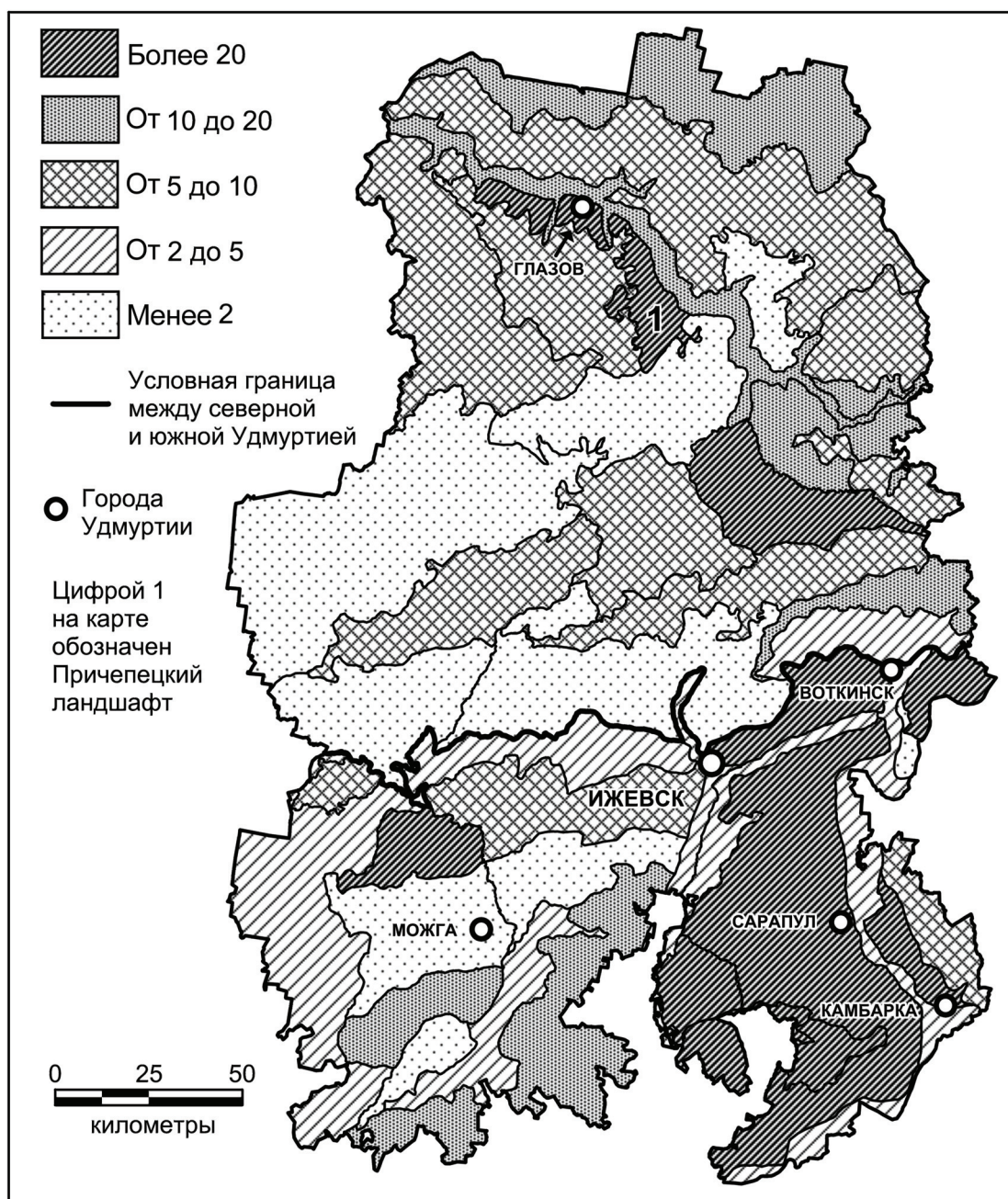


Рис. 6. Доля делювиально-солифлюкционных отложений в ландшафтах Удмуртии, % от площади

Fig. 6. The share of deluvial-solifluction deposits in the landscapes of Udmurtia, % of the area

Корреляционные связи золотых отложений с расселенческими показателями на севере Удмуртии сильнее, чем на юге. Это объясняется рядом причин.

В северной Удмуртии в глубоко врезанных долинах рек застаивается холодный воздух, сокращая продолжительность вегетационного периода. А из-за избыточного увлажнения днища долин чаще заболачиваются. Поэтому при освоении территории сельскохозяйственное население тяготело к водораздельным пространствам, где было сложно обеспечить водой большое число хозяйств. Невысокое зональное плодородие почв требовало от каждого

хозяйства распашки больших участков. Поэтому для ландшафтов северной Удмуртии характерна маленькая людность поселений, но их повышенная плотность. Такая система расселения сильно отличается от той, которая характерна для золотых массивов. Эта контрастность дополнительно усиливает корреляционные связи золотых отложений с расселенческими показателями на севере Удмуртии.

Для южной Удмуртии не характерно избыточное увлажнение, и долины реже заболачиваются. Менее расчлененный рельеф этой части региона слабо влияет на продолжительность вегетационного

периода, что не препятствует активному заселению речных долин. Из-за общей миграции химических элементов вниз по склону, в долинах обычно формируются более плодородные почвы [Почвенная карта..., 1990], к которым исторически тяготело местное население. Близость к источнику воды и высокое естественное плодородие почв привело к образованию крупных поселений, располагающихся по сравнению с поселениями северной Удмуртии более дисперсно. Схожая система расселения характерна для эоловых массивов, что уменьшает контрастность между ландшафтами и ослабляет связь эоловых отложений с расселенческими показателями на юге Удмуртии.

В пределах крупного эолового массива на юге Удмуртии расположен город Можга. Он возник как стекольный завод, тяготеющий к месту добычи кварцевых песков. Агломерационный эффект увеличил плотность населения и населенных пунктов вокруг города, несмотря на широкое распространение эоло-

вых отложений. Аналогичный эффект наблюдается в Кенско-Позимском ландшафте, северо-западную часть которого занимают пригороды Ижевска (см. рис. 3). Это уменьшает контрасты в структуре заселения эоловых массивов и остальных территорий, ослабляя корреляционные связи на юге Удмуртии.

Болотные отложения (см. рис. 4) чаще приурочены к поймам и надпойменным террасам широких речных долин. По таким долинам нередко протягиваются эоловые массивы, поэтому крупные участки болотных и эоловых отложений на территории Удмуртии встречаются совместно. Болотные отложения, как и эоловые, неблагоприятны для аграрной деятельности. Поселения, основанные для добычи торфа, размещены дисперсно и имели в прошлом достаточно высокую людность, что также свойственно поселениям на эоловых песках. Из-за почти полного прекращения добычи торфа с 1990-х гг. поселки при торфопредприятиях, как и при леспромхозах, быстро теряют население.

Таблица 2

Коэффициенты парной корреляции расселенческих показателей с долей эоловых, элювиально-делювиальных и делювиально-солифлюкционных отложений по ландшафтам Удмуртии

Тип отложений	Часть Удмуртии	Год	Густота дорожной сети	Плотность сельского населения	Плотность сельскохозяйственного населения	Людность сельского населения	Людность сельскохозяйственного населения	Плотность сельских поселений	Плотность сельскохозяйственных поселений
Эоловые	Вся	1970	-0,55	-0,36	-0,67	0,26	-0,09	-0,58	-0,63
		2020		-0,21	-0,54	-0,03	0,01	-0,59	-0,67
	Север	1970	-0,65	-0,52	-0,68	0,50	-0,23	-0,66	-0,69
		2020		-0,17	-0,53	0,38	0,19	-0,71	-0,71
	Юг	1970	-0,48	-0,26	-0,66	0,18	-0,03	-0,49	-0,59
		2020		-0,29	-0,61	-0,18	-0,22	-0,45	-0,63
Элювиально-делювиальные	Вся	1970	0,53	0,45	0,71	-0,34	-0,15	0,73	0,77
		2020		0,19	0,52	-0,24	-0,19	0,71	0,79
	Север	1970	0,60	0,45	0,61	-0,58	-0,06	0,64	0,70
		2020		0,08	0,37	-0,35	-0,28	0,67	0,73
	Юг	1970	0,66	0,58	0,90	-0,14	-0,05	0,82	0,85
		2020		0,45	0,82	-0,17	0,05	0,76	0,88
Делювиально-солифлюкционные	Вся	1970	0,41	0,33	0,37	0,21	0,43	0,17	0,17
		2020		0,30	0,41	-0,03	0,15	0,28	0,27
	Север	1970	0,51	0,56	0,64	-0,13	0,42	0,44	0,45
		2020		0,47	0,69	-0,07	0,03	0,51	0,50
	Юг	1970	0,31	0,20	0,25	0,21	0,34	0,10	0,13
		2020		0,18	0,26	-0,12	0,12	0,24	0,24

Примечание. Полу жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты.

Корреляционные связи расселенческих показателей с болотными отложениями идентичны по направленности их связей с эоловыми отложениями, однако проявляются слабее. Меньшая теснота связей объяснима менее контрастным распределением болот между ландшафтами Удмуртии по сравнению с локализованными эоловыми массивами.

Аллювиальные отложения (см. рис. 1) слагают поймы и надпойменные террасы речных долин. Аллювий верхних надпойменных террас часто преобразуется с поверхности деятельностью ветра или перекрывается делювиально-солифлюкционным шлейфом [Обатнин, Сергеев, 2020]. С пойменным аллювием связаны дерново-аллювиальные почвы, а на аллювии надпойменных террас часто формируются серые лесные почвы [Почвенная карта..., 1990].

Доля аллювиальных отложений в общей площади ландшафта возрастает при уменьшении вертикальной расчлененности рельефа (увеличивается ширина пойм) и при увеличении густоты речной сети (увеличивается суммарная протяженность пойм). Коэффициент парной корреляции между этими показателями для Удмуртии равен $-0,62$ в первом случае и $0,42$ – во втором.

Слабая вертикальная расчлененность рельефа неблагоприятна для аграрного освоения территории, так как плоские низменные участки рельефа часто заболачиваются. Также к обширным слабо-расчлененным низменным участкам нередко приурочены эоловые массивы. Поэтому высокая доля аллювиальных отложений характерна для ландшафтов с лесохозяйственным типом природопользования, где наблюдается низкая густота дорожной сети, низкая плотность населения и населенных пунктов, повышенная людность поселений.

Повышенная густота речной сети наблюдается на возвышенных участках с расчлененным рельефом (с расчленением связано обилие выходов подземных вод на поверхность). Вертикальное расчленение территории обеспечивает хороший дренаж и мозаичную структуру ландшафта, что способствует сельскохозяйственному освоению территории. В этом случае высокая доля аллювиальных отложений в ландшафте будет связана с высокой плотностью населения, сельскохозяйственных населенных пунктов и дорожной сети.

Первый из факторов является статистически более значимым, поэтому корреляционные связи расселенческих показателей с аллювиальными отложениями в целом аналогичны по направленности их связей с эоловыми (см. табл. 2) и болотными отложениями. Аналогичными являются и изменения связей во времени.

С каждым из двух факторов связаны разные системы расселения, их совместное влияние сильно

ослабляет корреляционные связи между расселенческими показателями и долей аллювиальных отложений. Это особенно характерно для северной Удмуртии, так как она имеет более возвышенный и расчлененный рельеф (следовательно, большую густоту речной сети) и фактор, влияющий на долю аллювиальных отложений, менее однозначен.

Элювиально-делювиальные отложения (см. рис. 5) приурочены к верхним частям склонов и образуются при начальной стадии денудации коренных пород. На дневную поверхность территории Удмуртии в основном выходят алевролиты и глины [Геология СССР..., 1964, с. 405–407], и данный тип отложений чаще представлен суглинками [Почвенная карта..., 1990] – наиболее подходящими по механическому составу породами для ведения сельского хозяйства. С этими отложениями чаще связан сельскохозяйственный тип природопользования с относительно высокой плотностью населения, высокой густотой дорожной сети, высокой плотностью населенных пунктов и их пониженной людностью (см. табл. 2).

Большая доля элювиально-делювиальных отложений говорит о возвышенном положении ландшафта, что означает его слабую заболаченность, и об отсутствии здесь эоловых массивов. Коэффициенты парной корреляции между долей элювиально-делювиальных и долей болотных и эоловых отложений для Удмуртии равны соответственно $-0,54$ и $-0,72$. Можно сказать, что пригодные для аграрного освоения элювиально-делювиальные отложения и малопригодные для него эоловые и болотные отложения взаимоисключают друг друга. Это усиливает контрастность исследуемых ландшафтов, и теснота связей между расселенческими показателями и элювиально-делювиальными отложениями значительно возрастает.

В южной Удмуртии на элювиально-делювиальных отложениях нередко формируются плодородные серые лесные почвы [Почвенная карта..., 1990], и контрастность в освоении этих территорий и эоловых массивов достигает максимума. На крайнем севере Удмуртии на элювиально-делювиальных суглинках могут формироваться зональные сильноподзолистые почвы, непривлекательные для аграрного освоения. Поэтому прямая корреляционная связь элювиально-делювиальных отложений с плотностью населения и плотностью населенных пунктов на севере Удмуртии ослабевает.

Обратная корреляционная связь между долей элювиально-делювиальных отложений и людностью сельских поселений является статистически значимой только на севере Удмуртии. В этой части региона небольшие сельскохозяйственные поселения приводораздельных участков противопоставляются относительно крупным несельскохозяйственным поселениям эоловых массивов. На юге Удмуртии

эти различия заметны слабо из-за повышенной людности сельскохозяйственных поселений.

Изменения тесноты всех корреляционных связей во времени аналогичны изменениям, наблюдаемым при анализе других типов отложений.

Элювиальные отложения (см. рис. 1) приурочены к водоразделам и в целом похожи на предыдущий тип по своему положению в рельефе и механическому составу. Для ландшафтов с высокой долей элювиальных отложений также характерен сельскохозяйственный тип природопользования с повышенной плотностью населения и населенных пунктов, повышенной густотой дорожной сети, пониженной людностью поселений.

Корреляционные связи расселенческих показателей с элювиальными отложениями аналогичны по направленности их связей с элювиально-делювиальными отложениями (см. табл. 2). Аналогичны и изменения тесноты связей во времени, но сами связи в целом менее тесные. Дело в том, что элювиальные отложения слабее локализованы по территории Удмуртии и встречаются в пределах эоловых массивов, так как водоразделы, в отличие от большинства склонов, не всегда перекрывались эоловыми песками [Обатнин, Сергеев, 2020].

Так как на севере Удмуртии сельскохозяйственные поселения тяготеют к водоразделам, а на юге чаще удалены от них, то прямая корреляционная связь между долей элювиальных отложений и плотностью населенных пунктов проявляется сильнее в северной части региона.

Делювиально-солифлюкционные отложения (см. рис. 6) приурочены к нижним частям склонов и представлены суглинками, с которыми связан процесс солифлюкции. Миграция химических элементов в целом направлена вниз по склону, и на участках этих отложений формируются более плодородные почвы, чем на водоразделах [Почвенная карта..., 1990]. Коэффициент парной корреляции между долей делювиально-солифлюкционных отложений и долей серых лесных почв для Удмуртии равен 0,54. С этим типом отложений связан сельскохозяйственный тип природопользования, для которого характерна высокая плотность населения и густая дорожная сеть (см. табл. 2).

При этом плотность населения и густота дорожной сети не образуют статистически значимых корреляционных связей с долей делювиально-солифлюкционных суглинков на юге Удмуртии. Это связано с агломерационным эффектом городов Можга и Ижевск, который уменьшает контрасты в плотности заселения эоловых массивов и остальных территорий и был рассмотрен при анализе эоловых отложений.

Плодородные почвы и близость к источнику воды приводили к образованию в нижних частях

склонов крупных сельскохозяйственных поселений. Корреляционная связь между долей делювиально-солифлюкционных отложений и людностью поселений прямая, но очень слабая, так как крупные населенные пункты также характерны для эоловых массивов, где делювиально-солифлюкционные отложения отсутствуют.

Корреляционная связь между этим типом отложений и плотностью населенных пунктов также является прямой, но для Удмуртии в целом статистически незначимой. Крупные сельскохозяйственные поселения в нижних частях склонов расположены достаточно дисперсно. Их плотность, с одной стороны, выше, чем у населенных пунктов в пределах эоловых массивов, а с другой стороны, ниже, чем у многочисленных поселений на возвышенных участках северной Удмуртии. Исключением можно считать делювиально-солифлюкционный шлейф на левом склоне долины реки Чепца, выделяемый в Причепецкий ландшафт (см. рис. 6). Из 46 ландшафтов он занимает четвертое место по плотности сельских и по плотности сельскохозяйственных поселений. Крайне высокая освоенность ландшафта связана с тем, что это одна из немногих обширных выровненных территорий с плодородными почвами в северной половине Удмуртии. Значительные размеры долины Чепцы не приводят к застаиванию холодного воздуха, который сокращает продолжительность вегетационного периода. Также высокая плотность населенных пунктов в этом ландшафте усиливается агломерационным эффектом города Глазов и поселка Базезино. Во многом из-за этого ландшафта прямая корреляционная связь между долей делювиально-солифлюкционных отложений и плотностью поселений является статистически значимой для северной Удмуртии.

За 50 лет корреляционная связь делювиально-солифлюкционных суглинков с плотностью населенных пунктов усилилась, а с их людностью — ослабла, что также наблюдалось при анализе предыдущих типов отложений. При этом усилилась связь между долей делювиально-солифлюкционных суглинков и плотностью сельскохозяйственного населения. Это можно объяснить высоким плодородием формирующихся на этих отложениях почв, поэтому, несмотря на изначально высокую численность проживающего здесь населения, его абсолютный отток отсюда был ниже, чем с других территорий.

ВЫВОДЫ

Характер четвертичных отложений оказал заметное влияние на формирование рисунка расселения Удмуртской Республики.

Для территорий с преобладанием эоловых и болотных отложений характерен лесохозяйственный тип природопользования. Сельскохозяйственный

тип характерен для участков элювиальных, элювиально-делювиальных, делювиально-солифлюкционных отложений. Разнонаправленными являются корреляционные связи расселенческих показателей с долей аллювиальных отложений.

Наиболее тесную связь с расселенческими показателями имеют элювиально-делювиальные и эоловые отложения, по причине их широкого распространения по территории Удмуртии и несовместимости в пределах одного ландшафта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Удмуртской Республики / под ред. И.И. Рысина. М.: Феория, 2016. 282 с.
- Антипова А.В. Вмещающий ландшафт (географический смысл и эколого-ресурсное содержание) // История и современность. 2006. № 2. с. 3–23.
- Богданова М.С. Динамика сельскохозяйственного освоения ландшафтов Заонежья (Республика Карелия) // Известия Русского геогр. общества. 2014. Т. 146. Вып. 6. С. 26–40.
- Геология СССР. Т. 11. Поволжье и Прикамье. Ч. 1: Геологическое описание / Мин-во геологии РСФСР. Сред.-Волж. территор. геол. упр. М.: Недра, 1967. 871 с.
- Горохов А.Н. Влияние ландшафтно-экологических особенностей на размещение населения Якутии / География и природные ресурсы. 2015. № 2. С. 134–139.
- Гумилев Л.Н. Этногенез и биосфера Земли / под ред. В.С. Жекулина. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 526 с.
- Жекулин В.С. Историческая география ландшафтов: курс лекций. Новгород: Изд-во Новг. пед. ин-та, 1972. 228 с.
- Жекулин В.С. Историческая география: предмет и методы. Л.: Наука, 1982. 224 с.
- Имангулов Л., Максименко М., Савоскул М., Сафронов С. Влияние этнокультурного фактора на эволюцию сельского расселения на примере полиэтнических районов Башкирии и Марий Эл // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 1. С. 109–119.
- Исаченко А.Г. Ландшафтная структура Земли, расселение, природопользование. СПб.: Изд. дом СПбГУ, 2008. 320 с.
- Каталог населенных пунктов Удмуртской Республики (на 1 января 2020 г.). Росстат: Территориальный орган Федеральной службы гос. статистики по Удмуртской Республике. Ижевск, 2020.
- Кашин А.А. Исследование ландшафтной организации территории Удмуртии как фактора хозяйственного освоения и расселения населения: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Пермь, 2015. 24 с.
- Ковалев С.А. Сельское расселение (географическое исследование). М.: Изд-во МГУ, 1963. 371 с.
- Кульпин Э.С. Россия: экономика и мировоззрение // Билль о правах человека и природы. Социально-естественная история. Вып. IX. М., 1997. С. 23–36.
- Населенные пункты Удмуртской АССР по данным все-союзной переписи населения 1970 г. Центр. стат. управление СССР: Удм. респ. управление статистики. Ижевск, 1971.
- Национальный атлас России: в 4 т. Т. 2. Природа. Экология. М.: Роскартография, 2007. 495 с.
- Обатнин В.А., Сергеев А.В. Анализ распределения четвертичных отложений на территории Удмуртской Республики путем создания цифровой карты // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2020. Вып. 2. С. 175–189.
- Почвенная карта Удмуртской АССР, масштаб 1:200 000 / отв. ред. Р.К. Сигнаевский, Б.П. Теплых. М.: ГУГК, 1990.
- Природопользование и геоэкология Удмуртии: монография / под ред. В.И. Стурмана. Ижевск: Изд-во Удмуртского университета, 2013. 384 с.
- Соколов А.С. Ландшафтные закономерности размещения сельского населения и селитебных ландшафтов Белорусского Полесья // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. Естественные науки. 2015. № 6. С. 35–38.
- Удмуртская Республика: атлас масштаба 1:200 000. Екатеринбург: Уралаэрогеодезия, 2013.
- Элиэбараишвили Н.К., Николаишвили Д.А. Ландшафтный анализ размещения населения Грузии // География и природные ресурсы. 2006. № 4. С. 150–155.
- Khaleel A., Ngah I., Ossman T. Distribution and spatial arrangement of rural population in Shaqlawa district, Kurdistan region-Iraq, *Journal of Geography and Regional Planning*, 2011, vol. 4(16), p. 785–791.
- Bubalo-Živković M., Kalenjuk B., Lukić T., Đerčan B. Who Is Still Engaged in Agriculture in Vojvodina? *European Geographical Studies*, 2018, no. 5(1), p. 32–41.
- Marchetti M. Environmental changes in the central Po Plain (northern Italy) due to fluvial modifications and anthropogenic activities, *Geomorphology*, 2002, vol. 44, p. 361–373.
- Scott J.F. Relationship between land and population: A note on Canada's carrying capacity, *Geogr. ann.*, 1975, vol. B57, no. 2, p. 128–132.

Электронный ресурс

Кашин А.А., Пермяков М.А., Тимерханова Н.Н. Удмуртия в ландшафтном измерении: природа, культура, этносы: научно-популярная монография. Ижевск: Изд. центр «Удмуртский университет», 2019. URL: <http://elibrary.udsu.ru/xmlui/handle/123456789/18228> (дата обращения 13.06.2022).

Поступила в редакцию 28.05.2021

После доработки 04.02.2022

Принята к публикации 13.05.2022

LITHOLOGICAL FEATURES AS A FACTOR OF ECONOMIC DEVELOPMENT AND SETTLEMENT IN THE UDMURT REPUBLIC

V.A. Obatnin¹, A.A. Kashin², M.A. Permyakov³

¹⁻³ Udmurt State University, Institute of Natural Sciences, Department of Geography, Cartography and Geoinformatics

¹ Student; e-mail: vobatnin@mail.ru

² Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: kashin.alexey@mail.ru

³ Student; e-mail: maximpermiakov@yandex.ru

Natural characteristics of the area historically influenced the character of territory development and settlement. A most important landscape differentiation factor of the territory of the Udmurt Republic is the alternation of Quaternary deposit types, which greatly complicates the zonal change of soil types. Depending on soil fertility within each natural landscape agricultural and forestry types of nature management were formed. The aim of the study was to confirm the relationships between the types of Quaternary deposits as a substrate for soil formation and settlement indicators as indicators of nature management types. The relationships were studied within Professor V.I. Sturman's landscape zoning scheme of the Udmurt Republic. To determine a character of the relationships, Calculation of pair correlation coefficients was the principal method of finding the nature of relationships under study. The research proved that landscapes with higher proportion of aeolian, marsh and alluvial deposits are characterized by lower population and settlement density, low density of the road network, and higher average population of rural settlements. The opposite trend for all the indicators mentioned above is observed in landscapes with higher proportion of eluvial, eluvial-deluvial and deluvial-solifluction deposits. It was proved that close relationship between the types of Quaternary sediments and settlement indicators varies in different parts of the republic, against the background of zonal climate changes and azonal relief changes. It turned out that the distribution of geographically incompatible aeolian and eluvial-deluvial deposits, which have the largest distribution areas, has the greatest impact on the settlement pattern. It was found that for the period from 1970 to 2020, the strength of most studied relationships decreased against the general trend of population outflow from rural areas to cities. This was due to the "low base effect", which leveled off territorial contrasts in the population settlement within the landscapes of the Udmurt Republic.

Keywords: Quaternary deposits, landscape, type of nature management, settlement of population, the Udmurt Republic

REFERENCES

- Antipova A.V. Vmeshchayushchij landshaft (geograficheskij smysl i ekologo-resursnoe sodержanie) [The enclosing landscape (geographical meaning and eco-resource content)], *Istoriya i sovremennost'*, 2006, no. 2. (In Russian)
- Atlas Udmurtskoi Respubliki* [Atlas of the Udmurt Republic], I.I. Rysin (ed.), Moscow, Feoria Publ., 2016, 282 p.
- Bogdanova M.S. Dinamika sel'skokhozyaystvennogo osvoeniya landshaftov Zaonezh'ya (Respublika Kareliya) [Dynamics of agricultural development of Zaonezhye landscapes (Republic of Karelia)], *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2014, vol. 146, no. 6, p. 26–40. (In Russian)
- Bubalo-Živković M., Kalenjuk B., Lukić T., Đerčan B. Who Is Still Engaged in Agriculture in Vojvodina? *European Geographical Studies*, 2018, no. 5(1), p. 32–41.
- Elizbarashvili N.K., Nikolaishvili D.A. Landshaftnyi analiz razmeshcheniya naseleniya Gruzii [Landscape analysis of the distribution of population of Georgia], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2006, no. 4, p. 150–155. (In Russian)
- Geologiya SSSR, t. 11, Povolzh'e i Prikam'e, ch. 1, Geologicheskoe opisanie* [Geology of the USSR, vol. 11, Volga and Kama regions, p. 1, Geological characteristic], Ministry of Geology of the RSFSR, Sredne-Volzhskoe Territorial Geological Department, A.V. Sidorenko, K.R. Chepikov (eds.), Moscow, Nedra Publ., 1967, 871 p. (In Russian)
- Gorokhov A.N. Vliyanie landshaftno-ekologicheskikh osobennostei na razmeshchenie naseleniya Yakutii [The influence of landscape and ecological features on the location of population in Yakutia], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2015, no. 2, p. 134–139. (In Russian)
- Gumilev L.N. *Etnogenez i biosfera Zemli* [Ethnogenesis and the Earth's Biosphere], Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., 1990, 526 p. (In Russian)
- Imangulov L., Maksimenko M., Savoskul M., Safronov S. Vliyanie etnokul'turnogo faktora na evolyuciyu sel'skogo rasseleniya na primere polietnichnykh rajonov Bashkirii i Marij El [The influence of the ethno-cultural factor on the evolution of rural settlement patterns (case study of the polyethnic regions of Bashkiria and Mari El)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 1, p. 109–119. (In Russian)
- Isachenko A.G. *Landshaftnaya struktura Zemli, rasselenie, prirodopol'zovanie* [Earth's landscape structure, settlement, use of natural resources], Saint Petersburg, St. Petersburg State University Publ., 2008, 320 p. (In Russian)
- Kashin A.A. *Issledovanie landshaftnoi organizatsii territorii Udmurtii kak faktora khozyaystvennogo osvoeniya i rasseleniya naseleniya* [Study of landscape organization of the territory of Udmurtia as a factor of economic development and settlement], Ph.D. Thesis in Geography, Perm', 2015, 24 p. (In Russian)

- Katalog naselennykh punktov Udmurtskoi Respubliki (na 1 yanvarya 2020 g.)* [Directory of localities in the Udmurt Republic (as of January 1, 2020)], Territorial body of the Federal State Statistics Service for the Udmurt Republic, Izhevsk, 2020. (In Russian)
- Khaleel A., Ngah I., Ossman T. Distribution and spatial arrangement of rural population in Shaqlawa district, Kurdistan region-Iraq, *Journal of Geography and Regional Planning*, 2011, vol. 4(16), p. 785–791.
- Kovalyov S.A. *Sel'skoe rasselenie (geograficheskoe issledovanie)* [Rural settlement (geographical study)], Moscow, MSU Publ., 1963, 371 p. (In Russian)
- Kul'pin E.S. Rossiya: ekonomika i mirovozzrenie [Russia: economy and outlook], *The Bill of Rights of Man and Nature. A socio-natural history*, 1997, no. 9. (In Russian)
- Marchetti M. Environmental changes in the central Po Plain (northern Italy) due to fluvial modifications and anthropogenic activities, *Geomorphology*, 2002, vol. 44, p. 361–373.
- Natsional'nyi atlas Rossii, v 4 t., t. 2, Priroda. Ekologiya* [National Atlas of Russia, vol. 2, Nature. Ecology], A.V. Borodko (ed.), Moscow, Ruscartography Publ., 2007, 495 p. (In Russian)
- Naselennyye punkty Udmurtskoi ASSR po dannym vsesoyuznoi perepisi naseleniya 1970 g.* [Localities of the Udmurt ASSR according to 1970 All-Union population census], Central Statistical Office of the USSR, Department of Statistics of the Udmurt Republic, Izhevsk, 1971. (In Russian)
- Obatnin V.A., Sergeev A.V. Analiz raspredeleniya chetvertichnykh otlozhenii na territorii Udmurtskoi Respubliki putem sozdaniya tsifrovoy karty [Analysis of the distribution of quaternary sediments on the territory of the Udmurt Republic by creating a digital map], *Vestn. Udmurtskogo un-ta, Seriya Biologiya. Nauki o Zemle*, 2020, no. 2, p. 175–189. (In Russian)
- Pochvennaya karta Udmurtskoi ASSR, masshtab 1:200 000* [Soil map of the Udmurt ASSR, scale 1:200 000], R.K. Sig-naevskii, B.P. Teplykh (eds.), Moscow, Main Department of Geodesy and Cartography, 1990. (In Russian)
- Prirodopol'zovanie i geoekologiya Udmurtii* [Nature management and geoecology of Udmurtia], V.I. Sturman (ed.), Izhevsk, Udmurt State university Publ., 2013, 384 p. (In Russian)
- Scott J.F. Relationship between land and population: A note on Canada's carrying capacity, *Geogr. ann.*, 1975, vol. B57, no. 2, p. 128–132.
- Sokolov A.S. Landshaftnye zakonomernosti razmeshcheniya sel'skogo naseleniya i selitebnykh landshaftov Belorusskogo Poles'ya [Landscape patterns of the rural population and residential landscapes of the Belarusian Polesie], *Izvestiya Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny, Estestvennye nauki*, 2015, no. 6, p. 35–38. (In Russian)
- Udmurtskaya Respublika, atlas masshtaba 1:200 000* [Udmurt Republic, atlas of scale 1:200 000], Ekaterinburg, Uralaerogeodeziya, 2013. (In Russian)
- Zhekulin V.S. *Istoricheskaya geografiya landshaftov: kurs lektsii* [Historical geography of landscapes: a course of lectures], Novgorod, Novgorod Pedagogical in-te Publ., 1972, 228 p. (In Russian)
- Zhekulin V.S. *Istoricheskaya geografiya: predmet i metody* [Historical geography: subject and methods], Leningrad, Nauka Publ., 1982, 224 p. (In Russian)
- Web source*
- Kashin A.A., Permyakov M.A., Timerkhanova N.N. *Udmurtiya v landshaftnom izmerenii: priroda, kul'tura, etnosy: Nauchno-populyarnaya monografiya* [Udmurtia in the landscape dimension: nature, culture, ethnos: popular science monograph], Izhevsk, Udmurt St. un-ty Publ., 2019, URL: <http://elibrary.udsu.ru/xmlui/handle/123456789/18228> (access date 13.06.2022). (In Russian)

Received 28.05.2021

Revised 04.02.2022

Accepted 13.05.2022

СЕЛЬСКАЯ ДЖЕНТРИФИКАЦИЯ В РОССИЙСКОМ НЕЧЕРНОЗЕМЬЕ

К.В. Аверкиева

*Институт географии РАН, отдел социально-экономической географии,
ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: k_averkieva@igras.ru*

На фоне продолжительного миграционного оттока сельских жителей в города процесс переезда горожан в сельскую местность, особенно тех, кто не меняет городскую регистрацию или проживает на селе сезонно, почти не заметен. Однако на сельские территории приток новых жителей оказывает большое влияние, поскольку горожане имеют богатый социальный капитал и иные ресурсы для преобразования сельской местности. На примере Верховажского района, где проводились полевые исследования на протяжении нескольких лет, показано, как горожане включаются в различные виды экономической и социальной жизни села или предлагают новые виды деятельности. В селах по долине Ваги расположены база реставраторов деревянного зодчества, центр дровяного обжига керамических изделий, музей старинной конской упряжи и другие объекты, созданные горожанами. В то же время бывшие горожане работают и в ординарных объектах сельской социальной инфраструктуры: школах, домах культуры, магазинах, сельских администрациях, предлагая сельским жителям принятые в городах практики (публичные лекции, бук-кроссинг, раздельный сбор мусора, сельский секонд-хенд и др.).

Ключевые слова: сельская джентрификация, село-городские миграции, Нечерноземье, Вологодская область

DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-119-128

ВВЕДЕНИЕ

Переезд горожан в сельскую местность – явление распространенное, но статистически не очень заметное и количественно не перекрывающее миграционный отток и естественную убыль на селе. При этом бывшие горожане оказывают заметное влияние на сельские территории, не столько включаясь в сложившийся хозяйственный уклад, сколько показывая новые варианты хозяйствования, задействуют свой социальный капитал для реализации новых экономических или социальных инициатив.

Публикации о переезде горожан в сельскую местность встречаются у российских авторов, в первую очередь, социологов, антропологов, экономикогеографов и демографов. Междисциплинарное внимание к этому процессу порождает терминологическую путаницу, которую усиливают журналисты, освещающие отдельные истории переселения на село. Так, экономикогеографы [Нефедова и др., 2015] и часть социологического сообщества [Горожане в деревне, 2016] давно используют термин «дезурбанизация», сотрудничающие с зарубежными коллегами и опирающиеся на принятые в европейской науке термины социологи [Жаднова, 2014] чаще пользуются калькой термина counterurbanization, т. е. «контрурбанизация». Также нередко выходят статьи, где интересующий исследователей [Покровский и др., 2020; Звягинцев, Неуважаева, 2015] процесс называется обратной миграцией, что могло бы быть справедливо, если бы в сельскую местность возвращались именно те, кто в недавнем прошлом переезжал в города. Но

нередко потоки из села в город и из города в село идут параллельно, охватывая разные социальные группы.

Одновременно добавляются другие термины, в частности «рурализация» [Овчинцева, 2021], что не вполне отражает суть явления, поскольку он делает акцент не на миграции, а на придании сельских черт чему-либо, в том числе территориям. В публикациях, посвященных переезду горожан в сельскую местность, встречается и термин «рурбанизация» [Рурбанизация по-русски..., 2011], который означает появление городских элементов быта в сельской среде. Его охотно использовали географы, описывая государственную политику «смычки города и деревни», которая в 1960–1980-х гг. воплощалась в возведении многоквартирного благоустроенного жилья в сельской местности вместо деревенских изб с приусадебными участками. Но для описания переезда горожан, даже если он сопровождается созданием городского комфорта в сельском жилище, он не очень подходит. Иногда и вовсе появляются не принятые в науке неологизмы, как «антиурбанизация» [Сахнин, 2021], призванные, по всей видимости, подчеркнуть противопоставление села городу и показать, насколько новый образ жизни переселенцев отличен от прежнего, городского.

Терминологические разногласия только подчеркивают нарастающий интерес научного сообщества к тому явлению, которое почти не поддается количественной оценке (потому что многие сохраняют прописку в городе, опасаясь лишиться доступа к определенным благам), но игнорировать которое

дальше невозможно. Аналогичный путь уже проходят исследования дачных миграций и дачников как таковых. Долгое время сезонные миграции, не охватываемые официальной статистикой, не попадали в фокус научных исследований. Но постепенно дачи стали интересовать все больший круг исследователей, географы изучают как их пространственное распространение [Махрова и др., 2016; Щепеткова, 2018], так и влияние дач на различные территории [Между домом..., 2016].

Современные исследования переезда из города в село также зачастую сфокусированы на влиянии новых переселенцев на окружающих сельских жителей или на сельскую местность в целом. Об этом же активно писали и зарубежные авторы еще 10–15 лет назад, когда к публикациям о контрурбанизации стали стремительно добавляться статьи о сельской джентрификации. Отдельные авторы [Phillips, 2010] даже писали о том, что оба эти понятия можно использовать как синонимы. Термин «джентрификация» за рубежом пришел в литературу о сельской местности из городских исследований [Smith, Derksen, 2002]. Он появился еще в 1960-х гг. и означал социальную трансформацию городских микрорайонов из-за замещения местных жителей с низкими доходами представителями среднего класса, что нередко ведет к ревитализации отдельных кварталов. В российскую урбанистику термин пришел еще в 2000-х гг. [Махрова, Татаринцева, 2006] и активно используется и сейчас [Вавилова, Кузнецов, 2020; Махрова, Голубчиков, 2012]. В работах, посвященных сельской местности, этот термин в России еще не использовался.

Перенос знакомого всем урбанистам термина джентрификация в исследования сельских территорий видится авторам [Stockdale, 2010] уместным и даже необходимым, поскольку в сельскую местность, как правило, переезжают горожане с более высоким материальным положением, чем местные жители, и постепенно они меняют сельские территории, делая их более комфортными и привлекательными для новых переселенцев.

Обобщая публикации о сельской джентрификации в статьях, написанных на базе исследований в зарубежной Европе [Solana, 2010; Carriso et al., 2019] и США [Nelson et al., 2010], можно выделить ряд наиболее характерных для этого явления черт и процессов: снижение темпов депопуляции сельских территорий, изменение рынка недвижимости и рост цен, благоустройство сельских населенных пунктов, деаграризация, новые культурные инициативы и/или изменения сельского образа жизни как такового. И термин, и само явление сельской джентрификации постоянно обсуждается в зарубежных исследованиях. неизбежно приходится говорить о

конflikте, условно, коренного и пришлого населения, о классовом расслоении, об утрате локальной идентичности, хотя, казалось бы, повышение материального благосостояния и улучшение сельской среды – явления сугубо положительные.

Так и российские авторы, осмысливающие перемещение жителей городов в сельскую местность, ищут наиболее адекватные термины и их оценки. В частности, антропологи [Мельникова, 2020] рассуждают о том, можно ли рассматривать этот процесс через призму колонизации или неокolonизации, присвоения села горожанами. Терминология колонизации использовалась и экономикогеографами [Аверкиева, Нефедова, 2016] в описании дачной экспансии столичных жителей в Костромскую область, где упоминается и о том, что сами сезонные жители костромских сел называли себя колонистами, а свои деревни – колонией.

Один из ярких примеров тотального замещения местного населения городскими переселенцами можно наблюдать в Борисоглебском районе Ярославской области, в окрестностях села Ивановское. Здесь переехавший из Москвы педагог Владимир Мартышин создал на базе малокомплектной сельской школы «Школу целостного развития», которая стала привлекать учеников не столько из окрестной сельской местности, сколько из городов, в первую очередь, из Москвы. Вместе с детьми в Ивановское-на-Лехте стали переезжать родители. Сам идеолог движения оценивает поток переехавших за 20 лет примерно в 400 человек, «... в этой деревне у местных осталось дома четыре – все остальные переехавшие. Наверное, двадцать домов уже построено заново. В соседней деревне семь домов построили... В деревнях благоустраиваются детские площадки, сажаются деревья, аллеи, т. е. села преобразуются» [Овчинцева, 2021, с. 305]. Как вернее охарактеризовать этот процесс: сельской джентрификацией, которую чаще рассматривают как положительное явление, или неокolonизацией, которой однозначной оценки не дать, – пока неясно.

Этот же пример иллюстрирует еще одну сторону преобразования сельской местности переехавшими из городов жителями: отказ от сельского хозяйства и углубление функциональной трансформации сельских территорий, торжество постаграрного [Щепанская, 2021], постпродуктивистского подхода. Неверно утверждать, что переселенцы из городов полностью отказываются от сельского хозяйства. Более того, отдельные авторы [Звягинцев, Неуважова, 2015], опираясь на проведенные с переселенцами интервью, пишут о том, что преимущественно переезжают те, кто планирует заняться подсобным хозяйством (хотя здесь кроется большой вопрос, можно ли нетоварное подсобное хозяйство отно-

силь к сельскому хозяйству как категории занятости или вида экономической деятельности) или стать фермером. Горожане действительно нередко пробуют себя в сельском хозяйстве, переезжая в сельскую местность, но далеко не всегда это является их основным видом деятельности и/или дохода, зачастую аграрное производство рассматривается ими как получение нового опыта, как временный способ улучшить материальное положение, как компонент нового образа жизни.

В рамках данного исследования, которое опиралось на полевые наблюдения за несколькими сельскими населенными пунктами на протяжении четырех лет, хочется проверить, присущи ли депопулирующей сельской местности российского Нечерноземья черты сельской джентрификации, выявить аспекты взаимного влияния переехавших горожан и сельского окружения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Данное исследование опирается на набор подходов и методов, принятый в социально-экономической географии. В рамках полевых исследований проводились натурные наблюдения, экспертные полуструктурированные интервью с представителями администрации Верховажского муниципального района (три интервью) и с сотрудниками четырех администраций (пять интервью) сельских поселений. Непосредственно с переселенцами в сельскую местность из городов было проведено шесть полуструктурированных глубинных интервью. Проводился анализ публикаций в социальных сетях (страницы респондентов и других бывших горожан Верховажья в социальных сетях «ВКонтакте» и Facebook) и в СМИ (газета «Верховажский вестник», паблик «Подслушано в Верховажье» в сети «ВКонтакте»), а также отдельные материалы из региональных и федеральных СМИ), освещающих различные проекты и мероприятия, инициированные новыми сельскими жителями.

Верховажский район Вологодской области, выбранный как полигон для исследований, не особенно выделяется на фоне других районов Вологодской области и староосвоенного Нечерноземья [Староосвоенные районы..., 2021] в целом. Как и многие другие, он переживает постепенное сокращение населения (за постсоветский период он, как и многие сельские районы этой полосы, потерял около $\frac{1}{3}$ населения, сейчас на его территории проживают около 12 тыс. человек) и трансформацию экономики, которая базируется на сельском и лесном хозяйстве. Обе отрасли проходят постепенную модернизацию, что приводит к небольшому росту объемов производства и сокращению численности

занятых. В сельском хозяйстве действуют 22 хозяйства разных форм собственности, что немало для одного сельского муниципального района. В Вологодской области район известен как один из последних льносеющих, а в целом он имеет характерную для большинства районов Нечерноземья молочную специализацию. В лесном хозяйстве действует много небольших предпринимателей, занимающихся лесозаготовками и первичной деревообработкой. В большинстве сельских кустов есть небольшие пилорамы, изредка встречаются предприниматели, занимающиеся деревянным домостроением.

Специфика его географического положения – это федеральная трасса М8, которая пересекает район с юга на север. Трасса проложена в стороне от основной полосы расселения в долинах рек Вага, Пежмы и Кулой, в районе почти нет деревень, которые находились бы непосредственно на шоссе. К каждому сельскому кусту ведет неасфальтированный участок дороги длиной в несколько километров, что не привлекает транзитный транспорт. В то же время трасса сильно увеличивает доступность района, она обслуживается круглогодично и позволяет легко добираться как в Вологду (оттуда, при необходимости, в Москву или Санкт-Петербург), так и в соседний Вельск (Архангельская область) – живой малый город, южную столицу обширного северного региона.

Большинство сел и деревень Верховажского района, не считая шести советских лесопунктов, можно отнести к историческим, они гармонично вписаны в природные ландшафты в долинах рек. Богатая история и живописное расположение при хорошей транспортной доступности – немаловажные факторы, которые притягивают в Верховажский район переселенцев из городов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

«Новые деревенские» как носители традиционной культуры. Изначально Верховажье привлекло внимание благодаря неординарному мероприятию, ежегодно проходящему в одной из деревень, – сельскому многоборью с трогательным названием «Лимпияда в Липках». Изначально в формате «лимпияды» стал проходить День села, позже она стала крупным мероприятием районного масштаба. К участию в соревнованиях – колке дров, косье и метанию стогов, растопке самовара, ношению воды коромыслом, выпечке блинов на костре и др. – готовились команды из разных сельских поселений и даже райцентра, который стремительно приобретает черты малого города, оставаясь крупным селом.

Организаторы фестиваля – жители Липок, которые не являются коренными верховажцами. Они

переехали в Липки из Мурманска уже в пенсионном (хотя и молодом) возрасте, организовали народный ансамбль «Радоница» и включились в сельскую жизнь. Как оказалось, среди участников народного коллектива есть и бывший житель Новодвинска (промышленного города в Архангельской области), который в Липках известен активной жизненной позицией. Он организовал сельскую автошколу и обучал всех желающих вождению, баллотировался на пост главы сельского поселения и всегда принимал участие в разных мероприятиях своего сельского куста. Он не имеет родственников в районе и выбирал Верховажье и Липки как место жительства на пенсии, исходя из собственных представлений о комфортности территорий.

Многие культурные события, особенно связанные с народными традициями, организованы не коренными жителями, а теми, кто переехал в Верховажский район из разных городов. Среди них есть как те, кто все же имеет связь с районом, так и те, кто оказался на Верховажье случайно. Так, мастер-гончар, переехавшая в Верховажье из Вологды уже в пенсионном возрасте, занялась возрождением местной Сомовской керамики. С районом ее связывает то, что из Липецкого куста была родом ее мама, хотя она сама родилась уже в Вологде. Мастер переехала не в родную деревню, а в районный центр – село Верховажье, где стала работать в Центре традиционной народной культуры и преподавать гончарное дело, а также занялась восстановлением искусства свободной кистевой росписи.

В соседней с райцентром деревне Рогачиха уже почти 20 лет живет семья горожан с сибирско-московско-петербургскими корнями, на какое-то время ставших основными носителями традиционной крестьянской культуры в Верховажье. В начале 2000-х гг. они переехали в старинный крестьянский дом с аутентичным интерьером, часть помещений используя как сельский гостевой дом и музей крестьянского быта. Они принимали и своих знакомых, и высокопоставленных гостей из областной администрации. Дом стал визитной карточкой Верховажья, пока не сгорел в 2016 г. Отстраивать заново крестьянский дом они не стали, но вместе с местным предпринимателем решили построить сельскую гостиницу и маленький гостевой дом.

Семья горожан из Рогачихи выполняет важную функцию для этой территории, привлекая новых поселенцев благодаря обширным социальным связям. Так, несколько домов в этой же деревне выкуплены переехавшими из Москвы религиозными эскапистами (это явление – не редкость для сельской местности [Щепанская, 2020]), которые хотели создать здесь небольшую общину, но пока живут тут только сами, ожидая единомышленников. В других

деревнях появилось несколько семей, переехавших в Верховажский район из общины Германа Стерлигова. Жители Рогачихи поддерживают общение с большинством горожан, обосновавшихся в этом районе, не теряя связи с двумя столицами, где живут их старшие дети, а младший сын женился на жительнице Верховажья и открыл в 2021 г. первый в районном центре пункт выдачи заказов одного из федеральных маркетплейсов.

В Верховажье есть представители религиозных течений, не входящие ни в какие общины и не всегда поддерживающие общение друг с другом. Наиболее яркий среди них – старообрядец Феодосий Травин, который привлекает к себе внимание не столько нарочито архаичной внешностью, сколько владением уже почти утраченными даже на Русском Севере навыками плотницкого и шорного дела. Он держит лошадей, собирает музей старинной конской упряжи и повозок, сам реставрирует и мастерит сани и разные виды экипажей. Феодосий – бывший москвич с высшим образованием. После нескольких лет перемещений по Русскому Северу он переехал в Верховажье в 2008 г., с тех пор успел привести в порядок хозяйство, создать семью. Вместе с Анатолием Ехаловым, который инициировал «Лимпиаду в Липках», Феодосий организовал региональный фестиваль Живых Ремесел.

Арт-резиденция в Шелотах, или Что может социальный капитал. Одной из новых достопримечательностей Верховажского района стала дровяная печь для обжига керамики «Вага». Она была построена в 2020 г., и своим появлением обязана переселенцам из городов. В 2016 г. в Шелота – куст деревень на юге Верховажского района, образующий отдельное и самое маленькое в районе сельское поселение, – из Санкт-Петербурга переезжает бухгалтер, увлеченный керамикой. После переезда она начала работу в администрации сельского поселения, активно включившись в жизнь села. Наряду с участием и подготовкой традиционных сельских мероприятий она стала проводить и свой праздник – ежегодный керамический фестиваль, куда приглашала не только своих друзей-керамистов из Санкт-Петербурга и Вологды, но и зарубежных гостей. В то же время были приглашены и все жители Шелот, на мастер-классы и братчину – вечернюю трапезу на открытом воздухе около храма, поэтому праздник воспринимался как общий, сельский. Для размещения гостей фестиваля в 2018 г. по инициативе его организатора был открыт гостевой дом.

Постепенно работа в администрации и собственные проекты перестали приносить ожидаемые результаты, потому что средства местных бюджетов очень скромные даже при наличии различных механизмов инициативного бюджетирования. В 2019 г.

создан НКО «Фестиваль» для расширения деятельности, связанной с керамическими фестивалями. НКО получала небольшие средства на проведение гончарного фестиваля. В 2020 г. удалось выиграть грант на строительство уникальной печи для дровяного обжига керамики. Печь стала центром притяжения керамистов со всей России, появились идеи создания творческой резиденции. В 2021 г. на средства нового гранта были построены настилы для палаточного лагеря, подведены инженерные коммуникации и созданы бытовые условия для гостей-керамистов (баня, душ, летняя кухня), началось строительство мастерской, чтобы мастера приезжали не только на непосредственно обжиг, но и могли создать новые изделия, обменяться опытом. В том же году началось сотрудничество с Санкт-Петербургской художественно-промышленной академией имени А.Л. Штиглица, в Шелота студенты приезжали на летнюю практику.

В 2021 г. Арт-резиденция начала свою полноценную работу, и за летне-осенний сезон приняла шесть смен керамистов и группу студентов из Санкт-Петербурга. Каждую смену мастера в течение недели живут в Шелотах – в гостевом доме в центре села или в палатках. Питание можно организовать самостоятельно, но обычно гости предпочитают «деревенский кейтеринг» (выездную организацию питания) – еду из сельской столовой или приготовленную кем-то из местных жителей, кто готов сотрудничать с арт-резиденцией. Помимо предоставления питания керамистам жители Шелот проводят для них мастер-классы по народным промыслам.

В то же время и мастера-керамисты оживляют село не только путем потребления услуг и пространства. Гости, посещающие арт-резиденцию, сами нередко готовы проводить мастер-классы или открытые лекции для интересующихся жителей села. Так, благодаря петербургским геологам в Шелотском краеведческом музее появилась палеонтологическая экспозиция, в 2021 г. в сельском доме культуры гости устраивали лекцию по геологии и палеонтологии. Благодаря социальному капиталу хозяйки резиденции нашлись волонтеры и меценаты, которые отремонтировали кровлю в Троицком храме, приобрели колокола для небольшой звонницы, создали витраж для западного окна. Другая команда волонтеров разработала логотип и подготовила информационные буклеты о селе, создала страничку о сельском кусте для Википедии, напечатала серию открыток с картинами художников, которые живут в окрестностях или приезжают в Верховажье на пленэр.

Еще один «спин-офф» (побочный продукт) арт-резиденции – это фестиваль деревенского кино

«Печка», прошедший в Шелотах в 2021 г. и организованный режиссерами из Санкт-Петербурга. Фестиваль посвящен фильмам о сельской местности и организован режиссерами игрового кино и кинодокументалистами из России и соседних стран. В 2022 г. намечен следующий фестиваль, а также начал работу кинокампус «Северяне», который объединит начинающих режиссеров-документалистов из разных районов Вологодской области под руководством специалистов для создания нового документального полнометражного фильма «о деревенских жителях – хранителях традиций и культуры северных деревень» [Первый в России документальный кинокампус...].

Помимо культурных проектов участникам арт-резиденции время от времени приходится решать и насущные проблемы села. Так, в конце 2019 г. под угрозой закрытия оказался сельский магазин РайПО из-за дефицита владеющих навыками бухгалтерии 1С работников. В итоге в Шелота из Петербурга переехал сын хозяйки резиденции и вышел на работу в магазин, параллельно обучая нескольких жителей ведению электронной бухгалтерии, чтобы постепенно передать им рабочее место. С 2020 г. он остался жить в Шелотах, сохраняя удаленную работу в Петербурге. Пока он работал в магазине, наладил бук-кроссинг и устроил пункт раздельного сбора мусора, был создан сельский секонд-хенд, куда поставляли одежду петербургские друзья.

Черты сельской джентрификации на Верховажье. Рассмотрев случай Верховажского района, хочется соотнести выявленные черты с теми, которые выделяют зарубежные коллеги, говоря о сельской джентрификации. В обобщенном виде основными чертами являются:

- вторичное заселение и/или замещение местного населения переезжающими из городов;
- оживление рынка сельской недвижимости и рост цен;
- улучшение качества жилого фонда и благоустройство сельских территорий;
- усиление пост-аграризации сельской местности;
- изменения в сельском образе жизни.

Рассмотрим, как эти черты проявляются в изученном районе.

Первый процесс – «репопуляция» – в каком-то виде действительно происходит. Он почти не поддается количественной оценке, поскольку новые сельские жители, подобно сезонным дачникам, далеко не всегда имеют даже временную регистрацию в сельской местности. А даже если бы и имели, все равно приток горожан не перекрыл бы естественную и миграционную убыль [Карачурина, Мкртчян, 2016], которая идет своим чередом. В то же время в сельской местности идут внутренние миграции

онные процессы (*«сельская местность подвижна сейчас, как и всегда»* [Bell, Osti, 2010]), и на фоне общей мобильности бывшие горожане не всегда выделяются контрастно. Но они есть, переезжают представители разных поколений, семьями и поодиночке, из столичных городов, из регионов Севера, в первую очередь Архангельской и Мурманской областей, из городов и районов Вологодской и соседних областей и даже из удаленных от Верховажья регионов.

Горожане действительно оживляют рынок сельского жилья. Так, в Шелотах хозяйка арт-резиденции выкупила расположенный недалеко от своего дома для оборудования второго гостевого дома. Другой дом в той же деревне куплен петербургскими режиссерами для своих мероприятий, еще два дома куплены горожанами в расположенных на периферии сельского куста деревнях. Горожане покупали дома и перебирались в село и до начала работы арт-резиденции. Так, в этом же сельском поселении находится артель реставраторов объектов деревянного зодчества, и мастера, приехавшие из городов, покупают дома или строят новые.

Вопрос влияния переезда горожан на цены на недвижимость очень неоднозначный. С одной стороны, программа материнского капитала уже привела к росту цен на дома (*«у нас хоть и деревня, но меньше, чем за маткапитал, дома не продают»* – из интервью с главой Чушевицкого сельского поселения). С другой стороны, цены на сельские дома очень варьируют, а предложение весьма ограниченное. Несмотря на депопуляцию свободных домов в сельской местности немного: какие-то используются сезонно, какие-то – эпизодически или даже не используются, но сохраняются в собственности как фамильные. Даже сами сельские жители нередко имеют несколько домов: в центре поселения и в деревнях на периферии, у каждого из которых есть свое функциональное значение. В то же время интерес горожан к сельской местности способствует небольшим подвижкам на рынках недвижимости: в тех местах, где есть переселенцы, как правило, больше оформленных домов, а главы сельских поселений составляют реестры пустующих домов, ищут хозяев или наследников.

В зарубежной практике улучшение качества жилого фонда и благоустройство сельских территорий в рамках сельской джентрификации происходило из-за изменения состава населения. На место сельских жителей приезжали бывшие горожане – представители среднего класса с более высокими доходами, которые могли инвестировать в жилье и среду. Само по себе понятие среднего класса в России размыто, поэтому не очень понятно, можно ли отнести к нему переезжающих в село горожан. Новые жи-

тели деревни имеют очень разные доходы и разные представления о благоустройстве и обустройстве жилья. Опираясь на натурные наблюдения в Верховажье, можно отметить, что самые новые и благоустроенные дома в сельской местности чаще не у горожан, которые с большим уважением (хотя и не всегда) относятся к культурному ландшафту вологодской деревни, поэтому они сохраняют бревенчатые избы или строят новые дома из бруса. А самые новые и хорошо оборудованные дома, облик которых иногда диссонирует со сложившейся застройкой – у сельской элиты, в первую очередь у тех, кто связан с лесным бизнесом, реже – у фермеров и руководящего звена местных сельскохозяйственных предприятий.

Пример Верховажья показывает, что горожане в сельской местности редко вовлекаются в аграрное производство. Даже простые огороды есть далеко не у всех, не говоря уже об идеях стать фермерами или найти работу на местных сельскохозяйственных предприятиях. Даже те, кто пробует разводить пчел или откармливать гусей, ищут в этом новый опыт и иногда решают срочные финансовые вопросы, но не стремятся сделать это основным источником дохода. С одной стороны, переезжая в сельскую местность неплодородного Нечерноземья, было бы странно искать аграрной занятости. С другой стороны, не только объективные природные ограничения препятствуют аграрной деятельности переселенцев. Новые сельские жители столь же неоднородны, как и местные, которые также далеко не все стремятся к сельскому хозяйству даже на уровне обеспечения личных потребностей. Тем не менее наиболее коммерчески успешные начинания новых горожан, как правило, не связаны с сельским хозяйством.

Наиболее дискуссионным остается вопрос влияния новых жителей села на общее течение сельской жизни, на то самое «сельское», отличное от «городского». Грань между селом и городом и так активно стирается по всему миру путем клеточной глобализации [Покровский, Нефедова, 2013]. В то же время и сельские жители оказывают влияние на бывших горожан. А некоторые переселенцы (в первую очередь, религиозные эскаписты) изначально были настроены не на преобразование села, а на архаизацию своих повседневных практик. Возрождение традиционной культуры (фольклора, народных росписей, керамики, ткачества) силами горожан – явление, которое трудно называть модернизацией села или изменением образа сельской жизни. Но примеры обучения сельских жителей вождению, овладения компьютерной грамотностью и др. говорят о том, что горожане дополняют сложившиеся практики новыми.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование показывает, что описанные в зарубежной литературе процессы сельской джентрификации присущи и российской сельской местности. Горожане немного замедляют темпы сельской депопуляции и меняют социальный состав сельских территорий. Их присутствие в сельской местности оживляет локальные рынки недвижимости. Это ведет как к росту цен, так и к росту налоговой базы местных бюджетов, поскольку живой рынок недвижимости стимулирует постоянно проживающих сельских жителей оформлять свои дома и участки (и, соответственно, платить земельный и имущественный налоги). Горожане, по крайней мере в Нечерноземье, редко стремятся иметь товарное сельскохозяйственное производство. Хотя двое из шести респондентов имеют скот или птицу и занимаются огородом, они не считают, что стремились в сельскую местность для ведения подсобного хозяйства, оно не служит для них основным источником дохода. Аналогично и с другими бывшими горожанами Верховажья, информация о которых была получена из СМИ.

Если в зарубежной практике сельской джентрификации чаще оказывается, что новые жители деревни – бывшие горожане – оказывают сильное влияние на местных жителей, меняя сельские традиции и нередко разрушая сельские сообщества, то в обследованной местности в России влияние новых и старых жителей деревни взаимно. Горожа-

не показывают новые навыки, помогают сельским жителям шире осваивать информационные технологии. Но и сельские жители влияют на горожан, многие переехавшие говорят об архаизации повседневных привычек и даже внешнего вида после переезда в деревню. Примечательно, что именно горожане стремятся сохранять и возрождать традиционную культуру села – народные песни, ремесла. Аналогичные наблюдения были у Т.Г. Нефедовой в Костромской области [Нефедова, 2008].

Никакие попытки описать влияние бывших горожан на сельскую местность в терминологии существующих в науке подходов все равно не позволят создать целостную картину современных сельско-городских взаимодействий. В сельском Нечерноземье, столь уязвимом и теряющем жителей десятилетия подряд, любые новые процессы всегда проявляются очень рельефно. Пример Верховажского района показывает, что горожане не столько ускоряют модернизацию социальной жизни села, сколько возрождают и сохраняют народные традиции, стремятся не противопоставить себя сельскому миру Русского Севера, а стать если не его частью, то дополнением. Горожане в верховажских деревнях, как и в случае описанной в европейской литературе сельской джентрификации, создают новую среду, которая притягивает новых переселенцев и иногда удерживает местных жителей от принятия решения об отъезде.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-17-00112.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аверкиева К.В., Нефедова Т.Г. Дачная «колонизация» российской глубинки. Пример Костромской области // Мир России. Социология. Этнология. 2016. Т. 25. № 1. С. 103–128.
- Вавилова Т.Я., Кузнецов И.В. Джентрификация городских территорий, расположенных вблизи железных дорог и вокзалов, в интересах устойчивого развития // Архитектура и современные информационные технологии. 2020. № 4(53). С. 191–203.
- Горожане в деревне. Социологические исследования в российской глубинке: Дезурбанизация и сельско-городские сообщества: коллективная монография / сост. и науч. ред. В.И. Ильин, Н.Е. Покровский. М.: Университетская книга, 2016. 404 с.
- Жаднова Е.В. Методологические подходы к изучению взаимодействия города и деревни // Историческая и социально-образовательная мысль. 2014. № 1. С. 194–199.
- Звягинцев В.И., Неуважаева М.А. Переселенцы из города в сельскую местность: феномен «обратной миграции» в современной России // Мир России. Социология. Этнология. 2015. Т. 24. № 1. С. 101–135.
- Карачурина Л.Б., Мкртчян Н.В. Роль миграций в усилении контрастов расселения на муниципальном уровне в России // Известия РАН. Сер. геогр. 2016. № 5. С. 46–59.
- Махрова А.Г., Голубчиков О.Ю. Российский город в условиях капитализма: социальная трансформация внутригородского пространства // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2012. № 2. С. 26–31.
- Махрова А.Г., Медведев А.А., Нефедова Т.Г. Садово-дачные поселки горожан в системе сельского расселения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 2. С. 64–74.
- Махрова А.Г., Татаринцева А.А. Развитие процессов джентрификации и реконструкция городской среды центра Москвы в постсоветский период // Региональные исследования. 2006. № 3(9). С. 28–42.
- Между домом... и домом. Возвратная пространственная мобильность России / под ред. Т.Г. Нефедовой, К.В. Аверкиевой, А.Г. Махровой. М.: Новый Хронограф, 2016. 504 с.
- Мельникова Е.А. Деревня в городских проекциях россиян // Социологическое обозрение. 2020. № 6. С. 5–11.

- Нефедова Т.Г. Российская глубинка глазами ее обитателей // Угорский проект: экология и люди ближнего Севера / ред. Н.Е. Покровский. М.: Сообщество профессиональных социологов, 2008. С. 98–120.
- Нефедова Т.Г., Покровский Н.Е., Трейвиш А.И. Урбанизация, дезурбанизация и сельско-городские сообщества в условиях роста горизонтальной мобильности // Социологические исследования. 2015. № 12(380). С. 60–69.
- Овчинцева Л.А. Новые селяне: мотивы и факторы переселения из города в сельскую местность // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Социология. 2021. Т. 21. № 2. С. 305.
- Покровский Н.Е., Нефедова Т.Г. «Клеточная глобализация» и тенденции в сельских сообществах ближнего севера России // Социологические исследования. 2013. № 4. С. 13–23.
- Покровский Н.Е., Макишанчикова А.Ю., Никишин Е.А. Обратная миграция в условиях пандемического кризиса: внегородские пространства России как ресурс адаптации // Социологические исследования. 2020. № 12. С. 54–64.
- Староосвоенные районы в пространстве России: история и современность / сост. и науч. ред. Т.Г. Нефедова, ред. А.В. Старикова. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2021. 379 с.
- Щепанская Т.Б. Домик-в-деревне для бегства и выживания: утопия сельской автономии в популярной футурологии катастроф // Этнографическое обозрение. 2020. № 6. С. 70–87.
- Щепанская Т.Б. К динамике постаграрности: ресайклинг сельской зверофермы в Республике Карелии // Словесность и история. 2021. № 2. С. 108–124.
- Щепеткова И.О. Территориальная организация садоводческих образований в пригородах Перми // Известия РАН. Серия географическая. 2018. № 4. С. 46–54.
- Bell M., Osti G. Mobilities and ruralities: an introduction, *Sociologia Ruralis*, 2010, vol. 50(3), p. 199–204.
- Carrsio G., Magnani N., Osti G. A mild rural gentrification driven by tourism and second homes. Cases from Italy, *Sociologia Urbana e Rurale*, 2019, p. 29–45.
- Nelson P., Oberg A., Nelson L. Rural Gentrification and Linked Migration in the United States, *Journal of Rural Studies*, 2010, vol. 26, p. 343–352.
- Phillips M. Counterurbanisation and rural gentrification: an exploration of the terms, *Population, Space and Place*, 2010, vol. 16, p. 539–558.
- Solana M. Rural gentrification in Catalonia, Spain: A case study of migration, social change and conflicts in the Empordanet area, *Geoforum*, 2010, p. 508–517.
- Stockdale A. The diverse geographies of rural gentrification in Scotland, *Journal of Rural Studies*, 2010, vol. 26(1), p. 31–40.
- Smith N., Derksen J. Urban regeneration: Gentrification as global urban strategy, Stan Douglas: Every Building on 100 West Hastings, 2002, p. 62–95.
- Электронные ресурсы*
- Первый в России документальный кинокампус. URL: <https://northernpeople.ru> (дата обращения 8.05.2022).
- Рурбанизация по-русски: как выгнать россиян из городов? URL: <https://www.cottage.ru/articles/focus/209338.html> (дата обращения 8.05.2022).
- Сахнин А. Из столицы в станицу: зачем москвичи массово переезжают в деревенскую глушь? // Москвич Magazine, 12.10.2021. URL: https://moskvichmag.ru/gorod/iz-stolitsy-v-stanitsu-zachem-moskvichi-massovo-pereezhayut-v-derevenskuyu-glush/?fbclid=IwAR2nOd1Bx7qSYbUXFMt6rra3HJVpGD-LUP1_y59nck83A87Vo5eWNAa4wI (дата обращения 8.05.2022).

Поступила в редакцию 15.03.2022

После доработки 20.04.2022

Принята к публикации 13.05.2022

RURAL GENTRIFICATION IN THE NON-CHERNOZEM REGION OF RUSSIA

K.V. Averkieva

*Institute of Geography RAS, Department of Socio-Economic Geography,
Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: k_averkieva@igras.ru*

Against the background of ongoing migration outflow of rural residents to cities, the process of city dwellers transfer to rural areas is hardly noticeable, particularly if they do not change their city registration or live in rural areas seasonally. However, the influx of new residents has a great impact on rural areas, since city people have rich social capital and other resources to transform rural areas. Using the example of Verkhovazhsky district, where field studies have been conducted for several years, it is shown how city dwellers are involved in various types of rural economic and social life or offer new types of activities. Villages along the Vaga River valley host a base for restorers of wooden architecture, a center for wood-burning ceramic products, a museum of ancient horse harness and other objects created by city dwellers. At the same time, former city people also work at ordinary objects of rural social infrastructure, such as schools, cultural centers, shops, rural administrations, offering practices accepted in the cities, e.g. public lectures, book-crossing, separate garbage collection, rural second-hand, to rural residents.

Keywords: rural gentrification, rural-urban migration, Non-Chernozem region, Vologda region

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 21-17-00112).

REFERENCES

- Averkiova K.V., Nefedova T.G. Dachnaya "kolonizatsiya" rossiiskoi glubinki, primer Kostromskoi oblasti [Dachas and the Colonization of Rural Areas by Urban Citizens in Russia: the case of the Kostroma Region], *Mir Rossii. Sotsiologiya. Etnologiya*, 2016, vol. 25, no. 1, p. 103–128. (In Russian)
- Bell M., Osti G. Mobilities and ruralities: an introduction, *Sociologia Ruralis*, 2010, vol. 50(3), p. 199–204.
- Carrosio G., Magnani N., Osti G. A mild rural gentrification driven by tourism and second homes. Cases from Italy, *Sociologia Urbana e Rurale*, 2019, p. 29–45.
- Gorozhane v derevne. Sotsiologicheskie issledovaniya v rossiiskoi glubinke: Dezurbanizatsiya i sel'sko-gorodskie soobshchestva [Citizens in the village. Sociological research in the Russian hinterland: deurbanization and rural-urban communities], V.I. Il'in, N.E. Pokrovskii (eds.), Moscow, Universitetskaya kniga, 2016, 404 p. (In Russian)
- Karachurina L.B., Mkrtchyan N.V. Rol' migratsii v usilenii kontrastov rasseleniya na munitsipal'nom urovne v Rossii [Role of Migration in Enhancing Contrasts of Settlement Pattern at Municipal Level in Russia], *Izvestia RAN, Ser. Geogr.*, 2016, no. 5, p. 46–59. (In Russian)
- Makhrova A.G., Golubchikov O.Yu. Rossijskij gorod v usloviyakh kapitalizma: sotsialnaya transformatsiya vnutri-gorodskogo prostranstva [Russian City under Capitalism: Social Transformation of Intra-City Space], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2012, no. 2, p. 26–31. (In Russian)
- Makhrova A.G., Medvedev A.A., Nefedova T.G. Sadovodachnye poselki gorozhan v sisteme sel'skogo rasseleniya [Gardening and Dacha Communities of Urban Dwellers in the Rural Settlement System], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 2, p. 64–74. (In Russian)
- Makhrova A.G., Tatarintseva A.A. Razvitie protsessov dzhentrifikatsii i rekonstruktsiya gorodskoy sredy tsentra Moskvy v postsovet'skiy period [Development of gentrification processes and reconstruction of the urban environment of the center of Moscow in the post-Soviet period], *Regionalnye issledovaniya*, 2006, no. 3(9), p. 28–42. (In Russian)
- Mel'nikova E.A. Derevnja v gorodskikh proektsiyakh rossiyan [The Village in Urban Projections of Modern Russians], *Sotsiologicheskoe obozrenie*, 2020, no. 6, p. 5–11. (In Russian)
- Mezhdum domom... i domom. Vozvratnaya prostranstvennaya mobil'nost' Rossii [Between home and... home. Reverse spatial mobility in Russia], T.G. Nefedova, K.V. Averkieva, A.G. Makhrova (eds.), Moscow, Novyi Khronograf Publ., 2016, 504 p. (In Russian)
- Nefedova T.G. [Russian outback through the eyes of its inhabitants], *Ugorskiy proyekt: ekologiya i lyudi bliznego Severa* [Ugory project: ecology and people of the Near North], N.E. Pokrovskiy (ed.), Moscow, Soobshchestvo professional'nykh sotsiologov, 2008, p. 98–120. (In Russian)
- Nefedova T.G., Pokrovskii N.E., Treivish A.I. Urbanizatsiya, dezurbanizatsiya i sel'sko-gorodskie soobshchestva v usloviyakh rosta gorizontnoi mobil'nosti [Urbanization, Deurbanization and Rural-Urban Communities in Conditions of Growth of Horizontal Mobility], *Sotsiologicheskie issledovaniya*, 2015, no. 12(380), p. 60–69. (In Russian)
- Nelson P., Oberg A., Nelson L. Rural Gentrification and Linked Migration in the United States, *Journal of Rural Studies*, 2010, vol. 26, p. 343–352.
- Ovchintseva L.A. Novye selyane: motivy i faktory peresele-niya iz goroda v sel'skuyu mestnost' [New villagers: motives and factors for moving from urban to rural areas], *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov, Seriya: Sotsiologiya*, 2021, vol. 21, no. 2, p. 305. (In Russian)
- Phillips M. Counterurbanisation and rural gentrification: an exploration of the terms, *Population, Space and Place*, 2010, vol. 16, p. 539–558.
- Pokrovskii N.E., Makshanchikova A.Yu., Nikishin E.A. Obratnaya migratsiya v usloviyakh pandemicheskogo krizisa: vnegorodskie prostranstva Rossii kak resurs adaptatsii [Reverse migration in pandemic crisis: Out-of-town spaces of Russia as an adaptation resource], *Sotsiologicheskie issledovaniya*, 2020, no. 12, p. 54–64. (In Russian)
- Pokrovskii N.E., Nefedova T.G. "Kletochnaya globalizatsiya" i tendentsii v sel'skikh soobshchestvakh blizhnego severa Rossii ["Cellular Globalization" and Trends in Rural Communities of the Near North of Russia], *Sotsiologicheskie issledovaniya*, 2013, no. 4, p. 13–23. (In Russian)
- Shchepanskaya T.B. Domik-v-derevne dlya begstva i vy-zhivaniya: utopiya sel'skoi avtonomii v populyarnoi futurologii katastrof [House-in-the-Village for Escape and Survival: Utopia of Rural Autonomy in the Popular Futurology of Disasters], *Etnograficheskoe obozrenie*, 2020, no. 6, p. 70–87. (In Russian)
- Shchepanskaya T.B. K dinamike postagrarnosti: resaikling sel'skoi zverofarmy v Respublike Karelii [To the Dynamics of Postagrophy: Recycling of a Rural Farm in the Republic of Karelia], *Slovesnost' i istoriya*, 2021, no. 2, p. 108–124. (In Russian)
- Shchepetkova I.O. Territorial'naya organizatsiya sadovodachnykh obrazovaniy v prigorodakh Permi [Territorial Organization of Garden and Dacha Formations in Perm Suburbs], *Izvestia RAN, Ser. Geogr.*, 2018, no. 4, p. 46–54. (In Russian)
- Solana M. Rural gentrification in Catalonia, Spain: A case study of migration, social change and conflicts in the Empordanet area, *Geoforum*, 2010, p. 508–517.
- Staroosvoennye raiony v prostranstve Rossii: istoriya i sovremennost' [Old-Developed Regions in the Sociogeographic Space of Russia: History and Contemporary], T.G. Nefedova, A.V. Starikova (eds.), Moscow, KMK Publ., 2021, 379 p. (In Russian)
- Stockdale A. The diverse geographies of rural gentrification in Scotland, *Journal of Rural Studies*, 2010, vol. 26(1), p. 31–40.
- Vavilova T.Ya., Kuznetsov I.V. Dzhenifikatsiya gorodskikh territorij, raspolozhennykh vblizi zheleznikh dorog i vokzalov, v interesakh ustojchivogo razvitiya [Gentrification of urban areas near railways and stations for sustainable development], *Arkitektura i sovremennye informatsionnye tekhnologii*, 2020, no. 4(53), p. 191–203. (In Russian)
- Zhadnova E.V. Metodologicheskie podkhody k izucheniyu vzaimodeistviya goroda i derevni [Methodology approaches to studies in urban-area interference with the coun-

- tryside], *Istoricheskaya i sotsial'no-obrazovatel'naya mysl'*, 2014, no. 1, p. 194–199. (In Russian)
- Zvyagintsev V.I. Neuvazhaeva M.A. Pereselentsy iz goroda v sel'skuyu mestnost': fenomen "obratnoi migratsii" v sovremennoi Rossii [Migration from Urban to Rural Areas: the Phenomenon of "Counter-urbanisation" in Modern Russia], *Mir Rossii. Sotsiologiya. Etnologiya*, 2015, vol. 24, no. 1, p. 101–135. (In Russian)
- Web sources*
- Pervyj v Rossii dokumental'nyj kinokampus [Russia's first documentary film campus], URL: <https://northernpeople.ru> (access date 8.05.2022).
- Rurbanizacija po-russki: kak vygnat' rossijan iz gorodov? [Rurbanization in Russian: how to expel Russians from cities?], URL: <https://www.cottage.ru/articles/focus/209338.html> (access date 8.05.2022). (In Russian)
- Sahnin A. Iz stolicy v stanicu: zchem moskvichi massovo pereezzhajut v derevenskuyu glush? [From the capital to the village: why Muscovites are moving en masse to the countryside], URL: https://moskvichmag.ru/gorod/iz-stolitsy-v-stanitsu-zchem-moskvichi-massovo-pereezzhajut-v-derevenskuyuglush/?fbclid=IwAR2nOd1Bx7qSYbUXFMt6rra3HJVpGD-LUP1_y59nck83A-87Vo5eWNAa4wI (access date 8.05.2022) (In Russian)

Received 15.03.2022

Revised 20.04.2022

Accepted 13.05.2022

ЦИТРУСОВОЕ ХОЗЯЙСТВО В ЛЕНКОРАНСКОМ И АСТАРИНСКОМ РАЙОНАХ АЗЕРБАЙДЖАНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Н.А. Пашаев¹, И.И. Алескарзаде²

¹ Институт географии имени акад. Г.А. Алиева АНАН, д-р геогр. наук; e-mail: pasayevneriman@mail.ru

² Ленкоранский государственный университет, докторант; e-mail: i.aleskerzade@yahoo.com

На основе статистических, наблюдательных и анкетных материалов изучена современная территориальная организация выращивания цитрусовых в Ленкоранском и Астаринском административных районах, входящих в Ленкорань-Астаринский экономико-географический район, составлены таблицы и диаграммы. На основе мирового опыта проанализированы природные и экономические факторы, влияющие на развитие цитрусовых в административных регионах и определены меры защиты. Основные цели и задачи были достигнуты путем анализа исторического пути развития традиций, современного состояния и перспектив выращивания цитрусовых в исследуемой области. Выращивание цитрусовых является одним из наиболее востребованных направлений развития аграрного сектора Азербайджанской Республики, изучению которого с экономико-географической точки зрения пока уделяется недостаточно внимания.

Было обнаружено, что процесс посадки и расположение цитрусовых деревьев на исследуемой территории приводит к разной урожайности одного и того же сорта фруктов. Сделан вывод, что урожайность садов бывает выше в хозяйствах, которые расположены на высоте 10–30 м над уровнем моря и при правильном определении места (рекомендуемые места посадки деревьев определены на юго-восточном, восточном и южном склонах гор) и соблюдения расстояния посадки (расстояния между деревьями не менее 3 × 3 м), а также агротехнических правил.

Эффективная территориальная организация выращивания цитрусовых на примере Ленкорань-Астаринского экономико-географического района и выявление проблем в этой области имеют большую научную актуальность.

Ключевые слова: мандарин, лимон, цитрус, территориальная организация, административный округ, регион

DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-129-139

ВВЕДЕНИЕ

В Ленкорань-Астаринском экономико-географическом районе с благоприятными почвенно-климатическими условиями в 1930-х гг. в Астаринском административном районе был основан специализированный лимонно-мандариновый совхоз (ныне в селах Киджаба и Ловайын). В предгорьях Ленкоранского и Астаринского административных районов были посажены цитрусовые плантации, состоящие в основном из мандариновых и лимонных деревьев, и к концу 1940 г. площадь этих садов достигла 150 га [Гулиев, 2018].

Цитрусовым растениям для нормального роста требуется достаточное количество тепла и влаги. Таким образом, для мандаринов требуется 4200°C, а для лимонов – 4300°C [Даньков, 2014]. На равнинных территориях экономико-географического региона общая температура выше 10°C достигает 4000°C. Количество безморозных дней в области составляет 160–320 [Мамедов, 2002], что также позволяет выращивать здесь цитрусовые.

Для нормального роста и развития цитрусовых важно, чтобы среднегодовое количество осадков составляло 2000–2500 мм, а обеспечение водой в течение всего вегетационного периода и месячная

норма в летние месяцы – 100–150 мм. Однако, несмотря на то что во многих странах, где выращивают цитрусовые, количество осадков соответствует норме, в засушливые месяцы требуется искусственное орошение. В Ленкоранском и Астаринском административных районах из-за очень малого количества осадков летом, а также в засушливые весенние и осенние месяцы есть необходимость в искусственном орошении, которое обычно начинается во второй половине мая [Гулиев, 2018; Даньков, 2014]. С мая по конец августа в экономико-географическом районе выпадает всего 150 мм осадков. Из-за этого появляется необходимость в искусственном орошении в эти месяцы [Мусейбов, 1998]. Водные ресурсы Ленкоранского природного района были оценены в 1,63 км³ З.Б. Агаевым в 2007 г. методом общего водопотребления [Агаев, 2007]. В Ленкоранском и Астаринском административных районах для искусственного орошения было построено несколько водохранилищ. Одно из них, Ханбуланчайское, расположено на высоте 74 м над уровнем моря в Ленкоранском административном районе, введено в эксплуатацию в 1976 г. Объем воды в водохранилище составляет 52 млн м³, площадь орошаемых его водой земель достигает 22 000 га.

Расход воды на орошение составляет 2,2 и 8,8 м³/с и производится соответственно по правому и левому берегам Ханбуланчайского канала протяженностью 7,8 и 8,2 км. Наполнение водоема начинается в конце вегетационного периода и продолжается до мая. К концу августа водохранилище практически полностью используется. В Астаринском административном районе расположено водохранилище Ловайын, через которое протекают реки Ловайын и Сихару. Площадь орошаемых земель водохранилища с общей площадью 1,27 км² составляет 1700 га [Алиева, 2011; Ахмадзаде, 2003].

Изученные Ленкоранский и Астаринский административные районы отличаются своими традициями овощеводства, чаеводства, рисоводства, а также цитрусоводства. Помимо наличия благоприятных почвенно-климатических условий для выращивания данных растений на этих территориях, здесь имеются трудовые ресурсы с многолетним опытом работы в этой сфере. Так, за 2019 г. на долю Ленкоранского и Астаринского административных районов пришлось лишь 6022 га, или 8,7%, от общей площади 69 354 га посевов овощных культур и 106 907 т, или 6,2%, из 1 714 678 т произведенной в республике овощной продукции за 2019 г. При росте производства овощей в республике в 2009–2019 гг. наблюдалось снижение производства овощей в Ленкоранско-Астаринском экономико-географическом районе. Наш анализ показывает, что фермерские хозяйства, занимающиеся тепличным овощеводством в других регионах Азербайджана, отличаются высокой производительностью и в состоянии поддерживать рынок в течение всего года, обгоняя Ленкоранский и Астаринский административные районы, в которых преобладает раннесозреваемое овощеводство. Выращивание чая и цитрусовых на плодородных землях и частичное сокращение овощных посевных площадей является тенденцией последних лет.

Большая часть насаждений цитрусовых в стране осуществляется в пределах Ленкоранского и Астаринского административных районов. Согласно анализу годовой статистики, предоставленной Государственным комитетом по статистике Азербайджанской Республики в 2020 г., мы можем отметить, что посадки лимона в стране в 2019 г. были проведены всего на 616,0 га, из них на площади 449,2 га посажены лимоны плодоносящего возраста. 93,5% от общего количества лимонных садов в стране приходится на Ленкоранский и Астаринский административные районы. Следует отметить, что производство лимона в стране в 2019 г. составило 4820 т, из которых 97,02% пришлось только на Ленкоранский и Астаринский административные районы. На них же пришлось 98,8% от общего коли-

чества посаженного в стране мандарина (2775,3 га) и 99,7% от произведенной мандариновой продукции (38536,7 т). Производство цитрусовых в Ленкоранско-Астаринском экономико-географическом районе также осуществляется в Масаллинском административном районе. Основная причина, по которой в ходе исследования не была затронута роль Масаллинского административного района в выращивании цитрусовых, заключалась в том, что посадки цитрусовых там осуществлялись в основном на очень небольших площадях с отдельными приусадебными участками, а общая площадь посадки каждого цитрусового в районе не превышала 1–2 га.

В настоящее время в Ленкоранском районе широко распространены мандарины сорта «унсуи», «элитный», лимоны сорта «новогрузин», «мейер», «вилла-франка», «лиссабон» и другие разновидности [Абдуллаев, 2005].

Основной целью исследования являлись определение степени эффективности использования почвенно-климатических условий экономико-географического региона для выращивания цитрусовых, а также частоты причинения ущерба из-за ряда природных факторов, принятия для их предотвращения мер и внесение предложений в этом направлении. С этой целью решался ряд задач, в которые входили: определение экономических проблем и мер, принятых в различных цитрусовых хозяйствах в Ленкоранско-Астаринском экономико-географическом районе, распространенности вредителей и болезней, влияющих на урожайность и качество продукции, степени влияния вредителей на экономическую эффективность, а также анализ проблем, возникающих при хранении и продаже продуктов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании использованы первоисточники и отчеты сельскохозяйственных и районных управлений Комитета статистики Ленкоранского и Астаринского административных районов, а также положения «Государственных программ», материалы исследований и отчеты «Ленкоранского филиала НИИ плодоводства и чаеводства». В ходе исследования использовались методы сравнения, статистического опроса, системного подхода, анализа, синтеза и полевых исследований. При этом, согласно методу выборочного наблюдения, были собраны необходимые материалы для исследования, проведен опрос в хозяйствах с учетом природных условий и географического положения сел, население которых занято выращиванием цитрусовых. Для обеспечения точности в нескольких хозяйствах в пределах одного села данные были получены и изучены на основе анкетирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Территориальная организация мандариновых насаждений в Ленкоранском и Астаринском административных районах. Как видно из таблиц 1 и 2, в 2004–2008 гг. производство мандаринов, как и других цитрусовых, снизилось. Одной из причин уменьшения посевных площадей в 2008 г. по сравнению с 2004 г. стали сильные морозы в январе и феврале 2005 и 2008 гг., нанесшие серьезный ущерб экономике. Однако в 2009–2020 гг. площади под цитрусовыми культурами, а также их производство увеличились как в стране, так и в регионе в целом. Так, если рассмотреть тенденцию роста в 2009 г., то

площадь мандариновых садов в Ленкорань-Астаринском экономико-географическом районе составила 1140,8 га, из них 861,2 га – плодоносящие деревья. В 2013 г. этот показатель составил 1270,2 га (на 11,3% больше) и 1134 га (на 31,7% больше) соответственно, в 2014 г. – 1305,6 га мандариновых садов, из них 1135,9 га – плодоносящие деревья, а в 2019 г. эти показатели составили 2775,2 и 1656,8 га соответственно. Как видно из статистических данных, площадь мандариновых посадок в исследуемом регионе за последние десять лет увеличилась на 1634,5 га, или 143,2%, а производство мандаринов – на 23389,8 т, или 154,4%, соответственно (см. табл. 1, 2).

Таблица 1

Площадь посадки мандаринов в Ленкоранском и Астаринском административных районах, га

		2004	2008	2008– 2004, %	2009	2013	2013– 2009, %	2014	2019	2019– 2014, %
Всего по республике	Всего	1204	1001,3	–16,8	1145,3	1274,0	11,2	1310,4	2775,3	111,8
	Плодородная площадь	1112	654,3	–41,1	865,5	1137,7	31,5	1140,6	1656,9	45,3
Астаринский район	Всего	455	558,7	22,8	687,1	793,5	15,5	827,1	2227,8	169,4
	Плодородная площадь	420	350,0	–16,7	454,5	680,5	50	680,1	1198,6	76,2
Город Ленкорань	Всего	718	407,7	–43,2	423,0	444,0	5	445,8	514,0	15,3
	Плодородная площадь	672	290,0	–56,8	396,1	440,0	11,1	440,8	433,0	–1,8

Источник: [Сельское хозяйство..., 2020].

Таблица 2

Производство мандаринов (т) и урожайность (ц/га) в Ленкоранском и Астаринском административных районах

		2004	2008	2008– 2004, %	2009	2013	2013– 2009, %	2014	2019	2019– 2014, %
Всего по республике	т	19 188	12 614,8	–34,25	15 170,4	30 824,5	103,2	26 505,9	38 536,7	45,4
	ц/га	172,6	192,8	11,7	175,3	270,9	54,5	232,4	232,6	0,1
Астаринский район	т	11 761	9359,8	–20,4	11 242,7	25 856,8	129,9	21 517,4	33 110,2	53,9
	ц/га	280,0	267,4	–4,5	247,4	380,0	42,7	316,4	276,2	–12,7
Город Ленкорань	т	7260	3159,6	–56,5	3817,6	4867,4	27,5	4876,5	5297,2	8,6
	ц/га	108,0	108,9	0,8	96,4	110,6	14,7	110,6	122,3	10,6

Источник: [Сельское хозяйство..., 2020].

Если посмотреть на показатели урожайности мандарина, то прежде всего мы увидим, что его урожайность в Астаринском районе выше, чем в Ленкоранском. Одна из основных причин – частичная гибель цитрусовых садов в колхозах и совхозах Ленкоранского административного района (Бабек,

Аврора), в то время как цитрусовые сады в Астаринском административном районе, заложенные в советское время, сохранились, так как эти территории не были подвержены сильным морозам. В 2008 г. в Ленкоранском административном районе цитрусовые деревья даже под защитным покрытием сильно

пострадали от морозов. В результате в Астаринском районе преобладают цитрусовые сады в плодоносящем возрасте, что отражается на урожайности. Однако в целом заморозки 2005, 2008 и 2011 гг. не прошли без следа для цитрусовых садов. В целом урожайность мандарина в экономико-географическом районе увеличилась с 175,9 ц/га в 2009 г. до 232,6 ц/га в 2019 г., или на 32,2%.

Был проведен опрос среди владельцев мандариновых садов в селах с разными природными условиями. Исследование проводилось в селах Мамуста и Гирдени, находящихся на высоте 20 м над уровнем моря, селе Сепаради на высоте 10 м над уровнем моря, селе Гурумба на высоте 30 м над уровнем моря, селе Нарбаги на высоте 70 м над уровнем моря. В результате опроса были определены уровень урожайности садов, уход за садом, рабочая сила, используемая в хозяйстве, правила полива, причины разных показателей урожайности одного и того же сорта. В селе Нарбаги было установлено, что владельцы плантаций в основном предпочитают сорта «уншиу», «элитные» и карликовые сорта мандарина, из которых карликовые составляют 40% от общей площади, а другие сорта – 30%. В селе Мамуста население в основном предпочитает сорт «уншиу» и карликовые сорта. В некоторых хозяйствах средняя урожайность 50-летних деревьев (сады, посаженные в 1970-е гг.) сорта «уншиу», посаженных на расстоянии 3×3 м, составляет 50 кг с одного дерева в некоторых хозяйствах, а в селе Мамуста средняя урожайность мандариновых деревьев со средним возрастом 20–25 лет, орошаемых капельным орошением и посаженных на расстоянии 3×4 м, составляет 65 кг с одного дерева. В хозяйствах села Мамуста наблюдается низкая урожайность карликовых сортов, а средняя урожайность составляет 30 кг с одного дерева. На территории плантации площадью 130 га в селе Сепаради на 70 га земли высажено 35 тыс. мандариновых деревьев. Отметим, что в мандариновых садах, посаженных в 2017–2018 гг., предпочтение отдавалось преимущественно сорту «w-morcutt». Средняя урожайность «w-morcutt» в этом хозяйстве составляет 70 кг с одного дерева. Здесь схема посадки деревьев составляет 4×5 м. Средний возраст цитрусовых деревьев в селе Гурумба – 25–30 лет, а мандариновые сорта в основном «уншиу» и карликовые. Урожайность деревьев сорта «уншиу», посаженных по схеме $2,5 \times 3$ м, – 50–120 кг с одного дерева, тогда как урожайность карликового сорта может составлять в среднем 5060 кг с одного дерева. В цитрусовых садах села Ловаин, расположенного на высоте 140 м над уровнем моря в Астаринском административном районе, предпочтение отдается карликовым и элитным сортам мандарина. Определено, что здесь,

в отличие от Ленкоранского административного района, большую часть цитрусовых садов составляют карликовые сорта плодоносящего возраста, а средняя урожайность составляет 80–120 кг с дерева. Хотя расстояние между посадками в садах составляет в основном 3×3 м, в некоторых садах также наблюдалась посадка деревьев 3×4 и 3×5 м. В целом было отмечено, что средняя урожайность цитрусовых культур обычно высока в хозяйствах с большим расстоянием между посадками, т. е. с большой площадью питания, что облегчает перемещение техники и проведение различных агротехнических работ.

Еще одним фактором, влияющим на урожайность, является уровень грунтовых вод, которые в Ленкоранском районе находятся на глубине 2,5–5 м в предгорьях и 0,2–0,5 м в прибрежной зоне [География Азербайджанской..., 2015]. Грунтовые воды, расположенные близко к поверхности, препятствуют питанию корней цитрусовых. По этой причине при изучении посадок цитрусовых были выбраны насаждения, расположенные в нескольких местах на высотах 10, 20, 30 и 70 м над уровнем моря. Мы заметили, что продуктивность варьировала в зависимости от высоты над уровнем моря. Было определено, что в экономико-географическом районе товарное качество и урожайность цитрусовых культур повышаются по мере увеличения высоты места посадки деревьев. В связи с этим были проведены исследования двух фермерских плантаций с одинаковым расстоянием между посадками и использующих один сорт мандаринов. В хозяйстве поселка Мамуста, расположенном на высоте 20 м над уровнем моря, средняя урожайность карликового сорта мандаринов, посаженных на расстоянии 3×3 м друг от друга, составляет 30 кг с одного дерева, а в поселке Ловаин, расположенном на высоте 140 м над уровнем моря, средняя урожайность этого же сорта мандарина, посаженного на том же расстоянии составляет 80–150 кг с одного дерева. Было бы целесообразно провести это наблюдение и эксперимент в более крупном масштабе, принимая во внимание другие факторы, влияющие на урожайность. По материалам наблюдений сделан вывод, что урожайность садов бывает выше в хозяйствах, которые расположены на высоте 10–30 м над уровнем моря и при правильном определении места и соблюдения расстояния посадки, а также агротехнических правил.

Для мандариновых плантаций не рекомендуется выбирать участки выше 300 м над уровнем моря [Ильяшенко, 1936]. Основным фактором при определении площади насаждений в экономико-географическом районе является выбор хорошо защищенных от морозов участков. В Ленкоранском и Астаринском административных районах такими

территориями являются в основном южные и юго-восточные склоны гор.

Большинство мандариновых садов в Ленкоранском административном районе – это семейные хозяйства; в садах средней площадью 1–2 га, помимо членов семьи, работают еще 1–2 человека, а в сезон сбора урожая в садах работают 2–3 человека. Опрос выявил, что большинство рабочих, а также владельцев плантаций имеют дополнительное место работы.

В зависимости от сорта мандарина урожайность с гектара составляет 10–19 тыс. кг (в среднем 50–70 кг с дерева), стоимость продукта – 0,08–0,11 маната/кг (на 2019 г.), а при цене за 1 кг мандаринов

в пределах 0,80–1 маната (на 2019 г.) в зависимости от качества продукции показатель рентабельности колеблется между 75–90%. По данным «Центра аграрных исследований» Министерства сельского хозяйства Азербайджана, оптовая цена мандарина в 2017–2020 гг. колебалась в пределах 0,77–2,90 маната.

Как видно из таблицы 3, самым урожайным является сорт мандаринов «иримейвли» (19 000 кг/га), что по сравнению с сортами мандарина «уншиу» и «ковано-ваза» имеет высокую рентабельность. В экономико-географическом районе с точки зрения экономической эффективности целесообразно сажать сорт мандаринов «иримейвли» (см. табл. 3).

Таблица 3

Экономическая эффективность распространенных сортов мандарина в Ленкоранском и Астаринском районах (2019)

Сорт мандарина	Продуктивность, кг/га	Себестоимость, манат/кг	Цена продажи, манат/кг	Прибыль, манаты	Рентабельность, %
«Иримейвли»	19 000	0,08	0,85	0,77	90
«Уншиу»	13 500	0,11	0,99	0,88	89
«Ковано-ваза»	17 200	–	0,75	–	–

Источник: по материалам исследований Ленкоранского чайного филиала НИИ фруктов и чая.

Территориальная организация лимонных насаждений в Ленкоранском и Астаринском административных районах. Для нормального роста и развития лимонных насаждений необходимы достаточная влажность, тепло и кислород. Самая низкая температура для цветения лимона составляет +9°C, ниже этой температуры он не цветет. Активная температура, необходимая для вызревания лимона, составляет всего 4300°C [Даньков и др., 2014]. В период 2004–2008 гг. лимонные насаждения, как и другие цитрусовые культуры, пострадали от морозов, и вместе с сокращением посевных площадей

в экономико-географическом районе снизился и показатель урожайности лимонов (табл. 4, 5). Однако, если в 2009 г. в Ленкорань-Астаринском экономико-географическом районе было произведено 2829,8 т продукции, то в 2013 г. этот показатель составил уже 4206,8 т, увеличившись на 48,7%, а в 2019 г. – 4760,9 т. За последние 10 лет наметилась положительная тенденция к увеличению площади насаждений. Так, общая площадь лимонных насаждений в экономическом районе увеличилась с 384,3 га (2009) до 591,4 га (2019), что составило 53,9% прироста (см. табл. 4, 5).

Таблица 4

Площадь лимонных насаждений в Ленкоранском и Астаринском административных районах, га

		2004	2008	2008–2004, %	2009	2013	2013–2009, %	2014	2019	2019–2014, %
Всего по республике	Всего	482	370,7	–23,1	412,9	420,8	1,9	411,1	616,0	49,8
	Плодородная площадь	457	289,9	–36,6	315,0	378,0	20	373,2	449,2	20,4
Астаринский район	Всего	199	103,2	–48,1	144,3	148,0	2,6	151,0	324,3	114,8
	Плодородная площадь	182	52,7	–71	67,5	118,0	74,8	126,0	195,1	58,8
Ленкоранский район	Всего	246	226,8	–7,8	227,0	227,0	0	213,1	251,6	18,1
	Плодородная площадь	241	200,6	–16,8	210,0	225,0	7,1	210,1	218,0	3,8

Источник: [Сельское хозяйство..., 2020].

Таблица 5

Производство лимона (т) и урожайность (ц/га) в Ленкоранском и Астаринском административных районах

		2004	2008	2008– 2004, %	2009	2013	2013– 2009, %	2014	2019	2019– 2014, %
Всего по республике	т	4541	1814,8	–60	2932,9	4310,1	46,9	3966,1	4820,0	21,5
	ц/га	99,4	62,6	–37,1	93,1	114,0	22,4	106,3	107,3	1
Астаринский район	т	2180	547,0	–74,9	365,6	1027,0	180,9	994,1	1623,2	63,3
	ц/га	119,8	103,8	–13,4	54,2	87,0	60,5	78,9	83,2	5,4
Ленкоранский район	т	2190	1121,6	–48,8	2411,0	3132,8	29,9	2828,1	3053,3	8
	ц/га	90,9	55,9	–38,5	114,8	139,2	21,3	134,6	140,1	4,1

Источник: [Сельское хозяйство..., 2020].

Был проведен опрос среди владельцев лимонных садов в селах с разными природными условиями. Опрос и наблюдения проводились не только в крупных, но и в небольших семейных хозяйствах. В нескольких крупных хозяйствах в селе Нарбаги было установлено, что предпочтение отдается в основном лимонам сортов «новогрузина», «мейера» и частично местным сортам. Фермеры заявили, что при выборе сорта они в основном принимают во внимание экономическую эффективность. Схема посадки деревьев в основном $2,5 \times 3$ и 3×3 м. Урожайность в рассматриваемых хозяйствах составляла от 50 до 180 штук плодов лимона с дерева, в зависимости от сорта. Лимонные сады в селе пострадали от морозов 2005 г. На плантации площадью 60 га в селе Сепаради Ленкоранского административного района было отмечено, что предпочтение отдается сорту «мейер», а расстояние посадки между деревьями для облегчения передвижения техники было установлено 4×5 м. В этом хозяйстве посажено 30 тыс. лимонных деревьев, что дает в среднем 30–35 т/га. В нескольких хозяйствах села Мамуста предпочтение отдается сортам «мейер» и «новогрузин», посаженным по

схеме 3×3 м, возраст деревьев в основном составляет 20 лет (сады, посаженные в 2000 и 2001 гг.). Здесь урожайность сорта «мейер» составила 150–200 шт. с дерева, а урожайность сорта «новогрузин» была немного выше – 200–250 шт. с одного дерева. В садах возрастом 20–25 лет (в основном посаженных в 1998 и 2001 гг.) в Астаринском административном районе на лимонных плантациях предпочтение отдавалось сортам «мейер» и «новогрузин», высаженным на расстоянии 3×4 и 3×5 м. Здесь урожайность сорта «мейер» составляла 100–160 шт. с одного дерева, а урожайность сорта «новогрузин» была немного выше – 150–200 шт. с одного дерева. Лимонные сады в селе пострадали от морозов в 2008 г.

Как видно из таблицы 6, местный сорт лимона и сорт «мейер» (без шипов) обладают высокой урожайностью и по доходам от продаж отличаются от других. При посадке лимонов в экономико-географическом районе целесообразно отдавать предпочтение этим разным по урожайности и качеству плода. В отличие от других цитрусовых, лимоны наиболее употребляемы по всей стране и пользуются большим спросом круглый год.

Таблица 6

Экономическая эффективность широко распространенных сортов лимона в Ленкоранском и Астаринском районах (2019)

Сорт лимона	Урожайность, кг/га	Себестоимость, манат	Цена продажи, манат/ кг	Прибыль, манат	Рентабельность, %
«Лиссабон»	6700	0,18	1,00	0,82	82
Местные сорта	9850	0,12	1,00	0,88	88
«Мейер» (без шипов)	8800	0,14	1,00	0,86	86
Турецкие сорта	7200	0,18	1,00	0,82	82

Источник: по материалам исследований Ленкоранского чайного филиала НИИ фруктов и чая.

Торговый баланс лимонов неравномерный; они в основном импортируются из Турции и ЮАР. В 2020 г. 7072,6 т лимонов было импортировано из Турции, 4813,3 т из ЮАР и 590,5 т из других стран, при этом экспорт был очень небольшим и составил 119,8 т. Однако, если учесть, что в 2019 г. экспорт составил 5,5 т и объем импортированных лимонов по сравнению с 2019 г. снизился, то можно увидеть, что меры, принятые по выращиванию цитрусовых, дали определенные положительные результаты [Производство лимонов..., 2021].

Влияние природных факторов в экономико-географическом регионе на цитрусовые и меры борьбы с непригодными условиями погоды. Суровая зима 1949–1950 гг. и понижение температуры воздуха до $-13...-17^{\circ}\text{C}$ привели к массовому уничтожению теплолюбивых цитрусовых садов и нанесли серьезный ущерб хозяйству [Гулиев, 2018]. Только в Астаре из-за суровых морозов в январе–феврале 2005 и 2011 гг. погибло более 10 тыс. лимонных и апельсиновых деревьев на площади 2 тыс. га [Пашаев, 2018]. Аналогичная ситуация наблюдалась в Ленкоранском административном районе, где было полностью уничтожено большинство цитрусовых садов, в основном в селе Велади, где большую часть посевных площадей занимают цитрусовые сады. В январе–феврале 2021 г. около 100 га цитрусовых садов на территории села Шагласер Ленкоранского административного района серьезно пострадало из-за непринятых во время мер по борьбе с холодами. Так как среди цитрусовых лимон очень неустойчив к морозам и цветет круглый год, фермеры выращивают это растение в теплицах не только в южном,

но и в других регионах. В результате проведенных исследований было отмечено, что для защиты от холодов лимон покрывают светоизлучающим полиэтиленом, а другие цитрусовые выращивают на открытом воздухе. Необходимо строго соблюдать агротехнические меры, чтобы свести к минимуму потери и обеспечить экономическую эффективность. Для защиты от мороза цитрусовые обычно покрывают специальным светопроницаемым материалом, а для снижения скорости ветра разбивают защитную лесополосу. На территории села Шуви, расположенного в Астаринском административном районе, цитрусовый сад окружен лесным массивом, который естественным образом защищает сад от морозов и сильных ветров. В 2005, 2008 и 2011 гг. наблюдались морозы, которые привели к гибели и повреждению ряда деревьев. Было бы хорошо, если бы компенсация ущерба от морозов была отражена в договорах агрострахования.

Средняя температура зимних месяцев в зоне исследований составляет $+4,5^{\circ}\text{C}$, а средняя температура января – $+3^{\circ}\text{C}$. Среднегодовая температура колеблется в пределах $+14,5...+14,7^{\circ}\text{C}$. В Ленкорань-Астаринском экономико-географическом районе средняя абсолютная минимальная температура составляет $-5...-7^{\circ}\text{C}$, а абсолютная минимальная температура – $-13...-16^{\circ}\text{C}$ [Гасанов, 2021].

В исследованных нами административных районах количество осадков в летние месяцы за последние годы уменьшилось по сравнению с предыдущими годами. Это увеличивает себестоимость продукции за счет увеличения потребности в орошении (табл. 7).

Таблица 7

Годовой показатель осадков Ленкоранской метеостанции и среднемесячная температура воздуха

Месяц	Год							
	2005		2010		2015		2020	
	мм	$^{\circ}\text{C}$	мм	$^{\circ}\text{C}$	мм	$^{\circ}\text{C}$	мм	$^{\circ}\text{C}$
I	31,8	5,3	38,0	3,8	98,8	5,3	175,9	5,7
II	147,7	3,8	32,5	7,8	241,6	6,0	60,7	8,0
III	91,9	8,4	29,1	9,3	123,2	8,3	156,9	9,7
IV	77,5	12,9	129,1	10,1	29,0	12,0	180,3	11,4
V	37,3	19,4	24,7	18,1	22,5	18,8	21,8	18,7
VI	25,8	22,2	14,3	23,2	0,0	25,1	2,6	24,9
VII	–	26,5	0,7	26,9	49,0	26,2	2,4	26,0
VIII	16,6	26,1	206,1	23,6	42,5	26,0	23,5	24,0
IX	78,3	22,6	166,6	20,6	57,3	23,0	100,4	22,5
X	95,0	16,6	95,0	17,6	523,3	16,1	47,8	17,0
XI	232,5	11,2	138,7	12,4	288,5	10,4	217,2	11,0
XII	86,2	9,3	152,8	7,6	156,5	6,7	111,5	6,0

Источник: [Окружающая среда..., 2006, 2010, 2016, 2021].

При этом агрохимические свойства земель сел Мамуста и Гирдани, находящихся на высоте 20 м над уровнем моря, и села Сепаради, находящегося на высоте 10 м над уровнем моря, были получены по данным Ленкоранского чайного филиала Института плодоводства и чая (табл. 8, 9).

Болезни и вредители в цитрусовых садах, влияющие на урожайность, качество продукции и экономическую эффективность. При изучении вредителей и болезней в цитрусовых садах в Ленкоранском и Астаринском административных районах Ленкоранским чайным филиалом НИИ фруктов и чая были обнаружены такие вредители, как кокциды, мучнистый червец, серебряные и красные клещи, цитрусовая моль, а также такие болезни, как

антракноз (*Colletotrichum gloeosporioides*), фитофтора (*Phytophthora citrophthora*), болезнь Мальсекко (*Deuterophoma tracheiphila*), бактериоз и хлороз. Моль и клещи наносят экономический ущерб цитрусовым садам и снижают качество продукции.

Транспортный фактор также играет важную роль в территориальной организации сельского хозяйства. Расположение экономико-географического района в северо-южном транспортном коридоре, а также наличие железных дорог и аэропортов способствует экспорту продукции. Общая протяженность железной дороги в пределах региона составляет 100,5 км. В экономико-географическом районе на каждый квадратный километр приходится 1,6 км железных дорог [Пашаев, 2018].

Таблица 8

Агрохимическая характеристика земель плантаций цитрусовых в селах Мамуста и Гирдени

№ п/п	Слои почвы, см	pH	Всего, %			Усваиваемые питательные вещества, мг/кг			
			N	P ₂ O ₅	Гумус	N/NH ₄ поглощенные	N/NO ₃	P ₂ O ₅ подвижные	K ₂ O взаимозаменяемые
1	0–20	5,7	0,38	0,40	2,5	30,5	8,24	118,0	160,5
2	20–40	5,78	0,33	0,35	2,4	26,8	6,8	102,5	157,2
3	40–60	5,80	0,28	0,31	1,9	22,6	5,7	99,7	140,3
4	60–80	5,95	0,24	0,27	1,3	20,3	4,9	91,0	133,8
5	80–100	6,1	0,21	0,23	1,0	18,9	4,0	87,7	125,1

Источник: по отчетам Ленкоранского чайного филиала НИИ фруктов и чая.

Таблица 9

Агрохимическая характеристика земель плантаций цитрусовых в селе Сепаради

№ п/п	Слои почвы, см	pH	Всего, %			Усваиваемые питательные вещества, мг/кг			
			N	P ₂ O ₅	Гумус	N/NH ₄ поглощенные	N/NO ₃	P ₂ O ₅ подвижные	K ₂ O взаимозаменяемые
1	0–20	5,5	0,35	0,38	2,2	28,5	7,35	100,0	150,0
2	20–40	5,7	0,33	0,36	2,0	24,8	7,00	93,0	145,0
3	40–60	5,9	0,26	0,35	1,8	20,0	5,20	87,0	130,0
4	60–80	6,0	0,25	0,28	1,4	19,0	4,80	80,0	127,0
5	80–100	6,3	0,20	0,25	0,9	16,8	3,70	75,0	110,0

Источник: по отчетам Ленкоранского чайного филиала НИИ фруктов и чая.

По данным Государственного таможенного комитета, в нашу страну в 2020 г. было импортировано 42,6 тыс. т цитрусовых на сумму 33,7 млн долл. Эти цифры говорят о важности развития данного сектора экономики страны, в связи с чем и была принята «Государственная программа развития цитрусового фруктоводства на 2018–2025 гг.» [Производство цитрусовых..., 2021]. Согласно «Государственной программе по безопасному продовольственному обе-

спечению населения Азербайджанской Республики на 2015–2020 гг.», в целях обеспечения продовольственной безопасности уделяется особое внимание выращиванию цитрусовых. За последние годы из 100 тыс. завезенных саженцев мандарина и апельсина 50 тыс. были бесплатно розданы населению.

В экономико-географическом регионе ряд производителей из-за отсутствия инвестиций вынуждены продавать незрелую продукцию. Низкое качество

собранного урожая ослабляет позиции местного продукта на международном рынке и снижает его конкурентоспособность. Поэтому важно использование субсидий и различных сельскохозяйственных кредитов. В настоящее время единовременная субсидия составляет 11 000 манат/га для лимонных садов, заложенных в 2021 г., и 9000 манат/га для мандариновых садов. Чтобы продукт не испортился и не был выброшен до того, как попадет к потребителю, важно организовать предложение продукции массовому покупателю.

В этом случае можно использовать мировой опыт. Рассмотрим метод паритетного ценообразования, используемый в Европейском союзе и США. Цена на товар в каждой стране может колебаться в течение года. В связи с этим государство ежегодно устанавливает паритетную цену на продукт. Если фермер продает продукт по цене, ниже устанавливаемой, ему выплачивается разница между продажной ценой продукта и паритетной ценой. Также принимаются дополнительные меры безопасности как в США, так и в Европейском союзе. Если фермер не может продать продукт, государство покупает продукт у фермера по цене ниже паритетной и хранит его в амбарах. Это привело к созданию в Европейском союзе знаменитых «масляных гор» и «винных озер» [Grigg, 1995].

Из-за отрицательного торгового сальдо цитрусовых темпы роста импорта и экспорта сохранились в течение 2015–2020 гг. Так, если в 2015 г. объем импортированных цитрусовых составил 23,3 тыс. т (на сумму 7,1 млн долл. США), то в 2020 г. этот показатель достиг 42,6 тыс. т (на сумму 33,7 млн долл. США). Объем экспорта цитрусовых в 2020 г. увеличился в 1,8 раза по сравнению с 2019 г. (509,4 т) и достиг 930 т. Цитрусовые в основном завозятся из Турции, Ирана, Южной Африки, Египта и других стран и экспортируются в Россию и на Украину [Производство цитрусовых..., 2021].

ВЫВОДЫ

За 2019 г. урожайность в мандариновых садах Астаринского административного района составила 276,2 ц/га, в то время как в Ленкоранском административном районе этот показатель был почти в два раза ниже – 122,3 ц/га. Одна из основных причин заключается в том, что деревья плодоносящего возраста лучше сохранились в Астаринском административном районе. Показатель продуктивности лимонных на-

саждений Ленкоранского административного района выше, чем в Астаринском административном районе. Основная причина этого заключается в том, что из 324,3 га лимонных садов, расположенных в Астаринском административном районе, только 195,1 га имеют плодоносящие деревья.

Наиболее продуктивными и экономически эффективными оказались посадки цитрусовых на юго-восточном, восточном и южном склонах гор на высотах 10–30 м над уровнем моря. На урожайность культур так же влияют глубина залегания грунтовых вод, расстояние между деревьями и соблюдение агротехнических мероприятий. Замечено, что чем ближе уровень грунтовых вод к поверхности, тем ниже урожайность деревьев.

Одной из основных причин серьезного ущерба цитрусоводству в исследованном районе являются морозы. В некоторых случаях вымерзание связано с непринятием своевременных мер (укрывание посадок специальными материалами). В других районах лимон и другие цитрусовые, которые являются менее морозоустойчивыми, нуждаются в защите. Причиной ограниченного использования средств защиты от низких температур владельцами небольших хозяйств является то, что доходы не в полной мере покрывают расходы, необходимые для ухода за деревьями. Необходимо строго соблюдать агротехнические меры, чтобы минимизировать потери и обеспечить экономическую эффективность.

Большинство цитрусовых садов в исследуемой области – семейные фермерские хозяйства со средней площадью 1–2 га, в которых трудоустроены в основном члены семьи и несколько дополнительных рабочих. Владельцы таких небольших хозяйств не в состоянии полностью обеспечить себя доходом от участка, поэтому работают в двух или трех местах. Напротив, в крупных фермерских хозяйствах такой ситуации не наблюдается. На семейных фермах местное население в основном занимается выращиванием цитрусовых. Выяснилось, что люди, работающие в небольших цитрусовых хозяйствах в пределах изучаемого нами административного района, также трудоустроены на второй и третьей работе, и эти работы связаны в основном не с сельскохозяйственной деятельностью. В некоторых хозяйствах было отмечено, что население также занималось овощеводством до наступления возраста плодоношения деревьев в недавно посаженных садах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агаев З.Б. Оценка и эффективное использование водных ресурсов рек Ленкоранского природного региона: ав-

тореф. ... канд. геогр. наук, Институт географии имени акад. Г.А. Алиева. Баку, 2007. 21 с.

- Алиева И.С. Гидрология озер и водохранилищ. Баку: Изд-во МБМ, 2011. 216 с.
- Ахмадзаде А.С. Гейдар Алиев и водное хозяйство Азербайджана. Баку: Азернешр, 2003. 216 с.
- Абдуллаев Ф.М. Консультации по вопросам владения землей для выращивания лимонов, мандаринов и фейхоа. Баку: Изд-во общества ММ «Экологически чистый КТМИЭС», 2005. 120 с.
- География Азербайджанской Республики. Региональная география. Т. III. Монография. НАНА, Баку: Институт географии имени акад. Н.А. Алиева, 2015. 400 с.
- Гасанов М.С. Изучение влияния современных изменений климата на некоторые направления сельского хозяйства в Азербайджане. Баку: АГАУ, 2021. 416 с.
- Гулиев Ф.А. Цитрусовые растения: биологические особенности и режим орошения. Баку: Экопринт, 2018. 288 с.
- Даньков В.В., Скрипниченко М.М., Горбачева Н.Н. Субтропические культуры: учебник. СПб.: Лань, 2014. 160 с.
- Ильяшенко К. Культура цитрусовых. М.: Изд-во Всесоюзной академии с.-х. наук им. В.И. Ленина, 1936. 166 с.
- Мамедов Г. Земельные ресурсы Азербайджана. Баку: Наука, 2002. 132 с.
- Мусейибов М.А. Физическая география Азербайджана. Баку: Маариф, 1998. 340 с.
- Окружающая среда в Азербайджане. Государственный комитет по статистике Азербайджанской Республики. Баку, 2006. 290 с.
- Окружающая среда в Азербайджане. Государственный комитет по статистике Азербайджанской Республики. Баку, 2010. 130 с.
- Окружающая среда в Азербайджане. Государственный комитет по статистике Азербайджанской Республики. Баку, 2016. 140 с.
- Окружающая среда в Азербайджане. Государственный комитет по статистике Азербайджанской Республики. Баку, 2021. 140 с.
- Пашаев Н.А. Экономико-географическая оценка воздействия стихийных бедствий на экономику Азербайджанской Республики. Баку: Европа, 2018. 372 с.
- Сельское хозяйство Азербайджана. Государственный комитет по статистике Азербайджанской Республики. Баку, 2020. 653 с.
- Производство лимонов в Азербайджане: справка. Центр аграрных исследований при Министерстве сельского хозяйства. Баку, 2021. 9 с.
- Производство цитрусовых в Азербайджане: справка. Центр аграрных исследований при Министерстве сельского хозяйства. Баку, 2021. 9 с.
- Grigg D. An Introduction to Agricultural geography, London, New York, Routledge, 1995, 236 p.

Поступила в редакцию 14.02.2022

После доработки 04.04.2022

Принята к публикации 13.05.2022

CITRUS CULTIVATION IN THE LANKARAN AND ASTARA REGIONS OF THE REPUBLIC OF AZERBAIJAN

N.A. Pashayev¹, I.I. Aleskerzade²

¹ Hasan Aliyev Institute of Geography, ANAN; D.Sc. in Geography; e-mail: pasayevneriman@mail.ru

² Lankaran State University; doctoral student; e-mail: i.aleskerzade@yahoo.com

The modern territorial organization of citrus cultivation in the Lankaran and Astara administrative regions, which are part of the Lankaran-Astara economic and geographical region, was studied using statistical materials, observations and questionnaires; tables and diagrams were compiled. Based on world experience, the natural and economic factors influencing the development of citrus fruits in the administrative regions are analyzed and protection measures are determined. The main goals and objectives were achieved by analyzing the historical development of traditions, the current state and prospects for growing citrus fruits in the study area. The cultivation of citrus fruits is one of the most demanded areas for the development of the agricultural sector of the Republic of Azerbaijan, which is not adequately studied from the economic and geographical point of view.

It was found that the process of planting and the location of citrus trees in the study area result in different yields of the same fruit variety. It is concluded that the yield of orchards is higher at farms located at 10–30 m above sea level, with the correct location (recommended tree planting sites are on the southeastern, eastern and southern slopes of the mountains) and compliance with the planting distance (at least 3×3 m between trees) and agrotechnical standards.

The effective territorial organization of citrus cultivation in the Lankaran-Astara economic-geographical region and the identification of problems in the field are of great scientific relevance.

Keywords: mandarin, lemon, citrus, territorial organization, administrative district, region

REFERENCES

- Abdullaev F.M. *Konsul'tacii po voprosam vladenija zemlej dlja vyrashhivaniya limonov, mandarinov i fejhoa* [Advice on land ownership for growing lemons, tangerines and feijoa], Baku, Publishing house of the Society MM "Environmentally friendly KTMIES", 2005, 120 p. (In Azerbaijani)
- Agaev Z.B. *Ocenka i effektivnoe ispol'zovanie vodnyh resursov rek Lenkoranskogo prirodnogo regiona* [Evaluation and efficient use of water resources of the rivers of the Lankaran natural region], Ph.D. in Geography, dissertation abstract, 25.00.27, ANAS, Institute of Geography acad. G.A. Aliyeva, Baku, 2007, 21 p. (In Azerbaijani)
- Ahmadzade A.S. *Gejdar Aliev i vodnoe hozjajstvo Azerbajdzhana* [Heydar Aliyev and water management of Azerbaijan], Baku, Azerneshr Publ., 2003, 216 p. (In Azerbaijani)
- Aliyeva I.S. *Gidrologija ozer i vodohranilish* [Hydrology of lakes and reservoirs], Baku, MBM Publ., 2011, 216 p. (In Azerbaijani)
- Dankov V.V., Skripnichenko M.M., Gorbacheva N.N. *Subtropicheskie kultury, uchebnik* [Subtropical crops, Textbook], St. Petersburg, Lan' Publ., 2014, p. 160. (In Russian)
- Gasasov M.S. *Izuchenie vlijaniya sovremennyh izmenenij klimata na nekotorye napravleniya selskogo hozjajstva v Azerbajdzhanе* [Studying the impact of modern climate change on some areas of agriculture in Azerbaijan], Baku, ASAU printing house, 2021, p. 416. (In Azerbaijani)
- Geografija Azerbajdzhanskoj Respubliki "Regional'naja geografija"* [Geography of the Republic of Azerbaijan "Regional geography"], vol. III, Monograph, ANAS, Institute of Geography acad. N.A. Aliyeva, Baku, 2015, 400 p. (In Azerbaijani)
- Grigg D. *An Introduction to Agricultural geography*, London, New York, Routledge, 1995, 236 p.
- Guliev F.A. *Citrusovye rastenija: biologicheskie osobennosti i rezhim oroshenija* [Citrus plants: biological features and irrigation regime], Baku, Ecoprint, 2018, 288 p. (In Azerbaijani)
- Iljashenko K. *Kultura citrusovyh* [Citrus cultivation], Publishing house of V.I. Lenin All-Union Academy of agric. Sciences, Moscow, 1936, 166 p. (In Russian)
- Mamedov G. *Zemelnye resursy Azerbajdzhana* [Land resources of Azerbaijan], Baku, Science Publ., 2002, 132 p. (In Azerbaijani)
- Musejibov M.A. *Fizicheskaja geografija Azerbajdzhana* [Physical Geography of Azerbaijan], Baku, Maarif Publ., 1998, 340 p. (In Azerbaijani)
- Okruzhajushhaja sreda v Azerbajdzhanе* [Environment in Azerbaijan], The State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan, Baku, 2006, 290 p. (In Azerbaijani)
- Okruzhajushhaja sreda v Azerbajdzhanе* [Environment in Azerbaijan], The State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan, Baku, 2010, 130 p. (In Azerbaijani)
- Okruzhajushhaja sreda v Azerbajdzhanе* [Environment in Azerbaijan], The State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan, Baku, 2016, 140 p. (In Azerbaijani)
- Okruzhajushhaja sreda v Azerbajdzhanе* [Environment in Azerbaijan], The State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan, Baku, 2021, 140 p. (In Azerbaijani)
- Pashaev N.A. *Ekonomiko-geograficheskaja ocenka vozdejstviya stihijnyh bedstvij na ekonomiku Azerbajdzhanskoj Respubliki* [Economic and geographical assessment of the impact of natural disasters on the economy of the Republic of Azerbaijan], Baku, Europe, 2018, 372 p. (In Azerbaijani)
- Proizvodstvo citrusovyh v Azerbajdzhanе*, spravka, Centr agrarnykh issledovanij pri Ministerstve selskogo hozjajstva [Center for Agrarian Research under the Ministry of Agriculture, reference "Production of citrus in Azerbaijan"], Baku, 2021, 9 p. (In Azerbaijani)
- Proizvodstvo limonov v Azerbajdzhanе*, spravka Centr agrarnykh issledovanij pri Ministerstve selskogo hozjajstva, Center for Agrarian Research under the Ministry of Agriculture, reference "Production of lemons in Azerbaijan", Baku, 2021, 9 p. (In Azerbaijani)
- Selskoe hozjajstvo Azerbajdzhana* [Agriculture of Azerbaijan], Baku, 2020, 653 p. (In Azerbaijani)

Received 14.02.2022

Revised 04.04.2022

Accepted 13.05.2022

КРАТКИЕ ЗАМЕТКИ

УДК 551.89; 551.314

ДЕЛЬТА КАЗАЧЬЕГО ЕРИКА – ПЕРЕВОЛОКИ (ДЕЛЬТА КУБАНИ) В ГОЛОЦЕНЕ

Н.А. Тюнин¹, В.Р. Беляев², Д.М. Лобачева³, Д.В. Семиколенных⁴

^{1–3} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

⁴ Институт географии РАН, лаборатория эволюционной географии

¹ Кафедра геоморфологии и палеогеографии, аспирант; e-mail: nictun@mail.ru

² Лаборатория эрозии почв и русловых процессов, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук;
e-mail: vladimir.r.belyaev@gmail.com

³ Кафедра геоморфологии и палеогеографии, аспирант; e-mail: lob.dascha@yandex.ru

⁴ Аспирант; e-mail: dasha.semikolennykh@gmail.com

Рассмотрена история развития ключевого участка кубанской дельты. Изучен керн скважины глубиной 18 м из юго-западной части устьевой области Кубани (дельта Казачьего Ерика – Переволоки) комплексом методов: фациально-литологический, малакофаунистический анализы, радиоуглеродное датирование. В его строении выявлены витязевско-раннеджеметинская (ранее 5,0 тыс. л. н.) и поздненимфейско-современная (1,2–0,0 тыс. л. н.) серии чередующихся озерно-лагунных (темноцветные суглинки и глины) и аллювиальных (пески и супеси светлых оттенков) осадков. Между ними (5,0–1,2 тыс. л. н.) существовал период континентального развития изученной территории. В лагунных осадках встречены пять видов моллюсков, типичных для опресненных морских условий: господствуют *Cerastoderma glaucum*, редки *Mytilus galloprovincialis* и *Bittium reticulatum*, единичны *Donax trunculus* и *Tritia reticulata*. Значимых различий в видовом составе и процентном содержании малакофауны в разных интервалах керна не выявлено. Полученные высотные отметки разновозрастных слоев не отражают реальные синхронные уровни Азовского моря и Ахтанизовского лимана из-за тектонического опускания и усадки глинистых грунтов. Средняя скорость седиментации за последние 1,2 тыс. лет – около 5 мм/год, максимальная – 19 мм/год (1860–1911 гг.).

Ключевые слова: дельта Кубани, Ахтанизовские лиманы, литофациальный анализ, керновое бурение, малакофауна, радиоуглеродные даты, палеогеография, геоморфология

DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-140-148

ВВЕДЕНИЕ

Дельта Кубани занимает площадь около 5 тыс. км². Дельта находится в пределах Прикубанской низменности (Западно-Кубанской прогиб) и синклинальных низменностей на востоке Таманского полуострова (Керченско-Таманский прогиб) [Благоволин, 1962; Сидоренко, 1968; Сафронов, 1972]. Она относится к малорукавным дельтам выполнения. Главный узел разветвления расположен у х. Тиховского, в 118–135 км (по руслу) от Азовского моря. Здесь единое русло реки расходится на левый рукав Кубань и правый рукав Протоку. Вблизи устьев оба рукава формируют вторичные дельты: Кубань – дельту Казачьего Ерика – Переволоки (Ахтанизовские лиманы) и Темрюкскую дельту; Протока – дельту у д. Ачуево [Михайлов и др., 2010].

Прогибы, занятые дельтой, отличаются мощным мезо-кайнозойским осадочным чехлом (до 6 км). В неоплейстоцене периодическая смена климатиче-

ских условий приводила к значительным колебаниям уровня Азово-Черноморского бассейна (амплитудой 100 м и более). В криохроны береговая линия отступала далеко, и на месте дельты формировалась лессовая равнина. В термохроны уровень бассейна слабо отличался от современного, и здесь накапливались дельтовые отложения. В результате здесь был образован мощный четвертичный чехол (до 200–300 м) лессово-дельтовых осадков [Блажний, 1954]. Мощность голоценовых дельтовых отложений – 10–25 м.

Голоценовая толща представлена чередованием более песчаных трансгрессивных и более илистых регрессивных слоев. Причины трансгрессий и регрессий уровня могли иметь как глобальный или региональный эвстатический, так и локальный тектонический характер.

Для Азовско-Черноморского бассейна выделяются следующие трансгрессивно-регрессивные ста-

дии: витязевская (8,7–7,9 тыс. л. н.), каламитская (7,9–6,8 тыс. л. н.), джеметинская (6,8–2,6 тыс. л. н.), нимфейская (2,6–0,4 тыс. л. н.), современная (0,4 тыс. л. н.). В эти этапы в бассейне Азовского моря накапливались древнеазовские, среднеазовские, казантипские, новоазовские слои соответственно. Внутри отдельных стадий выделяются по несколько фаз продолжительностью в первые сотни лет [Измайлов, 2010; Конилов, 2005; Федоров, 1982; Янко-Хомбах и др., 2011; Degens, Ross, 1972; Болиховская и др., 2014].

Голоценовая история дельты Кубани активно изучается со второй половины XIX в. [Данилевский, 1869]. Первые отрывочные сведения о дельте накапливались со времен Античности (подробнее см. [Тюнин, 2020]). Территория дельты интенсивно осваивается человеком в последние 200 лет. Здесь проживают около 290 тыс. человек. Во внутренней части дельты плодово-ягодные сады, в приморской части – несколько систем оросительных каналов, питающих рисовые поля и рыбные пруды. По периферии дельты проложены авто- и железнодорожные пути, в том

числе ведущие к Керченскому мосту и порту Кавказ. Этим обусловлен интерес к истории развития дельты, понимания ее отклика на разнонаправленные климатические изменения и колебания уровня моря.

Палеогеографические проблемы, затронутые в данной статье, – разнообразие и разнонаправленность факторов формирования голоценовых дельтовых осадков Кубани, а также причины трансгрессивно-регрессивной динамики Азово-Черноморского бассейна за последние 6 тыс. лет на фоне стабильного уровня Мирового океана [Дикарев, 2011; Fouache et al., 2012].

В июне 2021 г. авторским коллективом была совершена полевая экспедиция в дельту Кубани. Одним из районов исследования была выбрана вторичная дельта Казачьего Ерика – Переволоки.

Этот участок (рис. 1) – один из самых молодых в пределах кубанской дельты. До середины XIX в. левый рукав Кубани впадал в Витязевские лиманы (Черное море). Затем сток перераспределился, и воды данного рукава стали впадать в юго-восточный угол Ахтанизовского лимана.



Рис. 1. Район исследования, скважина KE-21

Fig. 1. Study area, core KE-21

За последующие 50 лет речные наносы интенсивно откладывались в устьевой области рукава, формируя новое дельтовое пространство, разделившее единый лиман на три отдельных водоема. Перенасыщение русла Ахтанизовского рукава наносами привело к быстрой перестройке русловой сети, и в 1911 г. основные воды левого рукава устремились в сторону Темрюка. На месте Ахтанизовского рукава ныне функционируют маловодная протока Казачий Ерик (около 1% всего расхода р. Кубань) и рукотворный канал Переволока [Богучарсков, Иванов, 1979; Данилевский, 1869].

Цель данной статьи – на основе комплексного палеогеографического анализа керна реконструировать голоценовую историю развития рельефа ключевого участка (дельта Казачьего Ерика – Переволоки) дельты Кубани.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Скважина КЕ-21 глубиной 18 м пробурена установкой ПБУ-2 с грунтоносом в Темрюкском районе Краснодарского края в 1100 м к западу от п. Октябрьский. Она расположена между Голубицкой и Центральными антиклинальными грядами Тамани, в дистальной части дельты Казачьего Ерика – Переволоки. Устье скважины расположено в 3,5 км к югу от Мал. Ахтанизовского лимана, на правом берегу Переволоки в 70 м от канала Переволоки, на плоской пойменной поверхности, задернованной гидрофильными травами.

Планово-высотное положение устья скважины ($45^{\circ}15'15.32''$ с. ш., $37^{\circ}18'24.52''$ в. д.; +0,57 м БС) определено при помощи дифференциальной системы приемников спутникового позиционирования Leica System 1200.

Бурение проводилось с полным отбором керна. Выполнено литофациальное описание (гранулометрический состав, цвет и оттенок, слоистость, включения, новообразования) и малакофаунистический анализ керна (57 образцов малакофауны).

Радиоуглеродное датирование (по шести образцам) раковин моллюсков выполнено сцинтилляционным методом в лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана Института наук о Земле СПбГУ. Значения календарного возраста получены на основании калибровочной программы OxCal 4.4.4 (калибровочная кривая IntCal 20).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Фациально-литологический анализ. В целом, разрез скважины КЕ-21 представлен дельтовой неоднородной толщей (рис. 2). Преобладает сизо-темно-серая окраска. Здесь переслаиваются песча-

нистые суглинки легкие и средние (реже супеси и пески) с иловатыми суглинками тяжелыми и глинами при господстве последних.

В интервале ниже 18,00 м (–17,43 м БС) был вскрыт обводненный рыжий песок, вероятно, представляющий русловые отложения.

В интервале 18,00–12,00 м (от –17,43 до –11,43 м БС) вскрыт слоистый материал от легких суглинков до глин сизо-темно-серых. Материал включает прослои морских раковин (в более тяжелых по составу прослоях), редкие пятна ожелезнения и в верхней части черные органогенные пятна и прослои. Слой отличался практически непрерывным осадконакоплением в спокойных и очень спокойных гидродинамических условиях. Они соответствуют сменяющим друг друга лагунам (повышение уровня) и внутريدельтовым озерам (понижение уровня) на фоне малоамплитудных осцилляций уровней Ахтанизовского лимана и Азовского моря.

В интервале 12,00–10,00 м (от –11,43 до –9,43 м БС) керн представлен материалом песчаным и сильно обводненным, вероятно, русловой фацией одной из регрессивных фаз.

В интервале 10,00–6,00 м (от –9,43 до –5,43 м БС) вскрыты тяжелые суглинки и глины сизовато-темно-серые, сильно ожелезненные, с прослоями морских раковин, редкими пятнами черными органо-генными и красными обмарганцевания.

Слой отличается осадконакоплением в очень спокойных гидродинамических условиях. Они соответствуют лагуне. Сильная ожелезненность свидетельствует о последующем длительном стратиграфическом перерыве в осадконакоплении.

В интервале 6,00–4,55 м (от –5,43 до –3,98 м БС) вскрыты тяжелые суглинки-глины сизовато-темно-серые. Материал включает прослои морских раковин, черные органогенные прослои, в кровле опесчаненные пятна, прослои и линзы ожелезнения. Данный слой отличается осадконакоплением в спокойных и очень спокойных гидродинамических условиях. Они соответствуют лагуне.

В интервале 4,55–2,00 м (от –3,98 до –1,43 м БС) вскрыты тяжелые суглинки сизовато-темно-серые с черными органогенными прослоями с линзами ожелезненного песка в кровле. Слой отличался осадконакоплением в очень спокойных гидродинамических условиях. Они соответствуют внутридельтовому озеру.

В интервале 2,00–1,05 м (от –1,43 до –0,48 м БС) находится наиболее опесчаненный слой разреза. Здесь следует выделить две субфации: 1) опесчаненный легкий – средний суглинок (интервал 2,00–1,80 м) сизовато-темно-серый; 2) пески и супеси (интервал 1,80–1,05 м) бежевые, серо-бежевые и сизо-серые сильно ожелезненные. Высокая

степень ожелезнения отражает преимущественно субаэральные условия осадконакопления. Субфация 1 отличалась относительно спокойной гидродинамикой прирусловой поймы, а наиболее песчанистая субфация 2 – активной гидродинамикой русла.

В интервале 1,05–0,00 м (от –0,48 до +0,57 м БС) сформировался пойменный легкий суглинок (интервал 1,05–0,50 м) сизо-серый с пятнами ожелезнения. В верхней части (интервал 0,50–0,00 м) пойменные осадки частично переработаны синхронными почвенными процессами – серая супесчаная пойменная почва с включением корней и черным суглинистым дерново-гумусовым горизонтом [Блюм и др., 2010; Качинский, 1958].

Малакофаунистический анализ. Малакофаунистический состав по разрезу достаточно однороден. Преобладают эвригалинные кардииды *Cerastoderma glaucum*. Их дополняют моллюски,

предпочитающие небольшие глубины и солоноватоводные условия (10–18%), – редкие митилиды *Mytilus galloprovincialis*, брюхоногие церитиды *Bittium reticulatum*, очень редкие донациды *Donax trunculus* и брюхоногие нассариды *Tritia reticulata* (рис. 3).

В интервале 18,00–12,00 м раковины достаточно редки – 0,15% от общей массы (в наиболее богатом прослое 15,07–14,00 м – 0,6% от общей массы). Здесь доминируют *Cerastoderma glaucum* (80%), заметны *Bittium reticulatum* (12%), остальных видов 1–4% для каждого.

Интервал 10,00–6,00 м наиболее богат малакофауной – 1,3% от общей массы (в наиболее богатых прослоях 9,10–8,75 и 8,00–7,73 м – 8–9% от общей массы). Здесь также доминируют *Cerastoderma glaucum* (77%), максимально велика доля *Bittium reticulatum* (21%), *Donax trunculus* очень редки (2%), *Mytilus galloprovincialis* и *Tritia reticulata* единичны (<1%).

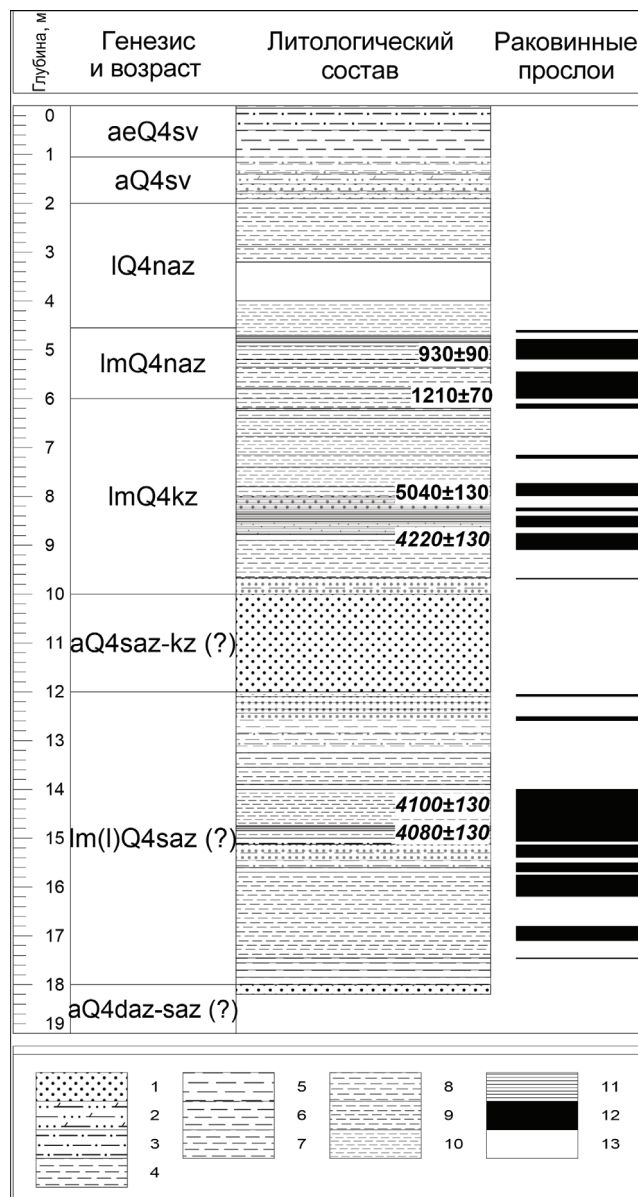


Рис. 2. Фациально-литологический разрез KE-21. Условные обозначения: 1 – песок; 2 – песок и супесь; 3 – супесь; 4 – суглинок; 5 – легкий суглинок; 6 – легкий–средний суглинок; 7 – средний суглинок; 8 – средний–тяжелый суглинок; 9 – тяжелый суглинок; 10 – тяжелый суглинок–глина; 11 – глина; 12 – детритово-раковинный прослой; 13 – пропуск керна. Стратиграфические подразделения: Q4sv – современный слой; Q4naz – новоазовский (нимфейский) слой; Q4kz – казантипский (джеметинский) слой; Q4saz-kz – среднеазовско-казантипский (джеметинско-каламитский) слой; Q4saz – среднеазовский (каламитский) слой; Q4daz-saz – древнеазовско-среднеазовский (витязевско-каламитский) слой. Генезис: а – русло; ae – пойма и почва; l – озеро; Im – лагуна. Радиоуглеродные калиброванные даты (лет): прямым шрифтом – достоверные, курсивным – недостоверные

Fig. 2. Lithology log of KE-21 core. Legend: 1 – sand; 2 – sand & sandy clay; 3 – sandy clay; 4 – loam; 5 – light loam; 6 – light–medium loam; 7 – medium loam; 8 – medium–heavy loam; 9 – heavy loam; 10 – heavy loam–clay; 11 – clay; 12 – shell layer; 13 – core skipping. Stratigraphy: Q4sv – present layer; Q4naz – Novoazovian (Nymphaean) layer; Q4kz – Kazantipian (Djemetian) layer; Q4saz-kz – Sredneazovian-Kazantipian (Djemetian-Kalamitian) layer; Q4saz – Sredneazovian (Kalamitian) layer; Q4daz-saz – Drevneazovian-Sredneazovian (Vityazevian-Kalamitian) layer. Genesis: a – riverbed; ae – floodplain & soil; l – lake; Im – lagoon. Radiocarbon calibrated dates (yr BP): valid, invalid



Рис. 3. Малакофаунистический состав по интервалам керна КЕ-21

Fig. 3. Malacofaunistic composition according to KE-21 core intervals

В интервале 6,00–4,55 м раковины относительно редки – 0,6% от общей массы. Здесь максимальна доля *Cerastoderma glaucum* (83%), максимально велика доля *Mytilus galloprovincialis* (12%), *Donax trunculus* и *Tritia reticulata* очень редки (2–3%), *Bittium reticulatum* не представлены вовсе [Невеская, 1963].

Радиоуглеродный анализ. Для радиоуглеродного анализа были выбраны шесть наиболее полновесных и представительных по разрезу образцов малакофауны (целые раковины).

При анализе данных датировок (табл.) заключаем следующее. Нижние три датировки указывают на заметную инверсию, так как интервалы 8,90–8,80 м, 14,40–14,20 м и 15,00–14,85 м, судя по полученным данным, имеют примерно одинаковый

возраст – около 4,0–4,2 тыс. лет. Таким образом, данные интервалы оказываются моложе интервала 8,00–7,80 м на 0,8–1,0 тыс. лет при их более низком стратиграфическом положении, что является прямым нарушением принципа Стено.

Также против достоверности датировок ЛУ-10483, ЛУ-10484 и ЛУ-10485 их практически одинаковый возраст (в пределах погрешности измерений). Крайне маловероятно, что более шести метров осадков (интервал 15,00–8,90 м) отложились почти одновременно, несмотря на высокие темпы седиментации, характерные для дельт. Вероятнее всего, данные датировки были омоложены. Причиной этого могло стать слабое постседиментационное ожелезнение материала, наблюдавшееся в раковинных прослоях.

Таблица

Результаты радиоуглеродного датирования, скважина КЕ-21

Лабораторный номер	Интервал керна, м	Радиоуглеродный возраст, лет	Калиброванный возраст, кал. лет
ЛУ-10480	5,20–5,00	1030±70	930±90
ЛУ-10481	6,00–5,85	1300±70	1210±70
ЛУ-10482	8,00–7,80	4400±80	5040±130
ЛУ-10483	8,90–8,80	3820±90	4220±130
ЛУ-10484	14,40–14,20	3730±90	4100±130
ЛУ-10485	15,00–14,85	3720±90	4080±130

Примечание: 930±90 – достоверная датировка; 4080±130 – недостоверная датировка (инверсия)

Датировка ЛУ-10482 (около 5,0 тыс. л. н.) вызывает доверие, так как интервал 8,00–7,80 м не нарушен и не имеет следов эпигенетических преобразований. Здесь можно было бы предположить удревнение датировки (нижележащие даты моложе) за счет переотложения материала, но это крайне маловероятно, так как глинистый состав осадка свидетельствует об очень спокойных условиях седиментации. Вдобавок вышележащий интервал

7,40–6,00 м весьма ожелезнен, что свидетельствует о последующем длительном стратиграфическом перерыве. В итоге, интервал 8,00–7,80 м имеет джемтинский возраст. Датировки ЛУ-10481 и ЛУ-10480 относительные молодые (0,9–1,2 тыс. лет), что вполне возможно предположить с учетом высокой скорости осадконакопления для дельт и меньшей усадкой суглинистых грунтов для верхних слоев по сравнению с нижними горизонтами [Блюм и др., 2010].

Средняя скорость седиментации, таким образом, за последние 1,2 тыс. лет составила не менее 5,0 мм/год, за интервал между 0,9 и 1,2 тыс. лет – не менее 2,53,5 мм/год, за последние 0,9 тыс. лет – около 5,5 мм/год. Данные темпы могли быть и больше с учетом усадки пластичных суглинистых и глинистых грунтов.

В итоге, песок в интервале ниже 18,00 м имеет наиболее неопределенный возраст – не старше витязевского (8,7–7,9 тыс. лет) и не моложе джеметинского (5,0 тыс. лет). Вероятно, он сформировался в одну из регрессий – в предвитязевскую (8,7 тыс. л. н.), в витязевско-каламитскую (7,9 тыс. л. н.) или даже в каламитско-джеметинскую (6,8 тыс. л. н.). С учетом возможных темпов седиментации это может быть любой интервал, хотя вряд ли темпы осадконакопления были максимальными, что указывает на относительно древний возраст (скорее витязевско-каламитский или даже предвитязевский). Вдобавок, песок сильно ожелезнен, что отвечает субаэральной постседиментационной обстановке и указывает на стратиграфический перерыв.

Интервал 18,00–12,00 м с наибольшей вероятностью стоит отнести либо к каламитскому (7,9–6,8 тыс. л. н.), либо к раннеджеметинскому времени (6,8–5,0 тыс. л. н.). В пользу первой версии – относительно низкое стратиграфическое положение интервала и большая мощность (6 м). В пользу второй – очень близкий состав малакофауны с интервалом 10,00–6,00 м, схожая литология осадка и слабое в целом ожелезнение, что указывает на быстрое и практически непрерывное осадконакопление.

Интервал 12,00–10,00 м полностью выпал из стакана грунтоноса, поэтому его возраст можно установить только из стратиграфического положения – старше 5,0 тыс. лет. Скорее всего, он относится либо к джеметинско-каламитской регрессии (6,8 тыс. л. н.), либо к одной из раннеджеметинских регрессивных фаз (период 6,8–5,0 тыс. л. н.).

Интервал 10,00–6,00 м имеет джеметинский возраст (около 5,0 тыс. лет), а интервал 6,00–4,55 м – установленный нимфейский возраст (0,9–1,2 тыс. л. н.) по данным радиоуглеродного анализа.

Интервал 4,55–2,00 м не старше 0,9 тыс. л. н. и не моложе середины XIX в. – в целом поздненимфейский возраст. Средняя скорость осадконакопления – 3,3 мм/год.

Пески и супеси интервала 2,00–1,05 м, скорее всего, синхронны периоду основного функционирования Ахтанизовской дельты (1860-е – 1911 г.). Таким образом, средняя скорость осадконакопления здесь могла достигать в эти 50 лет рекордных 19 мм/год.

Интервал 1,05–0,00 м, вероятнее всего, накопился после прорыва р. Кубани к Темрюку – за послед-

ние 110 лет (1911–2021 гг.). Средняя скорость седиментации в таком случае составляла в это время 9,5 мм/год [Богучарсков, Иванов, 1979].

Обсуждение. В итоге, история развития данного участка представляется следующей. В витязевское время (8,7–7,9 тыс. л. н.) Азовское море впервые достигло данной территории, однако эти отложения, скорее всего, не были вскрыты скважиной КЕ-21. Во время витязевско-каламитской регрессии (7,9 тыс. л. н.) море сильно отступило, и на этом участке, вероятно, протекал один из рукавов Кубани (интервал ниже 18,00 м).

В каламитское время (7,9–6,8 тыс. л. н.) уровень моря вновь поднялся – здесь накапливались дельтовые осадки (интервал 18,00–12,00 м). Уровень моря в это время не был стабильным – при положительных осцилляциях здесь формировалась солончатоводная лагуна, при отрицательных – внутريدельтовое озеро. В каламитско-джеметинскую регрессию (около 6,8 тыс. л. н.) море вновь отступило – и, вероятно, в районе участка КЕ-21 вновь протекал один из рукавов Кубани (интервал 12,00–10,00 м).

В раннеджеметинское время (6,8 – после 5,0 тыс. л. н.) уровень вновь поднялся, и здесь формировалась лагуна. В позднеджеметинско-ранненимфейское время (после 5,0–1,2 тыс. л. н.) берег лагуны из-за интенсивного осадконакопления отступил – господствовали субаэральные условия.

В поздненимфейское время Ахтанизовский лиман затопил участок КЕ-21 – сначала формировалась лагуна (1,2–0,9 тыс. л. н.; интервал 6,00–4,55 м), а затем внутريدельтовое озеро (0,9–0,15 тыс. л. н.; интервал 4,55–2,00 м).

С 1860-х по 1911 г. главный левый рукав Кубани впадал в юго-восточный угол Ахтанизовского лимана – на участке КЕ-21 функционировала одна из его побочных протоков, здесь было ее русло или прирусловая пойма.

После перестройки русловой сети Кубани в 1911 г. на данном участке формируется пойма, частично перерабатываемая почвенными процессами.

Следует отметить, что современные высотные отметки нимфейских, джеметинских и тем более древних слоев не отражают реальные синхронные уровни Азово-Черноморского бассейна. С одной стороны, они накапливались на дне мелких водоемов ниже синхронного им уровня моря. С другой стороны, Ахтанизовский лиман и прилегающие территории занимают синклиналь, которая испытывает погружение. Это погружение компенсируется интенсивным осадконакоплением с учетом заметной усадки суглинистых и глинистых грунтов. Таким образом, отметки различных слоев оказались на несколько метров ниже, чем во время их формирования [Богучарсков, Иванов, 1979; Михайлов и др., 2010].

ВЫВОДЫ

В пределах участка КЕ-21 в голоцене сформировалась современная дельтовая толща из двух серий переслаивающихся темноцветных органогенных озерно-лагунных суглинков и глин со светлыми аллювиальными песками и супесями (реже легкими суглинками) с преобладанием первых.

В солоноватых условиях лагун среди малакофауны господствовали *Cerastoderma glaucum* с редкими *Mytilus galloprovincialis* и *Bittium reticulatum*, единичными *Donax trunculus* и *Tritia reticulata*, озерные и аллювиальные фации «немые».

Озерно-лагунные фации имеют нимфейский, джеметинский и, вероятно, каламитский возраст,

они чередуются с русловыми фациями современно-го и, вероятно, каламитско-джеметинского и витязевско-каламитского возрастов.

В толще разреза отражено практически непрерывное осадконакопление, за исключением стратиграфического перерыва в позднеджеметинско-раннимимфейское время, когда здесь господствовали континентальные условия (после 5,0–1,2 тыс. л. н.), – разделяет витязевско-раннеджеметинскую и позднеимфейско-современную серию осадков.

Средняя скорость осадконакопления за последние 1,2 тыс. лет около 5 мм/год, максимальная – до 19 мм/год (1860-е – 1911).

Благодарности. Экспедиционные исследования и начальные этапы аналитической работы были выполнены в рамках проекта РФФИ № 20-35-90067. Авторы искренне признательны профессору, зав. НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена (МГУ) Т.А. Яниной за финансовую поддержку и помощь в организации полевых работ. Наша благодарность профессору Х.А. Арсланову за радиоуглеродное датирование раковинного материала, а также водителю экспедиции Ю.В. Рымару и коллективу ООО «ГРИС» (г. Темрюк).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Благоволин Н.С. Геоморфология Керченско-Таманской области. М.: Академия наук СССР, 1962. 191 с.
- Блажний Е.С. Геоморфология и основные моменты геологической истории низовьев Кубани в позднечетвертичное время // Труды Кубанского сельхоз. ин-та. 1954. № 1(29). С. 150–167.
- Блюм Н.С., Болиховская Н.С., Большаков В.А., Глушанкова Н.И., Каплин П.А., Ключиткина Т.С., Маркова А.К., Николаев С.Д., Новичкова Е.А., Полякова Е.И., Порохов А.В., Свиточ А.А., Судакова Н.Г., Талденкова Е.Е., Фаустов С.С., Янина Т.А. Методы палеогеографических реконструкций. М.: Географический факультет МГУ, 2010. 430 с.
- Богучарсков В.Т., Иванов А.А. Дельта Кубани. Ростов н/Д.: Ростовский университет, 1979. 108 с.
- Болиховская Н.С., Порохов А.В., Кайтамба М.Д., Фаустов С.С. Развитие природной среды и климата на территории Черноморской дельты Кубани в последние 7 тысяч лет // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2014. № 1. С. 64–74.
- Данилевский Н.Я. Исследования о Кубанской дельте // Записки Русского географического общества. 1869. № 2. С. 1–138.
- Дикарев В.А. О фанаторийской регрессии Черного моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2011. № 1. С. 35–40.
- Измайлов Я.А. Позднеголоценовые морские береговые валы в дельте реки Кубани // Черноморский регион в условиях глобальных изменений климата: закономерности развития природной среды за последние 20 тыс. лет и прогноз на текущее столетие. 2010. С. 71–78.
- Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: Академия наук СССР, 1958. 191 с.
- Коников Е.Г. Колебания уровня Азово-Черноморского бассейна и миграция береговой линии в новозвксине и голоцене // Геология и полезные ископаемые мирового океана. 2005. № 2. С. 68–76.
- Михайлов В.Н., Магрицкий Д.В., Иванов А.А. Гидрология дельты и устьевого взморья Кубани. М.: ГЕОС, 2010. 728 с.
- Невесская Л.А. Определитель двустворчатых моллюсков морских четвертичных отложений Черноморского бассейна. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 211 с.
- Сафронов И.Н. Палеогеоморфология Северного Кавказа. М.: Недра, 1972. 158 с.
- Сидоренко А.В. Геология СССР. Северный Кавказ. Т. IX. М.: Недра, 1968. 760 с.
- Тюнин Н.А. Дельта Кубани: с древнейших времен до начала XX века // Природа. 2020. № 8. С. 48–62.
- Федоров П.В. Последлениковская трансгрессия Черного моря и проблема изменения уровня океана за последние 15 000 лет // Колебания уровня морей и океанов за последние 15 000 лет. М.: Наука, 1982. С. 151–155.
- Янко-Хомбах В.В., Смынтына Е.В., Кадури С.В., Ларченков Е.П., Мотненко И.В., Какаранза С.В., Киосак Д.В. Колебания уровня Черного моря и адаптационная стратегия древнего человека за последние 30 тыс. лет // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2011. № 2. С. 61–94.
- Degens E.T., Ross D.A. Chronology of the Black Sea over the last 25,000 years, *Chemical Geology*, 1972, no. 10.1, p. 1–16.
- Fouache E., Kelterbaum D., Brückner H., Lericolais G., Porotov A., Dikarev V. The Late Holocene evolution of the Black Sea – a critical view on the so-called Phanagorian regression, *Quaternary International*, 2012, no. 266, p. 162–174.

Поступила в редакцию 07.04.2022

После доработки 01.05.2022

Принята к публикации 13.05.2022

THE KAZACHI YERIK-PEREVOLOKA SECTION (THE KUBAN RIVER DELTA) IN THE HOLOCENE

N.A. Tyunin¹, V.R. Belyaev², D.M. Lobacheva³, D.V. Semikolennykh⁴

^{1–3} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

⁴ Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Evolutionary Geography

¹ Department of Geomorphology and Paleogeography, Ph.D. student; e-mail: nictun@mail.ru

² Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography;
e-mail: vladimir.r.belyaev@gmail.com

³ Department of Geomorphology and Paleogeography, Ph.D. student; e-mail: lob.dascha@yandex.ru

⁴ Ph.D. student; e-mail: dasha.semikolennykh@gmail.com

The evolution of a key area of the Kuban River Delta was studied. The core of the borehole KE-21 (18 m in depth) from the southwestern part of the Kuban River Delta (Kazachi Yerik-Perevoloka section) was studied by the complex of methods (lithological and malacological analysis, radiocarbon dating). The KE-21 section contains the Vityazevian-Dzhemetian (>5,0 ka BP) and Nymphaean-recent (1,2–0,0 thousand years ago) sediment sequences of alternating lacustrine-lagoonal (dark-colored loams and clays) and alluvial sediments (light sands and sandy clays). The sequences are divided by a period of terrestrial evolution of the area under study during 5,0–1,2 ka BP. The brackish-water lagoons contained mollusk shells from 5 species, such as *Cerastoderma glaucum* (majority), *Mytilus galloprovincialis* and *Bittium reticulatum* (few), *Donax trunculus* and *Tritia reticulata* (single). There are no significant differences between each laminae in mollusk shell composition and percentage. The contemporary position of the layers does not reflect the synchronous levels of the Sea of Azov and the Akhtaniz estuary, principally due to local tectonic subsidence and clay shrinkage. The average sedimentation rate over the last 1,2 ka is about 5 mm/year, the max sedimentation rate is 19 mm/year (1860–1911).

Keywords: the Kuban River delta, Akhtaniz estuaries, facial analysis, core drilling, mollusks, radiocarbon dating, paleogeography, geomorphology

Acknowledgements. Field research and the initial stages of analytical work were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 20-35-90067). The authors are sincerely grateful to Prof. T.A. Yanina, the Head of the MSU Laboratory of Recent Deposits and Paleogeography of the Pleistocene, for the help in the organization and carrying out field works. Our gratitude goes to Professor H.A. Arslanov for radiocarbon dating of shell material, as well as to Yu.V. Rymar and the staff of the LLC “GRIS” (Temryuk).

REFERENCES

- Blagovolin N.S. *Geomorphologiya Kerchensko-Tamanskogo regiona* [Geomorphology of the Kerch-Taman region], Moscow, Publishing house Acad. sciences of the USSR, 1962, 191 p. (In Russian)
- Blazhniy E.S. Geomorphologiya i kluchevye momenty geologicheskoy istorii nizov'yev Kubani v pozdnechetvertichnoe vremya [Geomorphology and the keynotes of the geological history of the Lower Kuban River in the Late Quaternary], *Notes of the Kuban Agriculture Institute*, 1954, no. 1(29), p. 150–167. (In Russian)
- Blum N.S., Bolikhovskaya N.S., Bolshakov V.A., Glushakova N.I., Kaplin P.A., Klyuvitkina T.S., Markova A.K., Nikolaev S.D., Novichkova E.A., Polyakova E.I., Porotov A.V., Svitoch A.A., Sudakova N.G., Taldenkova E.E., Faustov S.S., Yanina T.A. *Metody paleogeograficheskikh rekonstruktsiy* [Methods of paleogeographic reconstructions], Moscow, Faculty of Geography of Moscow State University, 2010, 430 p. (In Russian)
- Bogucharskov V.T., Ivanov A.A. *Del'ta Kubani* [Kuban River delta], Rostov-on-Don, Rostov University, 1979, 108 p. (In Russian)
- Bolikhovskaya N.S., Porotov A.V., Kaitamba M.D., Faustov S.S. Razvitie prirodnoy sredy i klimata na territorii Chernomorskoj delty Kubani v poslednie 7 tysyach let [Development of environment and climate on the Black Sea delta of the Kuban river during the last 7 ky], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2014, no. 1, p. 64–74. (In Russian)
- Danilevsky N.Ya. Zapiski o Kubanskoy del'te [Research on the Kuban River Delta], *Notes of the Russian Geographical Society*, 1869, no. 2, p. 1–138. (In Russian)
- Degens E.T., Ross D.A. Chronology of the Black Sea over the last 25,000 years, *Chemical Geology*, 1972, no. 10.1, p. 1–16.
- Dikarev V.A. O fanagoriyskoy regressii Chernogo morya [About Phanagorian regression of the Black Sea], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2011, no. 1, p. 35–40. (In Russian)
- Fedorov P.V. [Postglacial transgression of the Black Sea and the problem of ocean level change over the past 15 000 years], *Kolebaniya urovnya morej i okeanov za poslednie 15 000 let* [Fluctuations in the level of seas and oceans over the past 15 000 years], 1982, p. 151–155. (In Russian)
- Fouache E., Kelterbaum D., Brückner H., Lericolais G., Porotov A., Dikarev V. The Late Holocene evolution of the Black Sea – a critical view on the so-called Phanagorian regression, *Quaternary International*, 2012, no. 266, p. 162–174.
- Izmailov Ya.A. [Late Holocene coastal bars in the Kuban River delta], *Chernomorskij region v usloviyah globalnykh*

- izmenenij klimata: zakonomernosti razvitiya prirodnoj sredy za poslednie 20 tys. let i prognoz na tekushee stoletie* [The Black Sea region in the context of global climate changes in the development of the natural environment over the past 20 thousand years and forecast for the current century], 2010, p. 71–78. (In Russian)
- Kachinsky N.A. *Mekhanicheskiy i mikroagregatnyy sostav pochv, metody ikh izucheniya* [Mechanical and microaggregate composition of the soil, methods of its study], Moscow, Publishing house Acad. sciences of the USSR, 1958, 191 p. (In Russian)
- Konikov E.G. Kolebaniya urovnya Azovo-Chernomorskogo basseyna i migratsiya beregovoy linii v novoevksine i golotsene [Fluctuations in the level of the Azov-Black Sea basin and migration of the coastline in the Neoeuxinian and Holocene], *Geology and minerals of the world ocean*, 2005, no. 2, p. 68–76. (In Russian)
- Mikhailov V.N., Magritsky D.V., Ivanov A.A. *Gidrologiya del'ty i ust'evogo vzmor'ya Kubani* [Hydrology of the delta and estuary coast of the Kuban River], Moscow, GEOS Publ., 2010, 728 p. (In Russian)
- Nevesskaya L.A. *Opredelitel' dvustvorchatykh molluskov morskikh chetvertichnykh otlozheniy Chernomorskogo basseyna* [The index of bivalve mollusks of marine Quaternary sediments of the Black Sea basin], Moscow, Publishing house Acad. sciences of the USSR, 1963, 211 p. (In Russian)
- Safronov I.N. *Paleogeomorfologiya Severnogo Kavkaza* [Paleogeomorphology of the North Caucasus], Moscow, Nedra Publ., 1972, 158 p. (In Russian)
- Sidorenko A.V. *Geologiya SSSR. Severnyy Kavkaz*, t. IX [Geology of the USSR. North Caucasus, vol. IX], Moscow, Nedra Publ., 1968, 760 p. (In Russian)
- Tyunin N.A. Del'ta Kubani: s drevneyshikh vremyon do nachala XX veka [The Kuban River delta: from the Antiquity to the early 20th century], *Priroda*, 2020, no. 08, p. 48–62. (In Russian)
- Yanko-Khombakh V.V., Smyntyna E.V., Kadurin S.V., Larchenkov E.P., Motnenko I.V., Kakaranza S.V., Kiosak D.V. Kolebaniya urovnya Chernogo morya i adaptatsionnaya strategiya drevnego cheloveka za poslednie 30 tysyach let [Fluctuations in the level of the Black Sea and the adaptive strategy of ancient humans for the last 30 thousand years], *Geology and minerals of the World Ocean*, 2011, no. 2, p. 61–94. (In Russian)

Received 07.04.2022

Revised 01.05.2022

Accepted 13.05.2022

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ С УЧАСТИЕМ РЕЛИКТОВОГО ВИДА КАРАГАНЫ ГРИВАСТОЙ В ЮЖНОМ ПРИБАЙКАЛЬЕ

А.Г. Чурюлина¹, М.В. Бочарников²^{1,2} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра биогеографии¹ Канд. геогр. наук; e-mail: agchurylina@gmail.com² Доц., канд. геогр. наук; e-mail: maxim-msu-bg@mail.ru

Составлена аналитическая фитоэкологическая карта растительных сообществ с различным вероятным участием редкого реликтового вида караганы гривастой (*Caragana jubata* (Pall.) Poir.) в Южном Прибайкалье (масштаб 1:550 000). За основу взят оригинальный полевой материал – местонахождения караганы гривастой с известным проективным покрытием (%), которое создают ее популяции в сообществах. Карта является результатом регрессионной модели и составлена с использованием данных цифровой модели рельефа и летних космических снимков Landsat-8 (NASA, USGS), покрывающих территорию исследования. В основу легенды карты положена географо-генетическая классификация растительности, использованная в легенде карты «Растительность юга Восточной Сибири». Выявлено возможное распространение сообществ с различным участием караганы гривастой в Южном Прибайкалье в связи с дифференциацией экологических условий горных склонов разных высотных поясов. Пригодными местообитаниями караганы гривастой здесь являются крутые (до 25–30°) каменистые склоны в горнотаежном и высокогорных поясах. Самостоятельные сообщества вид образует в подгольцовом поясе, характерными спутниками выступают *Dasiphora tenuifolia*, *Betula fruticosa*, *Carex pediformis* и др. Наибольшее сосредоточение редких сообществ с участием караганы гривастой приурочено к высокогорьям (1800–2000 м над уровнем моря), что подтверждает горный характер этого реликтового вида. По мере уменьшения отметок абсолютных высот снижается степень проективного покрытия вида в составе растительных сообществ. Карта передана в Тункинский национальный парк и может служить основой для разноплановых исследований в области сохранения редких видов растений и редких растительных сообществ региона.

Ключевые слова: редкий вид, фитоэкологическая карта, регрессионная модель, мониторинг состояния, охрана редких фитоценозов

DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-149-156

ВВЕДЕНИЕ

Эколого-географический подход к изучению ботанического разнообразия позволяет выявить закономерности пространственной организации растительного покрова гор Сибири [Огуреева, 2012]. Особенно важным является учет редких и уязвимых видов растений, сохранение их местообитаний. Охрана редких видов в рамках глобального поддержания биологического разнообразия предусматривает сохранение сообществ, элементами которых они являются [Зеленая книга Сибири..., 1996; Крестов, Верхолат, 2002; Бойков, 2005].

Оценить потенциальное распространение редких видов и их приуроченность к различным местообитаниям в настоящее время стало возможным благодаря развитию и усовершенствованию современных технологий. Моделирование потенциальных ареалов, а также построение прогнозных моделей распространения вида в зависимости

от различных факторов применяются в международных [Ward, 2007; Zhang et al., 2018] и российских [Санданов, Найданов, 2015; Чурюлина, Бочарников, 2019а, 2019б; Чурюлина, 2020] исследованиях.

Региональное картографирование редких видов и сообществ позволяет дать объективную характеристику информации об их встречаемости в регионе. Графическое отображение позволяет проанализировать орографические и экологические особенности местообитаний, выявить закономерности географического распространения видов, является исходной информацией для оценки статуса редких видов растений и сообществ в регионе, проведения мониторинга состояния редких видов и разработки рекомендаций по их охране и сохранению местообитаний в условиях охраняемой территории [Огуреева, 1999; Емельянова, Огуреева, 2006; Новицкая, Суворов, 2016].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования. Карагана гривастая (*Caragana jubata* (Pall.) Poir.) является реликтом плиоценового периода [Комаров, 1909; Zhang et al., 2016], образует самостоятельные сообщества в подгольцовом поясе у верхней границы леса (1600–1800 м над уровнем моря), встречается в составе нижней полосы горных тундр (1800–2000 м над уровнем моря) либо спускается в горнотаежный пояс по речным долинам (1400–1600 м над уровнем моря). Реликтовая природа караганы и ее произрастание совместно с другими редкими растениями из Красной книги, образующих с ней в том числе редкие растительные сообщества, подвигли на проведение полевых исследований растительного покрова Южного Прибайкалья на базе Тункинского национального парка. Это регион оптимального произрастания вида, характеризующийся наибольшей плотностью его известных местонахождений [Чурюлина и др., 2020].

Статус Тункинского национального парка как особо охраняемой природной территории диктует необходимость картографического обеспечения мониторинга состояния редких растительных сообществ его экосистем.

Цель работы – выявление закономерностей распространения редкого реликтового вида караганы гривастой в различных типах растительности в Южном Прибайкалье в связи с дифференциацией экологических условий горных склонов разных высотных поясов.

Территория исследования. Тункинский национальный парк расположен в Тункинском районе Республики Бурятия на южных склонах хребтов Хамар-Дабан и Восточный Саян и в Тункинской котловине [Национальный..., 2021]. Часть его территории включена в состав Байкальского участка Всемирного природного наследия и расположена в центральной экологической зоне Байкальской природной территории. Согласно природному районированию [Атлас Забайкалья, 1967], выбранная территория относится к Южно-Сибирской горной области и двум провинциям: Окинско-Тункинской горнотаежно-гольцовой и Джидинско-Нижнеселенгинской котловинно-горнотаежной.

Входные данные. В основу работы положены оригинальные данные полевых исследований 2019 г. в Тункинском национальном парке, включающие местонахождения караганы гривастой с ее известным проективным покрытием в том или ином сообществе. Изучение флоры и растительности велось маршрутным методом. В силу редкости исследуемого вида и его ограниченного распространения всего удалось зафиксировать 11 мест произрастания

караганы гривастой в сообществах на различных высотных поясах (от 887 до 1961 м над уровнем моря). Эти данные были заложены в основу модели. Для корректировки полученной информации по модели были дополнительно учтены еще 64 локации караганы гривастой на исследуемой территории, взятые из литературных источников и гербарных коллекций (международные акронимы LE, MAG, MHA, MW, MWG, NS, NSK, TK, VBGI, VLA).

Схема выбранной для исследования территории с указанием местонахождений караганы гривастой, полученных в полевой сезон 2019 г. и из различных источников, представлена на рис. 1.

Методика моделирования. Результаты полевых исследований легли в основу регрессионной модели с целью построения среднемасштабной карты растительных сообществ с различным вероятным участием караганы гривастой. Вся работа условно разделена на три этапа: а) подготовительный, включающий сбор пространственных данных и расчет необходимых переменных; б) непосредственно регрессионный анализ; в) составление карты растительных сообществ с участием караганы гривастой в Тункинском национальном парке.

Пространственными данными для регрессионного анализа послужили: а) глобальная цифровая модель рельефа Shuttle radar topography mission (SRTM) с разрешением 30 м (1 arc-second for global coverage); б) мультиспектральные изображения среднего разрешения (30 м) спутника Landsat-8 [USGS, 2021]. На основе цифровой модели рельефа были рассчитаны три переменные рельефа: абсолютная высота (elevation), крутизна (slope) и экспозиция (aspect) склона. Использование спутниковых снимков позволило провести дешифрирование растительного покрова, рассчитать вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) и получить дополнительные переменные с информацией о ключевых экологических характеристиках в местах произрастания исследуемого вида (компоненты линейного преобразования Каута–Томаса – Brightness, Greenness, Wettness).

С помощью преобразования *методом главных компонент* были получены пять компонент с распределением в них основной доли информации об условиях произрастания вида на основе 13 переменных: абсолютная высота, крутизна и экспозиция склона, NDVI, Brightness, Greenness, Wettness, 2–7-й каналы спутниковых изображений, расшифровка которых приведена в таблице.

Перед началом самого регрессионного анализа была проведена *оценка корреляционной зависимости* переменной проективного покрытия вида с переменными рельефа (высота, крутизна и экспозиция склона), каналами спутникового изображения

(2–7-й), вегетационным индексом (NDVI), компонентами линейного преобразования Каута–Томаса (Brightness, Greenness, Wetness) и результатом метода главных компонент (пять компонент). Для уменьшения неточности расчета переменные, коррелирующие между собой, были исключены.

Регрессионный анализ проведен методом билинейной интерполяции. В качестве входных данных использованы выбранные методом главных ком-

понент и с учетом корреляционных зависимостей следующие характеристики: *абсолютная высота, крутизна и экспозиция склона, Greenness, 5-я компонента*. Результатом регрессионного анализа служит модель проективного покрытия вида на выбранной территории. Статистическая оценка результатов свидетельствует о хорошем качестве регрессионной модели – коэффициент детерминации равен 0,90.

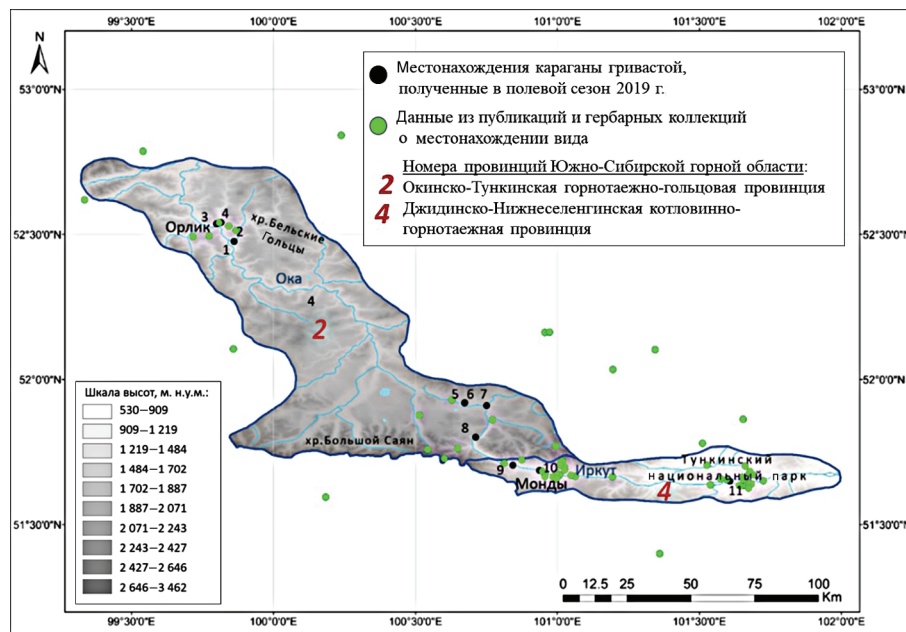


Рис. 1. Схема территории исследования с указанием ее провинций и местонахождений караганы гривастой, полученных в полевой сезон 2019 г. и из различных источников

Fig. 1. Scheme of the study area with indication of the provinces and locations of *Caragana jubata*, according to 2019 field observations and other sources

Таблица

Описание каналов спутника Landsat-8 [Learn ArcGIS, 2021]

№ канала	Название канала	Что этот канал лучше показывает
2	Blue	Глубоководья, атмосфера
3	Green	Растительность
4	Red	Антропогенные объекты, почвы, растительность
5	Near Infrared	Береговые линии, растительность
6	ShortWaveInfrared_1	Проницаемость облачности, влажность почв и растительности
7	ShortWaveInfrared_2	Улучшенная проницаемость облачности, влажность почв и растительности

Полученная регрессионная модель была перенесена на *картографическую основу*. Оценочная шкала регрессионной модели, отображающая потенциальное проективное покрытие караганы гривастой в растительных сообществах, была разбита на три

категории: низкое проективное покрытие (от 0 до 30% на пробную площадь), среднее (от 31 до 60%) и высокое (61% и более). На карте в дальнейшем при визуализации результатов использовались две последние категории – среднее и высокое потенци-

альное проективное покрытие караганы гривастой в растительных сообществах с отображением выделов участков зеленым и красным контурами соответственно. В основу легенды карты «Растительные сообщества с участием караганы гривастой...» положена географо-генетическая классификация растительности, использованная в легенде карты А.В. Белова (1972) «Растительность юга Восточной Сибири». Высшими иерархическими категориями приняты высотно-поясные подразделения расти-

тельности. В их пределах опорные картографические единицы расположены по формационному принципу. Легенда карты включает десять тематических выделов, в том числе семь для высокогорных южносибирских формаций, три – для горнотаежных (рис. 2).

Все расчеты с пространственными данными, а также нанесение результатов модели на картографическую основу произведены в программах Microsoft Office Excel, SAGA GIS и ArcGIS 10.3.1 (ESRI).

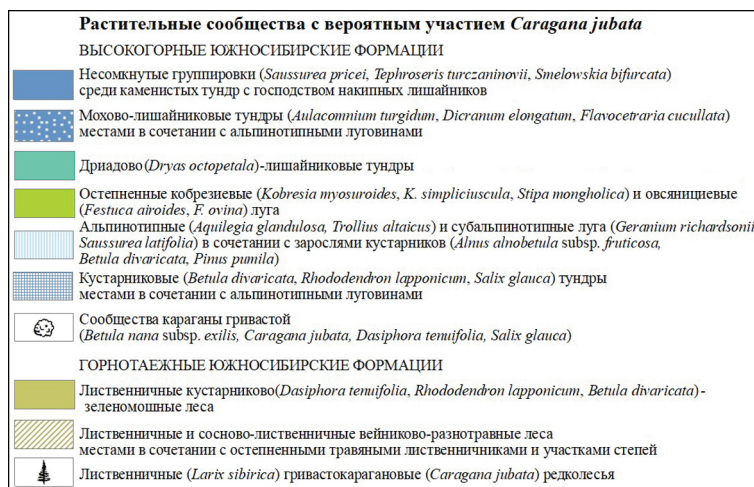


Рис. 2. Фрагмент легенды карты «Растительные сообщества с участием караганы гривастой (*Caragana jubata* (Pall.) Poir.) в Тункинском национальном парке», масштаб 1:550 000 [Чурюлина, 2021]

Fig. 2. Fragment of the legend of the map “Plant communities with *Caragana jubata* (Pall.) Poir. in the Tunkinsky National Park”, scale 1:550 000 [Churiulina, 2021]

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Составлена аналитическая фитоэкологическая карта растительных сообществ с участием караганы гривастой для территории Тункинского национального парка (Республика Бурятия) в масштабе 1:550 000. Площадь картографирования – 6907 км². Карта отображает степень потенциального проективного покрытия караганы гривастой в различных типах растительности.

Анализ среднемасштабной карты позволил выявить связь распределения растительных сообществ, в которых реликтовому виду – карагане гривастой принадлежит различная роль, с геоморфологическим строением территории и структурой растительного покрова. Наблюдаются различия в степени проективного покрытия этих сообществ между провинциями Южно-Сибирской горной области. В Джидинско-Нижнеселенгинской котловинно-горнотаежной провинции по данным модели отмечается произрастание сообществ с караганой гривастой только со средним проективным покрытием вида (от 31 до 60%) преимущественно

в листоветочных (*Larix sibirica* Ledeb.) – кустарниково (*Rhododendron lapponicum* (L.) Wahlenb., *Betula divaricata* Ledeb.)-зеленомошных лесах. В котловине, занимающей большую часть рассматриваемой провинции, вероятность произрастания редкого вида караганы гривастой возможна в составе различных растительных сообществ с проективным покрытием вида до 30%. Отображение формаций с низким проективным покрытием в них караганы гривастой в задачи исследования не входило.

Гораздо большим разнообразием местообитаний с вероятным произрастанием караганы гривастой в растительных сообществах горнотундрового и горнотаежного поясов характеризуется Окинско-Тункинская горнотаежно-гольцовая провинция. Это как дриадово (*Dryas octopetala* L.)-лишайниковые тундры и кобрезиевые (*Kobresia myosuroides* (Vill.) Fiori, *K. simpliciuscula* (Wahlenb.) Mack., *Stipa mongholica* Turcz. ex Trin.) луга в высокогорьях хребтов, так и листоветочные, сосново-листоветочные леса и редколесья на склонах невысоких хребтов и в долинах горных рек.

Значительное участие караганы гривастой в высокогорных сообществах с высоким проективным покрытием вида (61% и более) характерно для наиболее высоких горных хребтов: хребет Большой Саян (до 2500 м над уровнем моря), Тункинские гольцы (2300 м над уровнем моря) и Китойские гольцы (1800 м над уровнем моря). Здесь карагана способна образовывать самостоятельные сообщества среди каменистых и мохово-лишайниковых тундр. Сообщества с по-

тенциально высоким проективным покрытием этого редкого вида по данным модели могут произрастать в юго-западной оконечности Окинского хребта и иметь приуроченность к лиственничным и сосново-лиственничным вейниково-разнотравным лесам с участками степей.

Рассмотрим подробнее типологическое разнообразие растительного покрова национального парка на примере фрагмента карты на часть района исследования (рис. 3).

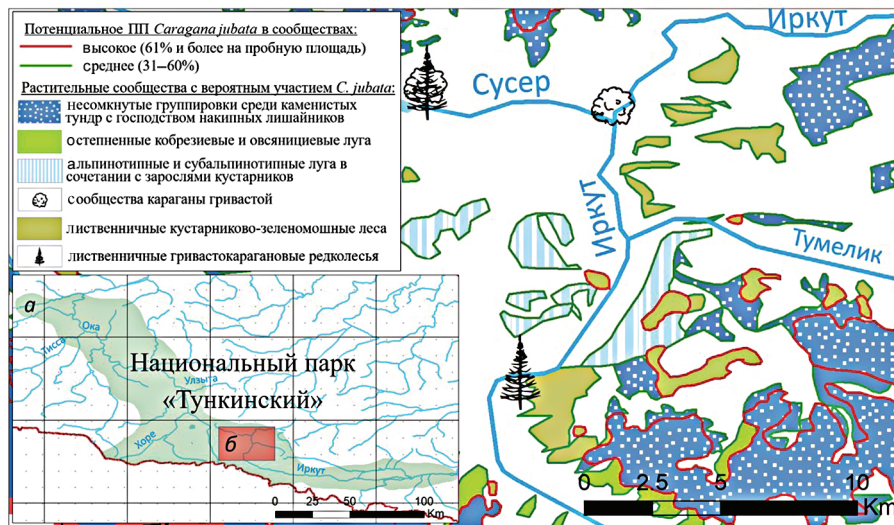


Рис. 3. Фрагмент карты «Растительные сообщества с участием караганы гривастой (*Caragana jubata* (Pall.) Poir.) в Тункинском национальном парке», масштаб 1:550 000 [Чурюлина, 2021]: а – территория картографирования; б – покрытие фрагментом карты

Fig. 3. Fragment of the map “Plant communities with *Caragana jubata* (Pall.) Poir. in the Tunkinsky National Park”, scale 1:550 000 [Churiulina, 2021]: а – mapping area; б – coverage with a map fragment

Наибольшее сосредоточение редких сообществ с вероятным участием караганы гривастой приурочено к высокогорьям, где вид имеет степень проективного покрытия более 60%. На карте эти области отмечены красным контуром – высокогорные формации мохово-лишайниковых тундр (*Aulacomnium turgidum* (Wahlenb.) Schwägr., *Dicranum elongatum* Schleich. ex Schwägr., *Flavocetraria cucullata* (Bellardi) Kärnefelt & A. Thell) местами в сочетании с альпинотипными луговинами. Сообщества со средним проективным покрытием караганы (от 31 до 60%) приурочены преимущественно к более низким позициям на склонах хребтов. На карте эти области отмечены зеленым контуром и представлены высокогорными формациями альпинотипных (*Aquilegia glandulosa* Fisch. ex Link., *Trollius altaicus* C.A. Mey) и субальпинотипных лугов (*Geranium richardsonii* Fisch. & Trautv., *Saussurea latifolia* Ledeb.) в сочетании с зарослями кустарников (*Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa* (Rupr.) Raus, *Betula divaricata*, *Pinus pumila*

(Pall.) Regel) и остепненных кобрезиевых (*Kobresia myosuroides*, *K. simpliciuscula*, *Stipa mongholica*) и овсяницеовых (*Festuca airoides* Lam., *F. ovina* L.) лугов; горнотаежной формацией лиственничных кустарниково- (*Dasiphora tenuifolia* (Willd. ex Schltdl.) Y.C. Zhu, *Rhododendron lapponicum*, *Betula divaricata*)-зеленомошных лесов.

ВЫВОДЫ

Аналитическая фитоэкологическая карта распространения сообществ с вероятным участием караганы гривастой в Южном Прибайкалье дает представление о типологическом разнообразии и их высотно-поясной приуроченности в связи с экологическими условиями местообитаний. Пригодными местообитаниями караганы гривастой здесь являются крутые (до 25–30°) каменистые склоны в горнотаежном и высокогорных поясах.

В пределах исследуемой горной территории наблюдается вероятное участие караганы гривастой

в различных растительных сообществах южносибирских формаций в разных высотных поясах: от самостоятельных карагановых зарослей в горнотундровом до лиственничных редколесий в горнотаежном поясах. Наибольшее сосредоточение редких сообществ с участием караганы гривастой приурочено к высокогорьям (1800–2000 м над уровнем моря), что подтверждает горный характер этого реликтового вида. Самостоятельные сообщества вид образует в подгольцовом поясе, характерными спутниками выступают *Dasiphora tenuifolia*, *Betula fruticosa*, *Carex pediformis* и др. По мере уменьшения отметок абсо-

лютных высот снижается степень проективного покрытия караганы в составе растительных сообществ.

Составленная карта является базовой основой для картографирования новых и уточнения уже известных местонахождений редкого вида в Тункинском национальном парке с целью мониторинга состояния редких растительных сообществ и их охраны.

Результаты исследования с приведением положенных в основу работы полных геоботанических описаний и подробным описанием процедуры построения карты методом регрессионного анализа переданы в научный отдел Тункинского национального парка.

Благодарности. Авторы выражают благодарность доценту кафедры ботаники ФГБОУ ВО Бурятского государственного университета имени Доржи Банзарова С.А. Холбоевой, а также сотрудникам Тункинского национального парка за помощь в организации полевых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Забайкалья (Бурятская АССР и Читинская область) / под ред. В.Б. Сочава, К.М. Продай-Вода, Н.Н. Таргышев. М.: Иркутск: ГУГК при Совете министров СССР, 1967. 176 с.
- Бойков Т.Г. Уникальные объекты растительного мира Центральной Сибири: разнообразие, пространственно-временное распределение, особенности и перспективы охраны. Новосибирск: Наука, 2005. 184 с.
- Емельянова Л.Г., Огуреева Г.Н. Биогеографическое картографирование: учеб. пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2006. 132 с.
- Зеленая книга Сибири: редкие и нуждающиеся в охране растительные сообщества / под ред. акад. РАН И.Ю. Коропачинского. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1996. 396 с.
- Комаров В.Л. Введение к флорам Китая и Монголии. Вып. 2: Монография рода *Caragana* // Труды Санкт-Петербургского ботанического сада. 1909. Т. 29. № 2. С. 159–319.
- Крестов П.В., Верхолат В.П. Редкие растительные сообщества Приморья и Приамурья. Владивосток: ДВО РАН, 2002. 200 с.
- Новицкая Н.И., Суворов Е.Г. Картографирование редких видов сосудистых растений Байкальского региона // Геодезия и картография. 2016. № 3. С. 17–21. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-909-3-17-21.
- Огуреева Г.Н. Эколого-географический подход к изучению разнообразия и географии наземных экосистем // Вопросы географии. Актуальная биогеография. М.: Кодекс, 2012. Т. 134. С. 58–80.
- Огуреева Г.Н. Ботанико-географический анализ и картографирование растительности гор: Россия и сопредельные территории: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М., 1999. 70 с.
- Санданов Д.В., Найданов Б.Б. Пространственное моделирование ареалов восточноазиатских видов растений: современное состояние и динамика под влиянием климатических изменений // Растительный мир Азиатской России. 2015. № 3(19). С. 30–35.
- Чурилина А.Г. Ареалы редких видов – караганы гривастой (*Caragana jubata*) и березы шерстистой (*Betula lanata*): моделирование и прогноз // Биогеография: материалы Московского городского отделения Русского географического общества. М.: ЭЙПиСиПаблишинг, 2020. С. 68–76.
- Чурилина А.Г., Бочарников М.В., Огуреева Г.Н. География караганы гривастой (сем. Бобовые) и ее фитоценотическая роль в растительном покрове гор // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 3. С. 108–117.
- Чурилина А.Г., Бочарников М.В. Ареал березы шерстистой (*Betula lanata* (Regel) V. Vassil) и влияние на него изменений климата // Ученые записки РГГМУ. 2019а. № 56. С. 133–144. DOI: 10.33933/2074-2762-2019-56-133-144.
- Чурилина А.Г., Бочарников М.В. Моделирование потенциального ареала реликтового вида (*Caragana jubata* (Pall.) Poir.) на основе климатических данных // Ученые записки РГГМУ. 2019б. № 54. С. 100–108. DOI: 10.33933/2074-2762-2019-54-100-108.
- Ward D. Modeling the potential geographic distribution of invasive ant species in New Zealand, *Biol. Invasions*, 2007, no. 9, p. 723–735, DOI: 10.1007/s10530-006-9072-y.
- Zhang K., Yao L., Meng J., Tao J. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change, *Science of The Total Environment*, 2018, no. 634, p. 1326–1334, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.112.
- Zhang M.L., Xiang X.G., Xue J.J., Sanderson S.C., Fritsch P.W. Himalayan uplift shaped biomes in Miocene temperate Asia: evidence from leguminous *Caragana*, *Scientific Reports*, 2016, no. 6, DOI: 10.1038/srep36528.
- Электронные ресурсы**
Национальный парк «Тункинский» 1991–2021. URL: <http://tunkapark.ru> (дата обращения 09.04.2021).
Learn ArcGIS. Home. URL: <https://www.esri-cis.ru/products> (дата обращения 09.04.2021).
USGS EarthExplorer. Home. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения 09.04.2021).

Поступила в редакцию 18.07.2021
После доработки 23.02.2022
Принята к публикации 13.05.2022

MAPPING OF PLANT COMMUNITIES WITH THE RELICT SPECIES *CARAGANA JUBATA* IN THE SOUTHERN BAIKAL REGION

A.G. Churyulina¹, M.V. Bocharnikov²

^{1,2} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Biogeography*

¹ *Ph.D. in Geography; e-mail: agchurylina@gmail.com*

² *Associate professor, Ph.D. in Geography, e-mail: maxim-msu-bg@mail.ru*

An analytical phytoecological map of plant communities with various probable participation of a rare relict species *Caragana jubata* (Pall.) Poir. in the southern Baikal region has been compiled at scale 1:550 000. The original field material was taken as a basis, i. e. the locations with known projective cover (%) of *C. jubata* within biocenoses. The map is the result of a regression model. It was compiled using the data of Shuttle radar topography mission (SRTM) and Landsat-8 summer images (NASA, USGS) covering the study area. The map legend is based on the genetic-geographical classification of vegetation used in the legend of the map "Vegetation of the south of Eastern Siberia". The map revealed possible distribution of communities with different participation of *C. jubata* in the southern Baikal region which depends on the ecological conditions of mountain slopes within different altitudinal belts. Suitable habitats for *C. jubata* are steep (up to 25–30°) rocky slopes in the mountain-taiga and high-mountain belts. The species forms its own communities in the subalpine belt; *Dasiphora tenuifolia*, *Betula fruticosa*, *Carex pediformis* are the most typically plants growing with *C. jubata*. The highest concentration of rare communities with *C. jubata* is within high mountains (1800–2000 m above sea level), thus proving the mountainous nature of the relic species. The projective cover of the species in the composition of plant communities decreases while the absolute heights become lower. The map was conveyed to the Tunkinsky National Park and could be a basis for diverse research in the field of conservation of rare plant species and rare plant communities in the region.

Keywords: rare plant species, phytoecological map, regression model, environmental monitoring, protection of rare phytocenoses

Acknowledgements. The authors are grateful to S.A. Holboeva, Associate Professor of the Department of Botany, Dorzhi Banzarov Buryat State University, and to the staff of the Tunkin National Park for their assistance in the organization of field work.

REFERENCES

- Atlas Zabajkal'ya (Buryatskaya ASSR i Chitinskaya oblast')* [Atlas of Transbaikalia (Buryat ASSR and Chita region)], V.B. Sochava, K.M. Prodaj-Voda, N.N. Tartyshev (eds.), Moscow, Irkutsk, General Directorate of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers USSR Publ., 1967, 176 p. (In Russian)
- Boikov T.G. *Unikal'nye ob'ekty rastitel'nogo mira Tsentral'noi Sibiri: raznoobrazie, prostranstvenno-vremennoe raspredelenie, osobennosti i perspektivy okhrany* [Unique objects of vegetation of Central Siberia: diversity, spatial-temporal distribution, features and prospects of protection], Novosibirsk, Nauka Publ., 2005, 184 p. (In Russian)
- Churyulina A.G., Bocharnikov M.V. Areal berezy sherstistoi (*Betula lanata* (Regel) V. Vassil) i vliyanie na nego izmenenii klimata [The range of *Betula lanata* (Regel) V. Vassil under the impact of climate change], *Uchenye zapiski RGGMU*, 2019a, no. 56, p. 133–144, DOI: 10.33933/2074-2762-2019-56-133-144. (In Russian)
- Churyulina A.G. [Areas of rare species *Caragana jubata* and *Betula lanata*: modeling and forecast], *Biogeografiya: materialy Moskovskogo gorodskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva* [Proc. of Biogeography: materials of the Moscow City Branch of the Russian Geographical Society], Moscow, APCPublishing, 2020, p. 68–76. (In Russian)
- Churyulina A.G., Bocharnikov M.V. Modelirovanie potencial'nogo areala reliktoвого vida (*Caragana jubata* (Pall.) Poir.) na osnove klimaticheskikh dannykh [Modeling the potential range of a relict species (*Caragana jubata* (Pall.) Poir.) basing on the climate data], *Uchenye zapiski RGGMU*, 2019b, no. 54, p. 100–108, DOI: 10.33933/2074-2762-2019-54-100-108. (In Russian)
- Churyulina A.G., Bocharnikov M.V., Ogureeva G.N. Geografiya karagany grivastoi (sem. Bobovye) i ee fitocenoticheskaya rol' v rastitel'nom pokrove gor [Geography of *Caragana jubata* (Fabaceae) and its phytocenotic role in the vegetation cover of mountains], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 3, p. 108–117. (In Russian)
- Emel'yanova L.G., Ogureeva G.N. *Biogeograficheskoe kartografirovaniye: uchebnoye posobie* [Biogeographic Mapping: A Study Guide], Moscow, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University Publ., 2006. 132 p. (In Russian)
- Komarov V.L. Vvedenie k floram Kitaya i Mongolii, vyp. 2, Monografiya roda Caragana [Introduction to the Floras of China and Mongolia, iss. 2, Monograph of the genus Caragana], *Trudy Sankt-Peterburgskogo botanicheskogo sada*, 1909, no. 29(2), p. 159–319. (In Russian)
- Krestov P.V., Verholat V.P. *Redkie rastitel'nye soobshchestva Primor'ya i Priamur'ya* [Rare plant communities of Primorsky Krai and Russian Manchuria], Vladivostok,

- Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2002, 200 p. (In Russian)
- Novickaya N.I., Suvorov E.G. Kartografirovaniye redkikh vidov sosudistyykh rastenii Baikal'skogo regiona [Mapping of rare species of vascular plants of the Baikal region], *Geodeziya i kartografiya*, 2016, no. 3, p. 17–21, DOI: 10.22389/0016-7126-2016-909-3-17-21. (In Russian)
- Ogureeva G.N. *Botaniko-geograficheskij analiz i kartografirovaniye rastitel'nosti gor: Rossiya i sopredel'nye territorii* [Botanical-geographical analysis and mapping of mountain vegetation: Russia and adjacent territories], Extended Abstract of D.Sc. Thesis in Geography, Moscow, 1999. 70 p. (In Russian)
- Ogureeva G.N. Ekologo-geograficheskij podhod k izucheniyu raznoobraziya i geografii nazemnykh ekosistem [Ecological-geographical approach in studying the diversity and geography of terrestrial ecosystems], *Voprosy geografii. Aktual'naya biogeografiya*, Moscow, Kodeks Publ., 2012, no. 134, p. 58–80. (In Russian)
- Sandanov D.V., Najdanov B.B. Prostranstvennoe modelirovaniye arealov vostochno-aziatskikh vidov rastenii: sovremennoe sostoyaniye i dinamika pod vliyaniem klimaticheskikh izmenenii [Spatial modeling of the ranges of East Asian plant species: current state and dynamics under the influence of climate change], *Rastitel'nyy mir Aziatskoj Rossii*, 2015, no. 3(19), p. 30–35. (In Russian)
- Ward D. Modeling the potential geographic distribution of invasive ant species in New Zealand, *Biol. Invasions*, 2007, no. 9, p. 723–735, DOI: 10.1007/s10530-006-9072-y.
- Zelenaya kniga Sibiri: redkie i nuzhdayushchiesya v okhrane rastitel'nye soobshchestva* [Green Book of Siberia: rare and endangered plant communities], I.Yu. Koropachinskii (ed.), Novosibirsk, Nauka Publ., Sibirskaya izdatel'skaya firma Russian Academy of Science Publ., 1996, 396 p. (In Russian)
- Zhang K., Yao L., Meng J., Tao J. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change, *Science of the Total Environment*, 2018, no. 634, p. 1326–1334, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.112.
- Zhang M.L., Xiang X.G., Xue J.J., Sanderson S.C., Fritsch P.W. Himalayan uplift shaped biomes in Miocene temperate Asia: evidence from leguminous Caragana, *Scientific Reports*, 2016, no. 6, DOI: 10.1038/srep36528.
- Web sources*
- Nacional'nyy park "Tunkinskij"* [National Park "Tunkinsky"], 1991–2021, URL: <http://tunkapark.ru> (access date 09.04.2021).
- Learn ArcGIS, URL: <https://www.esri-cis.ru/products> (access date 09.04.2021).
- USGS EarthExplorer, URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (access date 09.04.2021).

Received 18.07.2021

Revised 23.02.2022

Accepted 13.05.2022

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ И МАТЕРИАЛОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2022 г.

Статья	№	Стр.
<i>Аверкиева К.В.</i> Сельская джентрификация в российском Нечерноземье	6	119
<i>Алабян А.М., Василенко А.Н., Демиденко Н.А., Крыленко И.Н., Панченко Е.Д., Попрядухин А.А.</i> Приливная динамика вод в дельте Печоры в летнюю межень	1	167
<i>Асеева Е.Н., Самонова О.А.</i> Сравнительный анализ результатов определения химических элементов в фоновых лесных почвах разными спектральными методами	5	3
<i>Бабаян Г.Г.</i> Оценка экологического состояния городского участка реки Раздан (г. Ереван) по гидрохимическим показателям	4	26
<i>Балдина Е.А., Ширишова В.Ю., Романенко Ф.А., Луговой Н.Н., Жданова Е.Ю.</i> Динамика береговой линии и состояния поверхности малых арктических островов (Визе и Ушакова) по разновременным оптическим и радиолокационным снимкам	1	107
<i>Боровичев Е.А., Королева Н.Е., Кожин М.Н., Мелехин А.В., Петрова О.В.</i> Охрана фиторазнообразия в горнопромышленном районе (Хибины, Мурманская область)	3	31
<i>Варенцов М.И., Репина И.А., Глазунов А.В., Самсонов Т.Е., Константинов П.И., Степаненко В.М., Лыкосов В.Н., Артамонов А.Ю., Дебольский А.В., Печкин А.С., Соромотин А.В.</i> Особенности пограничного слоя атмосферы г. Надыма по данным экспериментальных измерений и вихреразрешающего моделирования	6	64
<i>Власова Г.А., Марченко С.С., Рудых Н.И.</i> Весенний гидродинамический режим в Камчатском проливе за период 1950–2017 гг.	4	79
<i>Воловинский И.В., Дьяконов К.Н.</i> Влияние климатических факторов на прирост деревьев на мерзлотных буграх пучения севера Западной Сибири	6	3
<i>Волошенко К.Ю., Новикова А.А.</i> Влияние изменений территориального распределения внешней торговли на развитие Калининградской области	4	127
<i>Герасимов А.А.</i> Территориальная и возрастная дифференциация соотношения полов населения России	4	113
<i>Голубева Е.И., Рис Г.У., Зимин М.В., Ковальчук М.Л., Тимохина Ю.И.</i> Динамика флористического состава и границ высотных поясов горных массивов Кольского полуострова в условиях антропогенного воздействия	1	58
<i>Горбаренко Е.В.</i> Экстремумы и основные тенденции в многолетней изменчивости радиационных параметров атмосферы города Москвы	6	90
<i>Горин С.Л., Корзинин Д.В., Школьный Д.И., Белова П.М.</i> Динамика береговых аккумулятивных форм и опыт улучшения судоходных условий в устье Паланы (северо-западная Камчатка)	3	119
<i>Гребенец В.И., Кизяков А.И., Маслаков А.А., Сократов С.А., Стрелецкая И.Д., Толманов В.А., Юров Ф.Д.</i> Влияние опасных криогенных процессов на инфраструктуру городов в Арктике	2	25
<i>Гречушников М.Г., Фролов А.В., Айбулатов Д.Н.</i> Изменение уровня воды в системе озер Айдаркуль–Тузкан (Восточное Приаралье) в XXI в.	3	87
<i>Демидова К.В., Медведникова Д.М., Алексеев А.И.</i> Реализация крупных угледобывающих проектов как фактор трансформации сельской местности в Алтайском районе Республики Хакасия	4	101
<i>Добролюбов С.А., Алексеева Н.Н., Климанова О.А., Шувалов В.Е.</i> Профессиональный стандарт «Географ» в контексте университетского географического образования	2	3
<i>Дрегуло А.М., Петухов В.В., Бобылев Н.Г.</i> Эколого-климатические особенности утилизации отходов водоотведения в Арктической зоне России	1	180
<i>Евсеев А.В., Красовская Т.М., Тикунов В.С.</i> Конфликты природопользования в Арктической зоне РФ: методология выявления и картографирования	1	5
<i>Егоров Д.О., Николаев Р.С.</i> Основные этапы, направления и факторы реформирования школьной сети в сельской местности России	4	64
<i>Замятина Н.Ю., Котов Е.А., Гончаров Р.В., Бурцева А.В., Гребенец В.И., Медведков А.А., Молодцова В.А., Ключева В.П., Кульчицкий Ю.В., Миронова Б.А., Никитин Б.В., Пилясов А.Н., Поляченко А.Е., Потуряева А.В., Стрелецкий Д.А., Шамало И.А.</i> Оценка потенциала жизнестойкости городов Российской Арктики	5	52

<i>Зырянов А.И., Фирсова Н.В.</i> Асимметрия города: влияние ландшафтных рубежей на структуру поселения и его окружение	6	79
<i>Иванов В.В., Архипкин В.С., Лемешко Е.М., Мысленков С.А., Смирнов А.В., Суркова Г.В., Тузов Ф.К., Чечин Д.Г., Шестакова А.А.</i> Изменение гидрологических условий в Баренцевом море как индикатор климатических трендов в евразийской Арктике в XXI веке	1	13
<i>Имамвердиев Н.С.</i> Выбор оптимального места для установки солнечных электростанций в Нахичеванской АР	4	36
<i>Иовчева А.Д., Кречетов П.П., Семенов И.Н.</i> Засоление как фактор дифференциации подвижных форм тяжелых металлов в почвах Барабинской лесостепи	3	108
<i>Каплин В.Г., Чичкова Е.Ф., Грядунов Д.А., Кочин Д.А.</i> Дистанционные методы мониторинга продуктивности посевов озимой тритикале в лесостепи Среднего Поволжья	2	61
<i>Колбовский Е.Ю., Алексеева Н.Н., Банчева А.И., Климанова О.А.</i> Проблемы геоинформационного моделирования природно-зональной дифференциации в географии	4	3
<i>Кондратьев С.И., Масевич А.В., Белокопытов В.Н.</i> Положение верхней границы сероводородной зоны над бровкой шельфа Крыма	3	97
<i>Коньшиев Е.В.</i> Методика изучения ментального туристско-рекреационного пространства по отзывам туристов (на примере Кировской области)	5	16
<i>Крашенинникова С.Б., Шокурова И.Г., Демидов А.Н.</i> Особенности поверхностной циркуляции в Северной Атлантике при изменениях ледовитости Баренцева моря	5	113
<i>Лапин С.А.</i> Гомотермия водной толщи в водохранилище-охладителе	3	143
<i>Лебедев П.С., Смирнов И.П., Смирнова А.А., Ткаченко А.А.</i> Социально-географическое пространство малых городов Тверской области	2	86
<i>Леонова Н.Б., Горяинова И.Н., Бочарников М.В.</i> Структура ареалов бореальных видов растений на примере линии северной и майника двулистного в пределах Европейской России	5	66
<i>Магрицкий Д.В., Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Ефимов В.А., Василенко А.Н., Сазонов А.А., Ефимова Л.Е.</i> Гидрологические условия в устье реки Колымы летом 2019 года	1	134
<i>Малахова Т.В., Будников А.А., Иванова И.Н., Мурашова А.И.</i> Сезонные и суточные закономерности содержания и потоков метана в эстуарии реки Черной (Крым)	6	27
<i>Малхазова С.М., Миронова В.А., Башмакова И.Х.</i> Природноочаговые болезни в Арктике в условиях меняющегося климата	1	43
<i>Манаенков А.С., Подгаецкая П.М., Подгаецкий М.Е.</i> Особенности роста малорядных лесных полос на каштановых почвах	3	134
<i>Мискевич И.В., Алабян А.М., Демиденко Н.А., Коробов В.Б., Панченко Е.Д.</i> Формирование высокой мутности вод в малых приливных эстуариях Белого и Баренцева морей	4	142
<i>Мицук С.Н., Алексеев А.И.</i> Население двух сел Еврейской АО: статистика и реалии	2	133
<i>Морозова И.В., Белкина Н.А., Потахин М.С., Гатальская Е.В.</i> Эмиссия метана из донных отложений Выгозерского водохранилища	6	15
<i>Назаров Н.Н., Фролова И.В.</i> Возраст и современное развитие ландшафтов Камско-Кельтминской низменности (бассейн Верхней Камы)	5	41
<i>Наумов А.Д., Геннадиев А.Н., Ковач Р.Г.</i> Миграционные связи и трансформация полиаренов в системе «почвы – природные воды – атмосферный воздух» (обзор)	3	18
<i>Новенко Е.Ю., Мазей Н.Г., Куприянов Д.А., Руденко О.В., Баталова В.А., Нагорная Е.Г.</i> Изменения природных условий западной части плато Путорана за последние 4000 лет	1	152
<i>Новикова С.А., Мартынов Д.Н.</i> Влияние зеленых насаждений на снижение уровня шума от автотранспортных потоков в Иркутске	4	16
<i>Обатнин В.А., Кашин А.А., Пермяков М.А.</i> Литологические особенности как фактор хозяйственного освоения и расселения населения Удмуртской Республики	6	104
<i>Огородов С.А., Шабанова Н.Н., Кессель А.С., Баранская А.В., Разумов С.О.</i> Изменение гидрометеорологического потенциала термоабразии берегов морей Российской Арктики	1	26
<i>Пашаев Н.А., Алескарзаде И.И.</i> Цитрусовое хозяйство в Ленкоранском и Астаринском районах Азербайджанской Республики	6	129

Платонов В.С., Мысленков С.А., Архипкин В.С., Кислов А.В. Высокоразрешающее моделирование гидрометеорологических полей в прибрежных районах Карского моря в условиях сложной конфигурации береговой линии	1	87
Потапова А.А., Наумов А.С. Пространственно-временной анализ занятости в сельском хозяйстве в странах мира	5	76
Решетняк О.С., Косменко Л.С., Коваленко А.А. Антропогенная нагрузка и качество воды на замыкающих створах рек Арктической зоны России	3	3
Романов А.А., Васеха Н.Д. Зимняя авифауна морей северо-востока России	1	122
Романов А.А., Шемякин Е.В., Кожемякина Р.В., Егоров Н.Н., Вартапетов Л.Г., Голубев С.В. Авифауна горных ландшафтов верховьев рек Котуй и Оленек (Средняя Сибирь)	2	101
Ростислав К.В. Различия между странами мира в общей производительности	2	16
Руденко О.В., Талденкова Е.Е., Шкарубо С.И., Руденко А.А. Изменения природной среды Центральной впадины Баренцева моря в позднеледниковье – голоцене	5	123
Рудинская А.И., Беляев Ю.Р., Беляев В.Р., Гуринов А.Л., Гаранкина Е.В. Геоморфологические позиции селевых бассейнов Ловозерских тундр	2	119
Рязанов С.С., Кулагина В.И. Сравнительный анализ методов интерполяции топографических данных для создания цифровой модели рельефа на примере национального парка «Нижняя Кама»	3	62
Сдасюк Г.В., Алексеева Н.Н. Развитие переходной энергетики в Индии: достижения, проблемы, перспективы	5	91
Семиколенных Д.В., Курбанов Р.Н., Янина Т.А. Возраст хвалынского пролива в позднеледниковой истории Маньчжурской депрессии	5	103
Сибирцова Е.Н., Силаков М.И., Темных А.В., Завьялов А.В. Накопление микропластикового загрязнения в пляжевых отложениях юго-западного побережья Крыма	2	37
Скачков В.С., Заяц Д.В. Риски дезинтеграции государственной территории (на примере Мексики, Венесуэлы и Чили)	3	50
Скрипка Г.И., Косолапов А.Е., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А., Калиманов Т.А., Сапрыгин В.В., Филатов А.А. Анализ динамики абразионных берегов Цимлянского водохранилища с использованием беспилотных летательных аппаратов	3	42
Слука Н.А., Ткаченко Т.Х. География мирового хозяйства в Московском университете: этапы становления и перспективы развития	2	139
Соловьев И.А. Трансформация миграционных процессов на Северном Кавказе в 1770–2019 гг.	2	73
Суркова Г.В., Васильчук Ю.К. Сравнение модельных и реконструированных палеотемператур в последний ледниковый максимум в Российской Арктике	6	40
Тикунов В.С., Белоусов С.К. Интегральная оценка качества жизни населения городов и регионов России	2	48
Тюнин Н.А., Беляев В.Р., Лобачева Д.М., Семиколенных Д.В. Дельта Казачьего Ерика – Переволоки (дельта Кубани) в голоцене	6	140
Хорошев А.В., Дьяконов К.Н., Воловинский И.В., Бочкарев Ю.Н., Подгорный О.М. Роль морфометрических и климатических факторов в изменчивости функционирования геосистем в северной тайге Западной Сибири	5	140
Чалов Р.С., Куракова А.А., Михайлова Н.М., Рулева С.Н. Размывы пойменных берегов и эволюция форм русел рек как факторы перестройки русловой сети	5	29
Чинилин А.В., Савин И.Ю. Оценка содержания органического углерода в почвах России с помощью ансамблевого машинного обучения	6	49
Чурюлина А.Г., Бочарников М.В. Картографирование растительных сообществ с участием реликтового вида караганы гривастой в Южном Прибайкалье	6	149
Шеремецкая Е.Д., Каревская И.А., Самусь А.В., Гаранкина Е.В., Шоркунов И.Г. Новые данные о стратиграфической значимости разреза «Черемошник» (Ярославская область)	4	88
Шинкаренко С.С., Ткаченко Н.А., Юферев В.Г. Геоинформационный анализ хозяйственного освоения бассейна реки Дон	3	73
Юдина Т.Н., Богомолова А.В., Петухова О.В., Вайништок А.П. ГИС-технологии в социально-экономических исследованиях	4	52

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 к опубликованию 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 и включать 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. 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 прилагаются 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 ЧРЕДИТЕЛИ:

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
географический факультет МГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

С.А. ДОБРОЛЮБОВ, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент 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)

EDITORIAL BOARD:

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
Т.А. ЯНИНА, К.Н. ДЬЯКОНОВ

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. 20.2
Уч.-изд. л. 00. Тираж экз. Изд. № 00000. Заказ №

Типография МГУ.
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 15.