

Вестник Московского университета

Серия 5 ГЕОГРАФИЯ

Издательство Московского университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 1946 г.

2024 • Т. 79 • № 2

МАРТ–АПРЕЛЬ

Выходит один раз в два месяца

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

СОДЕРЖАНИЕ

100 лет со дня рождения Георгия Ивановича Рычагова. *Научное наследие*..... 3

Теория и методология

Бакланов П.Я. Новые факторы и предпосылки экономического районирования России..... 5

География и экология

Сатосина Е.М., Гущина Д.Ю., Тарасова М.А., Железнова И.В., Емельянова Е.Р.,
Гибадуллин Р.Р., Осипов А.М., Ольчев А.В. Влияние аномалий температуры
и осадков на потоки диоксида углерода во внетропических лесах Северного
полушария..... 19

Алексеева Н.Н., Лопатников Д.Л., Банчева А.И. Изменение экологических
характеристик стран – экономических гигантов Азии в контексте
геоэкологического перехода 31

Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П., Алябина И.О., Урусевская И.С.,
Шоба С.А. Агроландшафтно-экологическое районирование природных
кормовых угодий регионов России..... 43

Савельева К.В., Джэнз Д., Рожкова А.К., Шлык Д.Х., Токарь Э.А., Воробьева Т.А.,
Кузьменкова Н.В. Природные радионуклиды и цезий-137 в почвах и донных
осадках озера Ханка..... 54

Методы географических исследований

Крутов О.Д., Греля Н.К., Веприцкий А.А., Куксин Я.К., Назаренко Г.А.,
Прусихин О.Е., Широкова П.А., Крузе Ю.Л., Алексеев А.И. Новые сельские
жители и формы их территориальной организации в Воскресенском округе
Нижегородской области..... 66

Елтай А.Г., Ивкина Н.И. Моделирование уровня в Казахстанской части
Каспийского моря с помощью модели MIKE 21 80

Региональные исследования

Кохан А.В., Еременко Е.А., Мороз Е.А., Ермаков А.В., Соколов С.Ю.
Флюидогенный рельеф на шельфах морей Арктики..... 91

Малахова В.В., Елисеев А.В. Чувствительность температуры придонного
слоя морей арктического шельфа к температуре воздуха в XX–XXIII вв.
по данным CМIP6..... 108

Чучкалов А.С., Зырянов Г.А., Мартемьянов Д.В. Социально-экономическая
трансформация сельских населенных пунктов пригородного района
Чебоксар за последние 30 лет..... 121

Мысленков С.А. Анализ высоты ветровых волн и продолжительности безледного
периода вдоль Северного морского пути с 1979 по 2021 г..... 134

Имангулов Л.Р., Корюхин Д.А. Миграция молодежи в горном Левашинском районе
Дагестана..... 146

CONTENTS

Theory and methodology

<i>Baklanov P.Ya.</i> New factors and prerequisites for the economic zoning of Russia.....	5
--	---

Geography and ecology

<i>Satosina E.M., Gushchina D.Y., Tarasova M.A., Zheleznova I.V., Emelianova E.R., Gibadullin R.R., Osipov A.M., Olchev A.V.</i> Effects of temperature and precipitation anomalies on carbon dioxide fluxes in the extratropical forests of the Northern hemisphere.....	19
<i>Alekseeva N.N., Lopatnikov D.L., Bancheva A.I.</i> Changes of environmental characteristics of the Asian “Economic Giants” in the context of the geoecological transition.....	31
<i>Trofimov I.A., Trofimova L.S., Yakovleva E.P., Alyabina I.O., Urusevskaya I.S., Shoba S.A.</i> Agrolandscape-ecological zoning of natural forage lands in Russian regions.....	43
<i>Savelieva K.V., Dzheng D., Rozhkova A.K., Shlyk D.H., Tokar E.A., Vorobieva T.A., Kuzmenkova N.V.</i> Natural radionuclides and cesium-137 in soils and bottom sediments Of the Khanka lake.....	54

Methods of geographical studies

<i>Krutov O.D., Grelya N.K., Veprickij A.A., Kuksin Ya.K., Nazarenko G.A., Prusihin O.E., Shirokova P.A., Kruze Yu.L., Alekseev A.I.</i> New rural residents and forms of their territorial organization in the Voskresensky district of the Nizhny Novgorod region.....	66
<i>Yeltay A.G., Ivkina N.I.</i> Sea level modeling in the Kazakhstan part of the Caspian Sea using the MIKE 21 model.....	80

Regional studies

<i>Kokhan A.V., Eremenko E.A., Moroz E.A., Ermakov A.V., Sokolov S.Yu.</i> Fluidogenic landforms on the Arctic shelves.....	91
<i>Malakhova V.V., Eliseev A.V.</i> Sensitivity of the bottom layer temperature of the Arctic shelf seas to air temperature in the 20 th –23 rd centuries according to CMIP6 data.....	108
<i>Chuchkalov A.S., Zyryanov G.A., Martemyanov D.V.</i> Socio-economic transformation of rural settlements in the suburban municipal district of the city of Cheboksary over the past 30 years.....	121
<i>Myslenkov S.A.</i> Analysis of the wind waves height and the duration of ice-free period along the Northern Sea Route from 1979 to 2021.....	134
<i>Imangulov L.R., Koryuhin D.A.</i> Youth migration in the montane Levashinsky district of Dagestan.....	146



100 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ГЕОРГИЯ ИВАНОВИЧА РЫЧАГОВА

НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ

26 апреля 2024 г. исполнилось 100 лет со дня рождения декана географического факультета МГУ, возглавлявшего его в течение 10 лет (1980–1990), профессора кафедры геоморфологии и палеогеографии, доктора географических наук, выдающегося педагога и исследователя Георгия Ивановича Рычагова.

Георгий Иванович Рычагов прожил долгую и яркую жизнь, всего четыре года не дожив до своего юбилея.

Он окончил сельскую школу в Пензенской (ранее – Саратовской) области за 5 дней до начала Великой Отечественной войны. В 1942 г. был призван в действующую армию и в том же году направлен на фронт, где стал участником сложных этапов Великой Отечественной войны: Сталинградской и Курской битв, Корсунь-Шевченковской и Ясско-Кишиневской операций, штурма Будапешта и взятия Вены. Георгий Иванович награжден орденами «Красной Звезды», «Отечественной войны I степени», медалями «За оборону Сталинграда», «За взятие Будапешта», «За взятие Вены», «За победу над Германией в ВОВ 1941–1945 гг.».

После демобилизации в 1948 г. Георгий Иванович поступил на географический факультет и всю свою последующую жизнь посвятил служению географической науке, в первую очередь – геоморфологии и палеогеографии. В 1953 г. Г.И. Рычагов с отличием окончил университет и продолжил обучение в аспирантуре. Обучаясь в аспирантуре, участвовал в работе геоморфологического отряда Комплексной Южной геологической экспедиции (КЮГЭ), руководимой известным геологом И.О. Бродом, на Северном Кавказе (в восточном Предкавказье), где собрал обширный материал по геологии и геоморфологии региона, на основе которого была написана и защищена кандидатская диссертация на тему «Геоморфология Восточного Предкавказья в связи с поисками нефтеносных структур» (1959) под научным руководством профессора М.В. Карандеевой. По окончании аспирантуры Георгий Иванович был направлен на работу в Московский государственный педагогический институт имени В.И. Ленина на должность ассистента, где после защиты диссертации получил звание старшего преподавателя, а затем доцента.

В 1965 г. Георгий Иванович, после неоднократных приглашений зав. кафедрой геоморфологии МГУ профессора О.К. Леонтьева, вернулся на родную кафедру в должности старшего научного сотрудника и был назначен начальником Прикаспийской экспедиции. Собранный материал по геоморфологии каспийского побережья и четвертичной истории Каспийского моря лег в основу его докторской диссертации «Плейстоценовая история Каспийского моря», успешно защищенной в 1977 г. В 1980 г. ему было присвоено ученое звание профессора.

Хорошо известны работы профессора Г.И. Рычагова по геоморфологическим проблемам Восточно-Европейской равнины. Многолетние работы на территории Сатинского полигона, возглавлявшиеся Г.И. Рычаговым, позволили утвердить ее как Сатинский стратотипический район для комплекса среднелепестовых отложений (самая изученная территория в России с геолого-геоморфологических позиций), а в стратиграфию четвертичных отложений Восточно-Европейской равнины вошло хронологическое понятие «сатинское межледниковье» (наравне с одиновским).

Однако главной творческой привязанностью Георгия Ивановича всю жизнь оставался «его Каспий». Он был, безусловно, крупнейшим в мире специалистом по четвертичной истории этого самого большого озера планеты. Основным итогом его многолетних исследований стали докторская диссертация и монография, посвященные четвертичной истории Каспийского моря, в которых он на основе детального геолого-геоморфологического анализа обосновал долгосрочный прогноз колебаний уровня Каспийского моря-озера. В определенной степени Георгий Иванович – уникальный специалист, поскольку его долгосрочный прогноз блестяще оправдался менее чем через 20 лет, еще при его жизни.

Г.И. Рычагов был признанным лидером в вопросах методики геоморфологических исследований и преподавания географии в высшей школе. Будучи деканом факультета, он возглавлял Всесоюзное учебно-методическое объединение (УМО) по географии, внося большой вклад в совершенствование вузовских учебных планов и программ по географическим дисциплинам в высшей школе. Именно Георгий Иванович создал методологию комплексной географической практики в Подмоскovie (в Сатино), в основу которой положил работу студентов-первокурсников на разных специальных практиках (изучая разные компоненты ПТК, а затем ПТК в целом) по единым профилям, а затем возглавил создание учебного пособия по данной практике, став его соавтором и редактором.

Георгий Иванович был педагогом от Бога. Не одно поколение студентов (более десятка тысяч географов!) начинали свою учебу на факультете с его учебника «Общая геоморфология», написанного сначала в соавторстве с О.К. Леонтьевым (в 1981 г. авторам за этот учебник была присуждена Аночинская премия). В 2006 г. учебник был существенно дополнен и вошел в серию «Классический университетский учебник». Более 30 лет Г.И. Рычагов читал курс «Общей геоморфологии» для первокурсников, создал и многие годы вел оригинальный курс «Геоморфологический анализ при палеогеографических реконструкциях» для студентов 4-го и 5-го курсов. Г.И. Рычаговым лично и в соавторстве написано около десятка учебных пособий, разработан ряд учебных программ лекционных курсов и учебных студенческих практик для 1-го и 2-го курсов. Он руководил десятками студенческих курсовых и дипломных работ, подготовил 10 кандидатов наук (один из которых стал доктором наук).

Г.И. Рычагов – заслуженный деятель науки Российской Федерации (1984), заслуженный профессор Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (1994), лауреат Ломоносовской премии МГУ за педагогическую деятельность (1996), лауреат Аночинской премии (1981), почетный член Русского географического общества (1990), лауреат золотой медали РГО имени Н.М. Пржевальского (2015).

Научное и методическое наследие Георгия Ивановича Рычагова – достояние географического факультета МГУ, геоморфологической и палеогеографической науки.

Кафедра геоморфологии и палеогеографии вышла с инициативой присвоить Сатинской учебно-научной станции МГУ имя Георгия Ивановича Рычагова, внесшего колоссальный вклад в ее создание, развитие и, по существу, около полувека являвшегося научным руководителем исследований территории Сатинского полигона.

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ

УДК 910

НОВЫЕ ФАКТОРЫ И ПРЕДПОСЫЛКИ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ РОССИИ

П.Я. Бакланов

*Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток,
академик РАН, проф., д-р геогр. наук; e-mail: pbaklanov@tigdvo.ru*

Экономическое районирование в СССР было ориентировано на выполнение практических задач – прежде всего на комплексное планирование долгосрочного развития народного хозяйства. В 1990-е гг. с началом радикальных политико-экономических преобразований в стране экономическое районирование утратило свое практическое значение. Однако и в условиях рыночной экономики сохраняются объективные процессы территориального разделения труда, производственно-технологической связанности предприятий, компаний, агломерационные процессы. В последнее время появились новые факторы и предпосылки роста значимости экономического районирования: восстановление многоуровневого стратегического планирования, изменение геополитических условий развития страны и необходимость достижения производственно-технологического суверенитета. Представляется, что в этой связи резко возрастает необходимость учета объективных процессов комплексообразования и районообразования и проведения на этой основе нового многоуровневого экономического районирования России. В статье приводится вариант выделения семи крупных экономических районов и 22 мезорайонов. Для крупных районов выделены основные звенья производственно-технологических цепочек и приоритетные виды деятельности. Подобное районирование может использоваться в долгосрочном планировании устойчивого развития страны и регионов.

Ключевые слова: комплексообразование, районообразование, природные ресурсы, производственно-технологические цепочки, крупные районы, мезорайоны, стратегическое планирование

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.1

ВВЕДЕНИЕ

Экономическое районирование зарождалось и развивалось в России и СССР для решения практических задач комплексного освоения и развития огромного и географически весьма дифференцированного пространства страны. По-видимому, наибольшего уровня прикладная направленность работ по экономическому районированию достигла в 1920-е гг. при разработке первых народнохозяйственных планов – ГОЭЛРО и первых пятилеток. Затем экономическое районирование в той или иной мере использовалось при составлении Генеральных схем размещения производительных сил и отдельных отраслей в стране и по регионам. Практически все пятилетние народнохозяйственные планы имели отраслевые и территориальные разрезы.

После распада СССР, массовой приватизации и перехода экономики России на частные формы собственности и рыночное регулирование экономическое районирование во многом утратило свое практическое значение, оставаясь одним из методов пространственно дифференцированных информа-

ционных оценок и обобщений. Однако в условиях резко изменившейся геополитической ситуации в последнее время появляются новые факторы и предпосылки существенного повышения значимости районного подхода к развитию страны, нового экономического районирования России, прежде всего для практических целей – достижения устойчивого развития страны, в том числе производственно-технологического. Этим вопросам и посвящена данная статья.

НЕКОТОРЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЙОНИРОВАНИЯ

К 1970-м гг. в СССР сформировалась достаточно строгая теория экономического районирования. В ее основе – учет объективных процессов территориального разделения труда, когда крупные территории специализируются на крупномасштабном производстве определенных видов товаров и услуг с учетом географического, в том числе экономико-географического положения районов, их природно-ресурсного потенциала, национальных и

исторических особенностей, а также перспектив эффективного развития (Н.Н. Баранский, Н.Н. Колосовский, С.В. Бернштейн-Коган, Ю.Г. Саушкин, И.И. Белоусов, Т.М. Калашникова, П.М. Алампиев, А.И. Чистобаев и др.). В основу экономических районов, формировавшихся в СССР с 1920-х гг., закладывалось планомерное и пропорциональное развитие крупных территориально-производственных комплексов (ТПК) (Н.Н. Колосовский, Ю.Г. Саушкин, Т.М. Калашникова, Н.Т. Агафонов, М.К. Бандман и др.). Разумеется, все это базировалось на общегосударственной собственности и централизованном управлении. На это были ориентированы и разработанные методы: территориально-отраслевые натурально-стоимостные балансы, производственные функции, модели энерго-производственных циклов (ЭПЦ), ТПК и др.

Важно отметить, что в предшествующий период страна слабо участвовала в международном разделении труда, а товарообмен осуществлялся преимущественно в рамках межрайонных отношений.

В ходе радикальных реформ 1990-х гг. и распада СССР общенародная, государственная и кооперативная собственности в основном были трансформированы в частную, акционерную, устранено централизованное планирование и управление развитием хозяйства в стране и регионах. В связи с этим исчезли важнейшие составляющие экономического районирования: общенародная собственность, планомерность экономического развития. Соответственно исчезли и такие коренные предпосылки формирования ТПК, как планомерность и госсобственность. Однако, если исходить из методологического положения о том, что в основе экономического районирования, которое выполняют ученые и специалисты, лежат объективные процессы территориального разделения труда и районообразования, то основные составляющие этих процессов не исчезли.

Следует отметить, что в постсоветский период вышел ряд интересных работ по экономическому районированию страны [Смирнягин, 2005, 2011; Шарыгин, 1995, 2002; Шувалов, 2005, 2015, 2016; Демьяненко, 2010, 2018; Пилясов, 2013; Пилясов, Поляченко, 2021; Бабурин, 2006, 2012; Чистобаев, Шарыгин, 1990; Бакланов, 2009, 2016; Блануца, 2016, 2017; Романов, 2006]. Однако в них недостаточно внимания уделено современной практической значимости экономического районирования, целесообразности его использования в условиях рыночного регулирования, дезинтеграции мировых рынков и установки на импортозамещение. Так, новую сетку географического районирования России, состоящую из 10 крупных районов, предложил В.А. Горбанев [Горбанев, 2014]. Однако осталось неясным, какие методы использованы им при выде-

лении этих районов и для каких целей может быть использовано это районирование. В то же время следует поддержать предложение автора о возможности комплексного подхода и более полного учета физико-географических факторов в районировании.

Ряд работ посвящен административно-территориальному устройству страны и некоторым вариантам его изменения [Тархов, 2005; Корытный, 2006; Ушаков, 2013; Бакланов, 1999]. В этих работах административно-территориальное деление рассматривается в значительной степени обособленно от экономического районирования. Хотя теоретически такая связь должна быть и является существенной. В целом же в научной экономико-географической литературе преобладает точка зрения на то, что в условиях частной, капиталистической экономики и рыночного регулирования экономическое районирование не имеет практического значения. Частный инвестор вправе развивать любой вид деятельности в любом географическом пункте.

Однако, следует подчеркнуть, что замена госсобственности на частную не отменяет и не устраняет процессы разделения труда, в том числе и территориального. Мотивы получения максимальной прибыли у частных предприятий, компаний и их конкуренция заставляют их владельцев стремиться к росту экономической эффективности в реальном секторе экономики, а следовательно, размещать свои производства и предприятия в районах с наиболее благоприятными условиями. Кроме того, частная собственность не отменяет жесткую необходимость производственно-технологической связанности определенных сочетаний производств и, соответственно, предприятий, а также другие формы связанности, в том числе инфраструктурную, ресурсно-экологическую, социально-экономическую, наконец, связанность, обусловленную той или иной территориальной общностью. Поэтому в условиях частной собственности и отсутствия планирования на региональном и национальном уровнях остаются базовые, фундаментальные предпосылки формирования районных производственных структур с различными формами связанности и взаимозависимости, с преобладающей экономической эффективной специализацией.

В качестве сохраняющихся базисных составляющих экономического районообразования, прикладная роль которых резко возрастает в новых геополитических условиях, необходимо выделить следующие.

1. Сохраняется физико-географическая основа территориального разделения труда, обусловленная пространственной дифференциацией природно-ресурсного потенциала и природных условий жизнедеятельности и хозяйствования.

Во-первых, существуют закономерности в размещении различных видов природных ресурсов, полезных ископаемых: генетические, металлогенические, географические. В этой связи существуют разнообразные схемы зонирования и районирования размещения природных ресурсов, отражающие его фундаментальные основы.

Во-вторых, как показывают наши исследования, отдельные природные ресурсы в определенных географических условиях и конкретных геосистемах существуют не обособленно, изолированно друг от друга. Ресурсосодержащие компоненты природы практически всегда связаны между собой достаточно тесными непосредственными и опосредованными связями через процессы и механизмы соответствующих геосистем (ландшафтов). С учетом этого в действительности в природе существуют территориальные природно-ресурсные системы – как сочетания ресурсосодержащих компонентов с тесными межресурсными связями, а следовательно, и взаимозависимостями в пределах определенных территорий (акваторий) [Бакланов, 1986, 2009]. Такие территориальные природно-ресурсные системы могут быть выделены в ходе специального зонирования и районирования.

Как показывает исторический опыт освоения новых территорий при добыче какого-то одного природного ресурса, в процесс освоения вовлекается и ряд других природных ресурсов. Например, при организации добычи некоторых полезных ископаемых (руд, углей, химического сырья) в лесных районах практически всегда происходит прокладка дороги к этому месторождению, вырубка древесины в его зоне и ее использование в создании добывающего предприятия (шахты, рудника, карьера). Одновременно происходит использование территории, земельных и водных ресурсов. То есть при «выходе» на новые территории в процессы освоения вовлекается не один природный ресурс, а то или иное территориальное сочетание пространственно сопряженных и взаимосвязанных природных ресурсов.

Таким образом, на межресурсную связанность в геосистемах накладывается еще одна форма связанности, обусловленная непосредственно освоением тех или иных сочетаний природных ресурсов. Подобная форма связанности также реализуется в некоторых ареалах, зонах территории, что уже составляет определенные пространственные базисные «ядра» и «звенья» процессов экономического районирования.

2. Начиная с добычи природных ресурсов, в процессы экономического районирования включаются звенья производственно-технологических структур (цепочек добавленной стоимости) или энерго-производственных циклов (ЭПЦ), по

Н.Н. Колосовскому (1947). При этом реализуются новые звенья процесса районирования в виде формирования отдельных стадий производств, предприятий, тесно связанных между собой производственно-технологическими связями. Отдельные такие звенья размещаются вблизи добычи природных ресурсов, другие могут размещаться на значительном удалении. В целом же, при прочих равных условиях формирование и размещение последовательных стадий переработки природных ресурсов, приближение мест переработки природных ресурсов к местам их добычи дают большую экономическую эффективность. В этой связи добыча природных ресурсов и добывающие предприятия выступают центрами районирования, формирующими территориальные зоны их влияния, в пределах которых создаются (или могут создаваться) предприятия по переработке природных ресурсов. Освоение же территориальных сочетаний природных ресурсов формирует целое сочетание производственно-технологических структур (цепочек ПТЦ). При этом пространственно пересекаются и отдельные звенья районирования.

В последнее время много говорится о цепочках добавленной стоимости (ЦДС). В основе ЦДС лежит формирование вертикальной цепочки добавленной стоимости на уровне отдельной компании или производственного кластера как совокупности различных видов деятельности, обеспечивающей весь процесс создания стоимости некоторого готового продукта [Портер, 2006; Sturgeon, 2001; Никитенко и др., 2017]. Выделяются два вида ЦДС: 1) на основе технологического разделения труда формируется несколько последовательных стадий переработки исходного сырья (например, добыча и переработка нефти в нефтехимической промышленности); 2) поузловое разделение труда – сборка конечного сложного продукта из большой совокупности комплектующих изделий, поставляемых многими субподрядчиками на головное предприятие (автомобильная, авиаракетно-космическая, электронная промышленность) [Федорченко, 2003]. В целом подобные ЦДС – понятие, прежде всего, экономическое, охватывающее процессы создания, роста стоимости продукта, товара. Их пространственное развертывание формирует отдельные звенья территориальных производственных структур, включая, прежде всего, обрабатывающие звенья ПТЦ.

Однако в условиях чрезмерной интеграции в мировые рынки, значительная часть таких звеньев «ушла» за пределы России, фактически превратив структуры подавляющего большинства унаследованных ТПК в усеченные, преимущественно ресурсодобывающие. Установка на импортозамещение

ставит задачу оптимизации процесса неоиндустриализации, прежде всего на районном уровне.

3. И в условиях рыночной экономики сохраняется действие агломерационных эффектов. Во-первых, они проявляются на локальном уровне. В пределах любого городского поселения действуют закономерности его укрупнения за счет роста эффективности размещения в нем новых производств с их ориентацией на использование накопленного общего инфраструктурного и человеческого потенциала. При росте размеров поселения (численности населения, инфраструктуры, производственных и других предприятий) возрастает и потенциал поселения, возможности его развития. Растет агломерационный эффект в виде «притяжения» в поселение населения, новых производств и предприятий.

Во-вторых, агломерационные процессы проявляются на региональном уровне. Любой социально-экономический центр (поселение) создает территориальную зону своего влияния: тяготения к центру и внешнее влияние центра. Практически любое поселение имеет непосредственные связи, взаимодействия с другими центрами, поселениями, а также с пространственными структурами природопользования. В этой связи поселение как центр внешних структурных отношений формирует территориальную социально-экономическую систему со структурой 1-го и выше порядков [Бакланов, 2009, 2016]. Такие образования представляют еще один тип звеньев районообразования.

4. В целом, отдельные звенья ПТЦ, пространственно совмещаясь с агломерационными процессами, составляют элементы территориально-производственного комплексообразования. В пределах небольших компактных территорий зачастую формируются и некоторые звенья ПТЦ, и агломерационные структуры в виде сочетаний производственных предприятий, объектов инфраструктуры и занятого населения в пределах поселений и агломераций. Такие образования составляют территориальные структуры в виде территориально-производственных комплексов (ТПК), а процессы их формирования – территориально-производственное комплексообразование [Агафонов, 1983; Бандман, 1980; Мошков, 2001]. В общем, территориально-производственное комплексообразование является пространственной базисной составляющей экономического районообразования. В последнее в более полном виде включаются территориальные зоны влияния отдельных предприятий и звеньев ПТЦ, поселений и структур природопользования, а также – территориальные природно-ресурсные системы, которые вовлечены или могут быть вовлечены в процессы комплексообразования в перспективе. В этой связи экономический район структурно шире ТПК или их сочетания. Он включает в себя и терри-

тории с их природно-ресурсным содержанием, а также зоны влияния отдельных звеньев ТПК.

Таким образом, можно выделить ряд отдельных составляющих в полных объективных процессах районообразования, что необходимо отражать и в экономическом районировании.

Природно-ресурсный уровень, на котором выделяются реально существующие территориальные природно-ресурсные системы. Это – базисные звенья районообразования, представленные определенными территориальными зонами, сочетаниями природно-ресурсных районов.

Производственно-технологический уровень в виде формирования сочетаний, цепочек производств и соответствующих предприятий на основе добычи отдельных природных ресурсов и их территориальных сочетаний и последующих технологических стадий их переработки. При этом отдельные стадии переработки могут размещаться как вблизи мест добычи природных ресурсов, в пределах компактных территорий, так и в других районах, выходя на межрайонные связи, а также и на международный уровень территориального разделения труда.

М.Д. Шарыгин (2002) предлагает использовать более широкое понятие – ресурсные энергетические циклы (РЭВЦ). Последние включают в свои структуры следующие звенья: добыча природного сырья и/или энергии – экономико-технологическую цепочка производств – распределение – обмен – потребление продукции – возврат отходов, трансформированных веществ и энергии в природно-ресурсную и производственную подсистемы. Такие РЭВЦ следует рассматривать с позиции целостных систем и отношения к ним людей – как производителей, так и потребителей [Соколов, 2013].

Таким образом появляется возможность оценить различные виды территориальных природно-ресурсных систем с точки зрения их вовлеченности в формирование соответствующих производств ЭПЦ, а также выделить расчетные полные наборы природных ресурсов, необходимых для формирования технологических процессов полных ЦДС.

Агломерационный уровень территориального тяготения и взаимовлияния центров и зон их влияния. На основе этих процессов формируются и развиваются поселения и зоны их влияния, а также их сочетания, в том числе агломерации и территориальные социально-экономические системы. В их структурах часто имеются и звенья производственно-технологических цепочек, формирующихся на местных природных ресурсах и их сочетаниях. Пространственно эти составляющие районообразования накладываются друг на друга, пересекаются и образуют интегральные структуры комплексообразования и районообразования. Следует отметить,

что процесс дополнения технологических цепочек позволит более эффективно решать проблемы моногородов за счет достройки в них отсутствующих стадий. Активным участником этого процесса должно стать государство, обеспечивающее институциональные условия, в том числе и для репатриации производств, ранее ушедших за границу.

Таким образом, под экономическим районообразованием понимается объективный процесс формирования относительно целостных территориальных социально-экономических образований (систем), обладающих достаточным природно-ресурсным потенциалом, устойчивой специализацией, определенной комплексностью и управлением. В процессе районообразования на территориях разного ранга (макрорайоны, крупные экономические районы, мезорайоны или субъекты Российской Федерации, микрорайоны) формируются социально-экономические системы, выполняющие как специализированные народнохозяйственные, в том числе межрайонные функции (в соответствии с их географическим положением, экономическим, демографическим, природно-ресурсным, научно-техническим потенциалом), так и функции удовлетворения местных производственных и социальных потребностей в необходимых товарах и услугах. При этом процесс районообразования в целом регулируется и человеком посредством социально-экономических программ, методов и инструментов. В целом, экономический район должен располагать такой экономической и территориальной структурой, которая позволит рассматривать его как относительно целостную систему, как организационную ячейку территориального управления народным хозяйством [Алаев, 1977], при этом, подчеркнем, не директивную, а опирающуюся на систему стимулов и сервитутов, позволяющую встраивать новые, недостающие для комплексообразования производства.

Исходя из сказанного выше, объективной основой экономического районообразования следует рассматривать процессы территориально-производственного комплексообразования. Под комплексообразованием понимается непрерывный регулируемый процесс формирования и развития совокупности различных взаимосвязанных производственно-экономических объектов (предприятий, организаций, отраслей, видов экономической деятельности) вместе с их внутренними и внешними связями. Этот процесс осуществляется на определенной территории, располагающей определенным сочетанием социально-экономических, демографических и природно-ресурсных факторов, позволяющих выполнять функции территориального разделения и кооперации труда [Агафонов, 1983; Бандман, 1980; Бакланов, 1986, 2009; Мошков, 2001]. Внут-

ренние, устойчивые производственные связи в территориально-производственном комплексе обеспечивают функционирование различных элементов, прежде всего специализированных и обслуживающих местные производственные и социальные потребности. Внешние связи дополняют функции по обслуживанию производства и населения, ввозу и вывозу продукции и услуг из района [Бакланов, 1986]. При этом наиболее тесные, устойчивые и разнообразные внутренние связи устанавливаются в пределах небольших, компактных территорий – в поселениях, агломерациях, drobных районах.

НОВЫЕ ФАКТОРЫ В РЕГИОНАЛЬНОМ РАЗВИТИИ

Начиная с 1990-х гг., в условиях радикальных политико-экономических реформ в России были утрачены многие звенья ПТЦ, производившие готовую продукцию, особенно в авиационном и сельскохозяйственном машиностроении, станкостроении, производстве ряда металлов и сплавов, химической и биохимической продукции. Многие не производимые в стране важные товары импортировались. Однако, начиная с 2014 г. и, особенно, с 2022 г., из-за введенных в отношении России многочисленных санкций были разорваны многие внешнеэкономические связи. В итоге страна оказалась в сложной ситуации, без собственного производства целого ряда экономически важных, а в ряде случаев и критических товаров. В то же время в стране имеются все необходимые сочетания природных ресурсов, сохранились многие производственно-технологические возможности. Следовательно, необходима новая переоценка собственных региональных природных ресурсов и их сочетаний, вариантов их добычи, оценки дополнения существующих звеньев ПТЦ, в том числе создания конечных звеньев ПТЦ по производству готовой продукции. В целом в условиях очевидного разворота на внутренний рынок нарастает значимость межрайонных и внутрирайонных связей. Это, в свою очередь, усиливает значимость комплексирования и новых форм внутрироссийского территориального разделения труда.

В последнее время в пространственном развитии России стали использоваться инструменты формирования территорий опережающего развития (ТОР). Так, начиная с 2015 г., в соответствии со специальным Федеральным законом, прежде всего на Дальнем Востоке, ТОРы стали создаваться как своеобразные «полюса» социально-экономического развития. В пределах компактных территорий с выгодным экономико-географическим положением и научно-техническим потенциалом размещаются сочетания эффективных производств и предприятий, связанных общей инфраструктурой. Подоб-

ные территориальные структуры, с одной стороны, сами формируются в зонах агломерационного влияния крупных городских поселений (Владивосток, Хабаровск, Южно-Сахалинск, Якутск и др.), а с другой – сами создают зоны своего социально-экономического влияния с возможностью размещения на них новых производств и предприятий. В этой связи ТОРы можно рассматривать как новые звенья комплексобразования и районообразования, но при условии формирования их специализаций в соответствии с расчетными и связанными с районными структурами.

С 2000-х гг. и в мире, и в России стали утверждаться парадигмы, модели зеленого и устойчивого развития. Их реализация направлена на сбалансированное развитие в экономической, социальной и экологической сферах. Это может достигаться лишь на уровнях пространственно дифференцированного регионального развития. Соответствующие содержательные прогнозные расчеты и оценки могут быть сделаны также лишь на региональных уровнях, прежде всего для экономических районов. Именно в пределах территориальной общности экономического района могут охватываться относительно целостные природно-ресурсные образования, базисные и другие звенья ПТЦ, а также полные территориальные социально-экономические структуры с выраженными формами территориально-производственного комплексобразования. В пределах экономических районов возможен охват и целостных ландшафтных и геосистемных образований для достижения экологической сбалансированности и эффективности. По-новому могут проявлять себя и ЭПЦ со стадиями утилизации отходов как формы экологизации производства.

В освоении новых природных ресурсов, их сочетании, комплексной переработке и в формировании новых звеньев ПТЦ необходимо использовать новейшие отечественные научно-технические разработки, не отказываясь, естественно, от доступного импорта новых эффективных технологий из-за рубежа. При этом важно использовать весь научно-технический потенциал, накопленный в регионах (научные центры, вузы и т. п.). Инновационные решения должны быть реализованы во всех составляющих комплексобразования и регионального развития. Именно в пределах полиструктурной целостности экономического района возможно достижение максимального эффекта от научно-технических инноваций. Все они могут дополнять друг друга во взаимозависимых частях района. Сам инновационный цикл и его отдельные звенья становятся важнейшими факторами районообразования.

Как показывают опыт последних лет и особенно современная ситуация, важнейшим инструментом

эффективного долгосрочного устойчивого развития страны должно стать многоуровневое стратегическое планирование. В условиях рыночного в общем регулирования возможно лишь инерционное развитие экономики. Достижение более эффективных структур и уровней развития за сравнительно небольшие периоды времени может обеспечить лишь стратегическое планирование, опирающееся на районный подход. При этом прогнозные расчеты, оценки, вариантный анализ на предплановой стадии необходимо выполнять для уровней страны, экономических районов, отдельных поселений, агломераций. Исходным уровнем подобных расчетов и оценок в рамках стратегического планирования должны стать отдельные поселения, а центральным и важнейшим – экономические районы, в том числе макрорегионы, мезорайоны (в том числе на уровне субъектов) и дробные (в виде групп муниципальных районов и образований). При этом стратегии разных уровней должны быть комплементарны в отношении друг друга.

Все эти новые факторы регионального развития требуют выделения системы экономических районов с последующей реализацией многоуровневого стратегического планирования для достижения и поддержания их долгосрочного устойчивого развития.

СХЕМА АЛГОРИТМА ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

В соответствии с методологическими принципами экономическое районирование страны должно базироваться на анализе и оценках объективных процессов экономического районообразования. В общем процесс экономического районообразования складывается из следующих основных стадий [Бакланов, 2009]:

- размещение на индустриально неосвоенной территории первого основного предприятия как узлового элемента территориальных структур хозяйства вычленяет территориальные зоны его связанности и рыночного влияния (территория размещения, зоны инфраструктурной, социально-инфраструктурной и ресурсно-экологической связанности, рыночные зоны, ресурсной и потребительской структур);

- размещение основного предприятия порождает импульс (становится причиной) локального комплексобразования и формирования в данном географическом пункте сочетания хозяйственных предприятий, непосредственно и опосредованно связанных с основным, которые также включаются в территориальные структуры хозяйства и вычленяют свои территориальные зоны связанности и рыночного влияния. Тем самым запускается и территориальный мультипликатор;

– в результате пространственных совмещений и пересечений звеньев территориальных структур хозяйства, образованных отдельными предприятиями, формируется интегральная зона (ареал) связанности и рыночного влияния всего локального сочетания предприятий. В процессе локального комплексобразования происходит вычленение территориальных ячеек, зон, их многократное наложение друг на друга, совмещение, частичное пересечение и как бы стягивание определенной территории к совокупному узлу – локальному комплексу. При развитии последнего и размещении в его пределах новых предприятий происходит вычленение зон связанности и рыночного влияния для новых предприятий, совмещение и пересечение этих зон с существующими. Развертывание базовой специализации создает благоприятные предпосылки для развития малого и среднего бизнеса, который становится полноправным объектом районирования.

Таким образом, всякое локальное комплексобразование составляет своеобразную стадию и звено районообразования в виде вычленения определенных участков, зон территории и стягивания их к комплексу (промышленному узлу, локальной агропромышленной системе, поселению, агломерации). В этой связи любой локальный комплекс выступает в качестве некоторого центра, ядра районообразования.

При установлении устойчивых связей одного локального комплекса (сочетания предприятий) с другим происходит определенное пространственное пересечение и совмещение их интегральных территориальных зон связанности и влияния. Это явление – важнейшее свойство районообразования – можно представить в виде следующего положения. Если между двумя узловыми элементами (простыми или совокупными) территориальных структур хозяйства существует устойчивая связь, то пространственные рыночные зоны их влияния пересекаются.

С учетом этого общая схема экономического районирования включает следующие стадии:

1. Выделение территориальных природно-ресурсных систем и природно-ресурсное районирование страны и ее крупных регионов.

2. Построение расчетных структур ПТЦ для основных природных ресурсов. Оценка вариантов размещения их звеньев на разных пространственных уровнях, в том числе в районе добычи природных ресурсов и в других районах. Оценка сочетаний ПТЦ, вариантов пространственных пересечений различных ПТЦ, потенциальных для региональных сочетаний природных ресурсов. Здесь открывается поле для использования расчетных эконометрических методов.

Для оценки перспектив развития структуры экономических районов, в которых представлена добыча крупных и уникальных природных ресурсов, наиболее важен первый вид территориальных производственно-технологических цепочек, возникающих при развитии ЭПЦ [Колосовский, 2006], которые формируются и могут разворачиваться на базе того или иного сочетания сырьевых и топливно-энергетических ресурсов. При этом в пространственное развитие может включаться вся совокупность производственных процессов от добычи и обогащения сырья до получения готовой продукции, которую экономически выгодно производить в том или ином месте экономического района. Здесь также возможно использование модифицированных версий балансового метода.

Наличие в экономических районах страны больших запасов высоколиквидных видов природных ресурсов обеспечивает их лидирующие позиции в производстве товарной продукции, производимой на их базе, закрепляя тем самым территориальное разделение труда. Например, значительные запасы нефти и природного газа в Сибири и на Дальнем Востоке делают вид экономической деятельности добыча нефти и природного газа основным, базисным в функциональной структуре экономических районов. Многие другие виды деятельности в структуре экономического района, как правило, выполняют вспомогательные и обслуживающие функции. Одновременно они повышают уровни диверсификации экономики районов, что является важным условием для повышения их устойчивости к конъюнктурным циклам.

Большие запасы древесины и высокая транспортная освоенность южных районов территории Северо-Запада, Сибири и Дальнего Востока во многом обеспечивают ведущие позиции их лесной и деревообрабатывающей промышленности в структуре экономических районов (заготовка и вывоз древесины, производство пиломатериалов и пр.). Схожая ситуация складывается с рыбопромышленными видами деятельности в структуре приморских экономических районов (Северо-Запад, Дальний Восток, Нижнее Поволжье, Приазовье), где значительные запасы биоресурсов моря (рыба и морепродукты) обеспечивают им преимущества в рыбодобывающей и перерабатывающей деятельности. Однако в ряде экономических районов России при наличии значительных объемов высоколиквидных природных ресурсов отсутствуют обрабатывающие производства, связанные в первую очередь с их глубокой переработкой. Установка на импортозамещение стимулирует этот процесс.

При этом высоколиквидные, в том числе и на зарубежных рынках, природные ресурсы выступа-

ют зачастую ведущим фактором районообразования, обуславливая размещения здесь добывающих производств и последующего формирования обрабатывающих видов деятельности, производственно-технологически и экономически связанных с освоением данных природных ресурсов. Подобные производства можно рассматривать как базовые, на основе которых могут развиваться новые звенья производственно-технологических цепочек.

3. Выделение центров, ядер комплексообразования и районообразования – крупных поселений, агломераций и территориальных зон их влияния.

4. Выделение для таких центров территориальных социально-экономических систем со структурами 1-го порядка.

5. Оценка пространственных сопряжений и пересечений всех этих территориальных образований. Выделение основных структурных звеньев комплексообразования и районообразования на основе различных форм общности, связанности и целостности в пределах определенной территории.

6. При общей ориентации на производственный сектор необходимо охватывать связанные с ним сектора услуг и социальную сферу – это новые звенья районообразования и объект для районирования.

7. Корректировка отдельных участков границ экономических районов на основе физико-географического районирования и целостности региональных геосистем.

В конечном итоге необходимо, чтобы в экономическом районе были достаточные предпосылки для достижения в районе определенной природно-ресурсной, продовольственной, энергетической и финансово-экономической самодостаточности. Кроме того, в экономическом районе должна обеспечиваться надежная транспортная связанность основных центров и территорий.

На основе подобных представлений и подходов нами проведено обобщенное экономическое районирование России на макро- и мезоуровнях, предполагающее в дальнейшем более полное расчетное обоснование.

Ниже приводится предлагаемый нами вариант системы экономического районирования России, включая выделение крупных макрорайонов и мезорайонов. Крупные экономические районы и мезорайоны выделялись нами с учетом общности их географического положения и истории формирования, сходства и форм связанности природно-ресурсного потенциала, тенденций комплексообразования и районообразования и формирование общей специализации территории, а также основных физико-географических рубежей, что важно для формирования структур устойчивого регионального природопользования (табл. 1).

С учетом основных направлений долгосрочного развития, изложенных в региональных программах и научных исследованиях нами выделены основные сформировавшиеся на местном природно-ресурсном потенциале звенья производственно-технологических структур и приоритетные виды деятельности в макрорегионах (табл. 2). Затем такие оценки необходимо развернуть и до уровня мезорайонов с расчетами дополнения ПТЦ недостающими звеньями.

В последующем предлагается выделить в макро- и мезорайонах основные звенья территориальных производственно-технологических структур (цепочек), которые в целом могут сформироваться на региональных природно-ресурсных сочетаниях и системах. При этом существующие звенья ПТЦ необходимо дополнить вариантами расчетных – для достижения полных структур ПТЦ. Затем необходимо дополнить экономическое районирование дробными районами.

Подобная система экономического районирования, оценки и расчеты районных структур ПТЦ должны составить важнейшую стадию стратегического планирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важнейшим методологическим принципом экономического районирования является то, что в нем отражаются объективные процессы комплексообразования и районообразования как формирования территориальных сочетаний производственных предприятий на основе различных форм их связанности и территориальной общности. В условиях рыночной экономики сохраняются закономерности территориального разделения труда и производственно-технологической связанности производств и предприятий, агломерационные процессы. Новые условия регионального развития в РФ: изменившиеся геополитические условия, необходимость существенных структурных перестроек и достижение технологического суверенитета, следствием чего является усиление значимости межрайонного (внутрироссийского) разделения труда по отношению к международному, использование многоуровневого стратегического планирования – все это требует проведения и практического использования нового экономического районирования. Последнее составляет важнейшую исходную стадию стратегического планирования.

Излагается общая схема экономического районирования, начиная с выделения территориальных природно-ресурсных систем, выделения для них звеньев производственно-технологических структур (цепочек), определения пунктов и узлов их размещения и формирования звеньев территориальных структур. На этой основе выполнено

Таблица 1

Экономические макрорегионы и мезорайоны РФ

Макрорегион	Мезорайоны и их состав	
	Мезорайон	Сочетания современных субъектов РФ
Дальневосточный	Северо-Восточный (приморский)	Чукотский АО, Камчатский край, Магаданская область
	Якутский	Республика Саха (Якутия)
	Южный приморский	Хабаровский край, Сахалинская область, Приморский край
	Юго-западный (приамурский)	Еврейская АО, Амурская область, Забайкальский край
Сибирский	Прибайкальский	Иркутская область, Республика Бурятия
	Южно-Сибирский	Алтайский край, Республика Алтай, Республика Тыва, Республика Хакасия, Кемеровская область
	Красноярский (Енисейский)	Красноярский край
	Западно-Сибирский (Обский)	Тюменская область, Омская область, Новосибирская область, Томская область (без АО), Ханты-Мансийский АО, Ямало-Ненецкий АО
Уральский	Северо-Уральский	Республика Удмуртия, Пермский край, Свердловская область
	Южно-Уральский	Республика Башкортостан, Курганская область, Оренбургская область, Челябинская область
Поволжский	Верхневолжский	Республика Марий-Эл, Республика Мордовия, Республика Чувашия, Кировская область, Нижегородская область
	Средневолжский	Республика Татарстан, Самарская область, Саратовская область, Пензенская область, Ульяновская область
	Нижневолжский	Республика Калмыкия, Астраханская область, Волгоградская область
Северо-Западный	Западный Прибалтийский (приморский)	Санкт-Петербург, Ленинградская область, Калининградская область, Новгородская область, Псковская область
	Северный (приморский)	Республика Карелия, Республика Коми, Архангельская область (без АО), Мурманская область, Ненецкий АО
Центральный	Московский	Москва, Московская область, Владимирская область, Калужская область, Рязанская область, Смоленская область, Тверская область, Тульская область
	Ярославский	Ивановская область, Костромская область, Ярославская область
	Центрально-Черноземный	Белгородская область, Брянская область, Воронежская область, Курская область, Липецкая область, Орловская область, Тамбовская область
Южный	Донецкий	Донецкая Народная Республика, Луганская Народная Республика
	Приднепровский	Запорожская область, Херсонская область
	Азовско-Черноморский	Республика Крым, Ростовская область, Краснодарский край
	Северо-Кавказский	Республика Адыгея, Республика Дагестан, Республика Ингушетия, Республика Северная Осетия (Алания), Кабардино-Балкарская Республика, Карачаево-Черкесская Республика, Чеченская Республика, Ставропольский край

выделение крупных экономических районов РФ и мезорайонов. Для уровня крупных экономических районов выделены основные звенья производственно-технологических структур (цепочек) и приоритетные виды деятельности. В последую-

щем такие цепочки и приоритетные виды деятельности необходимо выделить и для уровней мезорегионов и субъектов Российской Федерации с доведением подобных более детальных оценок до отдельных поселений.

Таблица 2

Основные перспективные направления развития крупных экономических районов

Крупные экономические районы	Звенья производственно-технологических цепочек (ЭПЦ)			Основные специализированные и приоритетные виды деятельности
	Первичные (добыча природных ресурсов)	Обработка природных ресурсов	Получение готовых продуктов	
Дальневосточный	– Добыча нефти, газа, угля; руд черных, цветных и драгоценных металлов; алмазов; – заготовка древесины; – вылов рыбы и морепродуктов; – туризм и рекреация	– Первичная переработка руд черных и цветных металлов; – производство рудных концентратов; – деловая древесина; – рыба замороженная и охлажденная, соленая и вяленая	– Производство бензина и горюче-смазочных материалов; стали и сплавов из металлолома; пиломатериалов; рыбных консервов	– Добыча нефти и природного газа; – нефтехимия; – производство стали и сплавов из местного сырья; цветных металлов и сплавов; – деревообработка; – рыбная промышленность; – биохимия на базе местных ресурсов леса и океана; – машиностроение, в т. ч. судостроение, авиа- и автомобилестроение, приборы и установки для освоения морских ресурсов; – туризм и рекреация
Сибирский	– Добыча нефти, газа, угля; – использование гидроэнергии; – добыча руд черных, цветных и драгоценных металлов; – заготовка древесины; – туризм и рекреация	– Первичная переработка руд черных и цветных металлов; – производство концентратов; деловая древесина; – первичная переработка руд черных и цветных металлов; – производство концентратов	– Производство тепловой, гидроэнергии; бензина и других горюче-смазочных материалов; стали и сплавов; пиломатериалов, древесных плит и пр.	– Добыча нефти и природного газа; – нефтехимия; – производство стали и сплавов из местного сырья; цветных металлов и сплавов; – деревообработка; – машиностроение, в т.ч. горношахтного оборудования, приборостроение, авиастроение и др.; – туризм и рекреация
Уральский	– Добыча нефти, газа; руд черных, цветных и драгоценных металлов; химического сырья; – заготовка древесины; – туризм и рекреация	– Первичная переработка руд черных и цветных металлов; – производство концентратов; – деловая древесина	– Производство стали и сплавов; цветных металлов и сплавов; пиломатериалов, древесных плит и пр.	– Добыча нефти и природного газа; – нефтехимия; – производство стали и сплавов из местного сырья; цветных металлов и сплавов; – деревообработка; – тяжелое машиностроение; – туризм и рекреация
Поволжский	– Использование гидроэнергии; – добыча нефти, газа; строительных материалов; – использование земельных (почвенных и агроклиматических) ресурсов; – вылов рыбы; – туризм и рекреация	– Нефтехимия; – нефтепереработка; – производство строительных материалов; – агропромышленный комплекс; – рыба замороженная и охлажденная, соленая и вяленая	– Производство электроэнергии; бензина и горюче-смазочных материалов; – нефтехимия; – пищевая продукция	– Гидроэнергетика; – добыча нефти и природного газа; – нефтехимия; – машиностроение, в т.ч. авиастроение, приборостроение, судостроение; – туризм и рекреация

Окончание таблицы 2

Крупные экономические районы	Звенья производственно-технологических цепочек (ЭПЦ)			Основные специализированные и приоритетные виды деятельности
	Первичные (добыча природных ресурсов)	Обработка природных ресурсов	Получение готовых продуктов	
Северо-Западный	– Добыча нефти, газа; руд цветных металлов; алмазов; апатитов; – лесозаготовка; – вылов рыбы и морепродуктов; – туризм и рекреация	– Нефтехимия; – производство концентратов цветных металлов; – деловая древесина; – рыба замороженная и охлажденная, соленая и вяленая	– Производство металлов; пиломатериалов; древесных плит и пр.; рыбных консервов	– Машиностроение, в т.ч. приборостроение, судостроение; – лесозаготовка и деревообработка; – рыбная, в т.ч. биохимическое производство; – туризм и рекреация
Центральный	– Использование земельных ресурсов; – добыча руд черных металлов; строительных материалов	– Нефтехимия; – производство концентратов черных металлов	– Производство бензина и горюче-смазочных материалов – нефтехимия; – производство стали и цветных металлов	– Машиностроение, в т.ч. приборостроение, автомобилестроение; – промышленность: строительных материалов; легкая; пищевая; – производство продукции сельского хозяйства; – туризм и рекреация
Южный	– Добыча нефти, газа, угля; руд цветных металлов; – вылов рыбы; – использование земельных ресурсов; – туризм и рекреация	– Нефте- и углехимия; – производство концентратов черных и цветных металлов; – рыба замороженная и охлажденная, соленая и вяленая; – пищевая продукция	– Производство кокса; стали и цветных металлов; бензина и горюче-смазочных материалов; рыбных консервов; – нефтехимия	– Машиностроение, в т.ч. судостроение, сельскохозяйственное, авиастроение; – черная металлургия полного цикла; – цветная металлургия; – пищевая и легкая промышленность; – туризм и рекреация

Благодарность. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ «Потенциал приморских поселений для целей долгосрочного развития: содержание и методы оценки (на примере Тихоокеанской России)» № 22-17-00186.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агафонов Н.Т. Территориально-производственное комплексобразование в условиях развитого социализма. Л.: Наука, 1983. 188 с.
- Алаев Э.Б. Экономико-географическая терминология. М.: Мысль, 1977. 199 с.
- Бабурин В.Л. Известные и малоизвестные страницы отечественного районирования. М.: ЛЕНАНД, 2006. 389 с.
- Бабурин В.Л. Развитие территориальных природно-хозяйственных систем как основы экономики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2012. № 5. С. 5–13.
- Бакланов П.Я. К теории экономического районирования («теорема» об экономическом районировании) // Региональные исследования. 2016. № 4. С. 4–9.
- Бакланов П.Я. Территориальные структуры хозяйства в экономическом районировании // Социально-экономическая география: традиции и современность. М., Смоленск: Ойкумена, 2009. С. 9–28.
- Бакланов П.Я. Пространственные системы производства: микроструктурный уровень анализа и управления. М.: Наука, 1986. 150 с.
- Бакланов П.Я. Факторы и варианты изменений административно-территориального устройства Дальнего Востока // Регион: экономика и социология. 1999. № 2. С. 152–156.
- Бандман М.К. Территориально-производственные комплексы: теория и практика предплановых исследований. Новосибирск: Наука, 1980. 254 с.
- Блануца В.И. Районирование досоветской Сибири по почтовым сетям // Изв. РАН. Сер. геогр. 2016. № 3. С. 117–124.
- Блануца В.И. Социально-экономическое районирование как система смыслов: контент-анализ постсоветских публикаций // Географический вестник. 2017. № 4. С. 39–50.
- Горбанев В.А. К вопросу о новом географическом районировании России // Вестник МГИМО-Университета. 2014. № 4(37). С. 187–196. DOI: 10.24833/2071-8160-2014-4-37-187-196.
- Демьяненко А.Н. Об экономическом районировании и районообразовании // Регионалистика. 2018. Т. 5. № 6. С. 5–17.

- Демьяненко А.Н. Экономическое районирование: вопросы теории и истории. Ч. I / отв. ред. П.Я. Бакланов; Дальневост. отделение РАН, Ин-т экон. исследований. Хабаровск: Хабаровская краевая типография, 2010. 224 с.
- Колосовский Н.Н. Производственно-территориальное сочетание (комплекс) в советской экономической географии // Вопросы географии. М.: Госполитиздат, 1947. С. 133–169.
- Колосовский Н.Н. Избранные труды. Смоленск: Ойкумена, 2006. 336 с.
- Корытный Л.М. Административно-территориальное деление России: бассейновый принцип // География и природные ресурсы. 2006. № 4. С. 28–37.
- Мошков А.В. Территориально-производственное комплексобразование на Дальнем Востоке. Владивосток: Дальнаука, 2001. 156 с.
- Никитенко С.М., Гоосен Е.В., Пахомова Е.О., Колеватова А.В. Цепочки добавленной стоимости как инструмент развития экономики региона сырьевой специализации // Фундаментальные исследования. № 10. 2017. С. 375–380.
- Пилясов А.Н. Контуры новой теории экономического районирования России (основные элементы) // Современная регионалистика: структура, проблемы, перспективы. СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2013. С. 31–44.
- Пилясов А.Н., Поляченко А.Е. Районный эффект: проблемные вопросы теории и практики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 4. С. 25–37.
- Портер М. Конкурентное преимущество. Как достичь высокого результата и обеспечить его устойчивость / пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс, 2006. 715 с.
- Романов М.Т. Проблемы экономического районирования и административно-территориального устройства России в новых условиях // Известия РАН. Сер. геогр. 2006. № 3. С. 57–66.
- Смирнягин Л.В. Методические подходы к районированию в общественной географии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2011. № 6. С. 13–19.
- Смирнягин Л.В. Узловые вопросы районирования // Изв. РАН. Сер. геогр. 2005. № 1. С. 5–16.
- Соколов С.Н. Теоретико-методологические основы территориальной организации общества // Вестник Нижегородского гос. ун-та. 2013. № 3. С. 32–42.
- Тархов С.А. Изменение административно-территориального деления в России в XVIII–XX веках // Логос. 2005. № 1. С. 65–103.
- Ушаков Е.А. Влияние процессов укрупнения субъектов Российской Федерации на уровень жизни населения бывших автономных округов // Региональные исследования. 2013. № 3. С. 95–100.
- Федорченко А.В. Современные тенденции территориальной организации промышленного производства. М.: Пресс-Соло, 2003. 176 с.
- Чистобаев А.И., Шарыгин М.Д. Экономическая и социальная география: новый этап. Л.: Наука, 1990. 317 с.
- Шарыгин М.Д. Региональная организация общества (теоретико-методологические проблемы совершенствования). Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2002. 204 с.
- Шарыгин М.Д. Эколого-экономические районы (теоретико-методические аспекты развития). Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 1995. 192 с.
- Шувалов В.Е. Концептуальные проблемы развития отечественной районной школы социально-экономической географии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2005. № 1. С. 13–24.
- Шувалов В.Е. Районирование в российской социально-экономической географии: современное состояние и направления развития // Региональные исследования. 2015. № 3. С. 19–29.
- Шувалов В.Е. Районирование в трудах экономико-географов // Социально-экономическая география в России / под ред. П.Я. Бакланова и В.Е. Шувалова. Владивосток: Дальнаука, 2016. С. 103–116.
- Sturgeon T.J. How Do We Define Value Chains and Production Networks? *IDS Bulletin*, 2001, vol. 32, no. 3, p. 9–18.

Поступила в редакцию 20.08.2023

После доработки 14.10.2023

Принята к публикации 04.12.2023

NEW FACTORS AND PREREQUISITES FOR THE ECONOMIC ZONING OF RUSSIA

P.Ya. Baklanov

*Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: pbaklanov@tigdvo.ru*

Economic zoning in the USSR was focused on the practical tasks, first of all, comprehensive planning for the long-term development of the national economy. In the 1990s, with the beginning of radical political and economic transformations in the country, the economic zoning lost its practical significance. However, even under market economy, the objective processes of territorial division of labor, industrial and technological connectivity of enterprises and companies still persist, as well as, agglomeration processes. Recently, new factors and prerequisites for the growing importance of economic zoning have emerged, such as the restoration of multilevel strategic planning, changes in the geopolitical situation of the country's development and the need to achieve industrial and technological sovereignty. With this background it seems that the need to take into

account the objective processes of complex formation and district formation, and to perform a new multi-level economic zoning of Russia on this basis sharply increases. The article provides a possible scheme of seven large economic regions and 22 mesorayons. The main links of production and technological chains and priority activities are identified for the large regions. Such zoning could be useful for the long-term planning of sustainable development of the country and its regions.

Keywords: complex formation, district formation, natural resources, production and technological chains, large areas, mesorayons, strategic planning

Acknowledgments. The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project 22-17-00186 Potential of seaside settlements for the long-time development: substance and methods of assessment – case study of Pacific Russia).

REFERENCE

- Agafonov N.T. *Territorial'no-proizvodstvennoe kompleks-soobrazovanie v usloviyah razvitogo socializma* [Territorial-production complex formation under the developed socialism], Leningrad, Nauka Publ., Leningradskoe ot-delenie, 1983, 188 p. (In Russian)
- Alaev Je.B. *Ekonomiko-geograficheskaja terminologija* [Economic-geographical glossary], Moscow, Mysl' Publ., 1977, 199 p. (In Russian)
- Baburin V.L. *Neizvestnye i maloizvestnye stranicy otechest-vennogo rajonirovaniya* [Unknown and poorly known pages of the Russian zoning], Moscow, LENAND Publ., 2006, 389 p. (In Russian)
- Baburin V.L. *Razvitie territorial'nyh prirodno-hozjajstven-nyh sistem kak osnovy jekonomiki* [Development of ter-ritorial natural-economic systems as a basis of economy], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2012, no. 5, p. 5–13. (In Russian)
- Baklanov P.Ja. *Territorial'nye struktury khozyaistva v eko-nomicheskom raionirovanii* [Territorial structures of economy in the economic zoning], *Social'no-jekonom-icheskaja geografija: tradicii i sovremennost'* [Social-economic geography: traditions and the present], Mos-cow, Smolensk, Ojkumena Publ., 2009, p. 9–28. (In Russian)
- Baklanov P.Ja. *Faktory i varianty izmenenij administrativno-territorial'nogo ustrojstva Dal'nego Vostoka* [Factors and variants of the administrative-territorial organization of the Far East], *Region: jekonomika i sociologija*, 1999, no. 2, p. 152–156. (In Russian)
- Baklanov P.Ja. *K teorii jekonomicheskogo rajonirovaniya ("teorema" ob jekonomicheskom rajonirovanii)* [On the theory of economic zoning (the economic zoning "theo-rem")], *Regional'nye issledovaniya*, 2016, no. 4, p. 4–9. (In Russian)
- Baklanov P.Ja. *Prostranstvennye sistemy proizvodstva (Mik-rostrukturnyj uroven' analiza i upravleniya)* [Spatial sys-tems of production (Microstructural level of analysis and management)], Moscow, Nauka Publ., 1986, 150 p. (In Russian)
- Bandman M.K. *Territorial'no-proizvodstvennye komplek-sy: teorija i praktika predplanovyh issledovanij* [Territorial-production complexes: theory and practice of preplan-ning studies], Novosibirsk, Nauka Publ., Sib. otd-e, 1980, 254 p. (In Russian)
- Blanutsa V.I. *Rajonirovanie dosovetskoj Sibiri po pochtovym setjam* [Regionalization of pre-Soviet Siberia by postal network], *Izv. RAN, Ser. geogr.*, 2016, no. 3, p. 117–124. (In Russian)
- Blanutsa V.I. *Social'no-jekonomicheskoe rajonirovanie kak sistema smyslov: kontent-analiz postsovetskih publikacij* [Socio-economic regionalization as a system of mean-ings: content analysis pf post-Soviet publications], *Geo-graficheskij vestnik*, 2017, no. 4, p. 39–50. (In Russian)
- Chistobaev A. I., Sharygin M. D. *Jekonomicheskaja i social'naja geografija: novyj jetap* [Economic and social geography: a new stage], Leningrad, Nauka Publ., 1990, 317 p. (In Russian)
- Dem'janenko A.N. *Jekonomicheskoe rajonirovanie: voprosy teorii i istorii. Ch. I* [Economic regionalization: theory and history issues. Part I], Ros. akad. nauk, Dal'nevost. otd-e, In-t jekon. issledovanij, Habarovsk, KGUP "Habarovs-kaja kraevaja tipografija", 2010, 224 p. (In Russian)
- Dem'janenko A.N. *Ob jekonomicheskom rajonirovanii i rajonoobrazovanii* [On Economic Regionalization and Formation of Regions], *Regionalistika*, 2018, t. 5, no. 6, p. 5–17. (In Russian)
- Fedorchenko A.V. *Sovremennye tendencii territorial'noj or-ganizacii promyshlennogo proizvodstva* [Modern trends in the territorial organization of industrial production], Moscow, Press-Solo Publ., 2003, 176 p. (In Russian)
- Gorbanev V.A. *K voprosu o novom geograficheskom raj-onirovanii Rossii* [New geographical regionalization of Russia], *MGIMO Review of International Relations*, 2014, no. 4(37), p. 187–196. (In Russian)
- Kolosojskij N.N. *Proizvodstvenno-territorial'noe sochetanie (kompleks) v sovetskoj ekonomicheskoi geografii* [Pro-duction-territorial combination (complex) in the Soviet economic geography], *Voprosy geografii* [Issues of geo-graphy], Moscow, Gospolitizdat Publ., 1947, p. 133–169. (In Russian)
- Kolosojskij N.N. *Izbrannye trudy* [Selected works], Smo-lensk, Ojkumena Publ., 2006, 336 p. (In Russian)
- Korytnyj L.M. *Administrativno-territorial'noe delenie Rossii: bassejnovyj princip* [The administrative-territo-rial division of Russia: the basin variant], *Geografija i prirodnye resursy*, 2006, no. 4, p. 29–37. (In Russian)
- Moshkov A.V. *Territorial'no-proizvodstvennoe komplek-soobrazovanie na Dal'nem Vostoke* [Territorial-produc-tion complex fprmation in the Far East], Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2001, 156 p. (In Russian)
- Nikitenko S.M., Goosen E.V., Pahomova E.O., Kolevatova A.V. *Cepochki dobavlennoj stoimosti kak instrument raz-vitija jekonomiki regiona syr'evoj specializacii* [Chains of additional value as an instrument for the economic devel-opment of a raw-material-based region], *Fundamental'nye issledovaniya*, 2017, no. 10, p. 375–380. (In Russian)

- Piljasov A.N. Kontury novoi teorii ekonomicheskogo raionirovaniya Rossii (osnovnye elementy) [Contours of a new theory of economic regionalization of Russia (principal elements)], *Sovremennaja regionalistika: struktura, problemy, perspektivy* [Modern regional science: structure, problems and prospects], St-Peterburg, St-Peterburg GJeU Publ., 2013, p. 31–43. (In Russian)
- Piljasov A.N., Poljachenko A.E. Rajonnyj jeffekt: problemnye voprosy teorii i praktiki [Regionary effect: problematic issues of theory and practice], *Vestnik MGU, ser. Geogr.*, 2021, no. 4, p. 25–37. (In Russian)
- Porter M. *Competitive Advantage. Creating and Sustaining Superior Performance*, Simon and Schuster, 2008, 592 p.
- Romanov M.T. Problemy jekonomicheskogo rajonirovaniya i administrativno-territorial'nogo ustrojstva Rossii v novyh usloviyah [Problems of economic regionalization and administrative-territorial organization of Russia in modern conditions], *Izvestija Rossijskoj akademii nauk, Serija geograficheskaja*, 2006, no. 3, p. 57–66. (In Russian)
- Sharygin M.D. *Ekologo-ekonomicheskie raiony (teoretiko-metodicheskie aspekty razvitija)* [Ecological-economic regions (theoretical and methodical aspects of development)], Perm', Izd-vo Permskogo un-ta, 1995, 192 p. (In Russian)
- Sharygin M.D. *Regional'naja organizacija obshhestva (teoretiko-metodologicheskie problemy sovershenstvovanija)* [Regional organization of the society (theoretical and methodological issues of improvement)], Perm', Izd-vo Permskogo un-ta, 2002, 204 p. (In Russian)
- Shuvalov V.E. Raionirovanie v trudakh ekonomiko-geografov [Regionalization in the works of economic geographers], *Social'no-jekonomicheskaja geografija v Rossii* [Social economic geography in Russia], Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2016, p. 103–116. (In Russian)
- Shuvalov V.E. Konceptual'nye problemy razvitija otechestvennoj rajonnoj shkoly social'no-jekonomicheskoi geografii [Conceptual problems of development of the Russian school of regionalization in social economic geography], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2005, no. 1, p. 13–24. (In Russian)
- Shuvalov V.E. Rajonirovanie v rossijskoj social'no-jekonomicheskoi geografii: sovremennoe sostojanie i napravlenija razvitija [Regionalization in Russian socio-economic geography: development directions], *Regional'nye issledovanija*, 2015, no. 3, p. 19–29. (In Russian)
- Smirnjagin L.V. Metodicheskie podhody k rajonirovaniyu v obshhestvennoj geografii [Methodical approaches to regionalization in social geography], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2011, no. 6, p. 13–19. (In Russian)
- Smirnjagin L.V. Uzlovye voprosy rajonirovaniya [Key issues of regionalization], *Izv. RAN, Ser. geogr.*, 2005, no. 1, p. 5–16. (In Russian)
- Sokolov S.N. Teoretiko-metodologicheskie osnovy territorial'noj organizacii obshhestva [Theoretical and methodological foundations of territorial organization of society], *Vestn. Nizhnevartovskogo gos. un-ta*, 2013, no. 3, p. 32–42. (In Russian)
- Sturgeon T.J. How Do We Define Value Chains and Production Networks? *IDS Bulletin*, 2001, vol. 32, no. 3, p. 9–18.
- Tarhov S.A. Izmenenie administrativno-territorial'nogo dele-nija v Rossii 18–20 vekah [Changes in the administrative-territorial division of Russia in the 18th–20th centuries], *Logos*, 2005, no. 1, p. 65–101. (In Russian)

Received 20.08.2023

Revised 14.10.2023

Accepted 04.12.2023

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 551.584.4

ВЛИЯНИЕ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОСАДКОВ НА ПОТОКИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ВО ВНЕТРОПИЧЕСКИХ ЛЕСАХ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

Е.М. Сатосина¹, Д.Ю. Гущина², М.А. Тарасова³, И.В. Железнова⁴, Е.Р. Емельянова⁵,
Р.Р. Гибадуллин⁶, А.М. Осипов⁷, А.В. Ольчев⁸

^{1–8} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра метеорологии и климатологии

^{1,5} Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН,
лаборатория эколого-климатических исследований

¹ Аспирант; e-mail: lisan.sat@gmail.com

² Проф., д-р геогр. наук; e-mail: dasha155@mail.ru

³ Аспирант; e-mail: mkolennikova@mail.ru

⁴ Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: zheleznovaiv@my.msu.ru

⁵ Мл. науч. сотр., e-mail: katicget@yandex.ru

⁶ Бакалавр; e-mail: ravil00121@mail.ru

⁷ Вед. инж.; e-mail: sashaosipov@list.ru

⁸ Проф., д-р биол. наук; e-mail: aoltche@gmail.com

Современные изменения климата, сопровождающиеся быстрым ростом глобальной температуры воздуха, изменением режима осадков, повторяемости и интенсивности экстремальных погодных явлений, могут оказать существенное влияние на функционирование, рост и развитие лесных экосистем. Целью данного исследования являлась оценка влияния экстремальных погодных явлений (значительных положительных и отрицательных аномалий температуры воздуха и осадков) на потоки диоксида углерода (CO₂) в лесных экосистемах внетропических широт в Северном полушарии. Для анализа потоков были выбраны 26 станций мониторинга потоков парниковых газов глобальной сети FLUXNET с наиболее продолжительными рядами наблюдений. Станции расположены в лесных экосистемах, относящихся к разным типам биомов по классификации IGBP. Метеорологические условия на станциях анализировались с использованием данных наблюдений и данных реанализа ERA5. Результаты показали, что различия в отклике потоков CO₂ на аномалии температур и осадков были обусловлены главным образом типом лесной экосистемы, ее географическим положением и региональными климатическими условиями. Экстремально высокая температура воздуха в любое время года преимущественно приводит к усилению эмиссии CO₂ в атмосферу во всех рассмотренных типах лесных экосистем, при этом наибольший отклик отмечается в хвойных лесах. Отрицательные аномалии температуры воздуха в теплый период могут оказывать противоположное воздействие, приводя как к увеличению поглощения CO₂ лесными экосистемами, так и к его снижению в зависимости от типа биома. Устойчивых закономерностей отклика потоков CO₂ на экстремально низкие температуры в холодный период года выявлено не было. При выпадении интенсивных осадков в исследуемых лесных экосистемах отмечалась преобладающая эмиссия CO₂ в атмосферу. В то же время в теплое время года после выпадения большого количества осадков был выявлен кумулятивный эффект накопления влаги в корнеобитаемом слое почвы, в результате которого происходило усиление поглощения CO₂ растительностью на фоне роста скорости фотосинтеза растений в условиях достаточного почвенного увлажнения.

Ключевые слова: лесные экосистемы, реанализ, пульсационные измерения, FLUXNET

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.2

ВВЕДЕНИЕ

Таежные хвойные, смешанные хвойно-широколиственные и широколиственные леса умеренных широт, покрывающие большие площади суши в Се-

верном полушарии (около 17,5 млн км²), определяют радиационный, тепловой, водный и углеродный баланс значительных территорий, тем самым оказывая существенное влияние на региональные и глобаль-

ные климатические условия [FAO, 2020]. Современные изменения климата, проявляющиеся в росте глобальной температуры, изменении режима осадков и увеличении повторяемости экстремальных явлений погоды [Ritter et al., 2020; Frank et al., 2015; Kramer et al., 2020], могут оказывать существенное воздействие на функционирование и продуктивность лесных экосистем [Frank et al., 2015; Ummenhofer et al., 2017]. Устойчивость лесных экосистем, особенно к засухам, может существенно различаться для лесных биомов, что определяется прежде всего функциональными особенностями экосистем [Gazol et al., 2018]. Так, недавние исследования показали, что устойчивость экосистем лесов умеренных широт к экстремальным воздействиям, особенно лесов, расположенных вблизи южной границы ареала, медленно уменьшается на фоне роста температуры и увеличения дефицита почвенного увлажнения [Forzieri et al., 2022]. Результаты экспериментальных исследований показывают, что высокая повторяемость летних волн жары и засух в Северной Америке и Европе за последние два десятилетия оказала значительное воздействие на функционирование лесных экосистем, что отразилось на величине первичной продуктивности древостоев и результирующих потоках CO_2 между земной поверхностью и атмосферой [Ciais et al., 2005; Zhang et al., 2022; Xu et al., 2020]. Экстремально высокие температуры значительно снижают валовую (GPP) и нетто (NPP) первичную продукцию лесных насаждений на всех континентах [Xu et al., 2020]. Однако недавние исследования также показали, что, в зависимости от местных ландшафтных условий, волны жары могут привести как к значительному уменьшению, так и к увеличению скорости почвенного дыхания [Hoover et al., 2016; Anjileli et al., 2021]. Серьезными последствиями волн жары и засух в умеренных широтах также могут быть лесные пожары и вспышки массового размножения насекомых-вредителей, которые приводят к частичной или полной гибели лесной растительности, что непосредственно влияет на региональные климатические условия [Flannigan et al., 2000; Flower, Gonzalez-Meler, 2015; Кислов и др., 2019]. Не только экстремально высокие, но и экстремально низкие температуры воздуха (особенно внезапные заморозки) могут существенно влиять на функционирование и продуктивность лесных экосистем [Charrier et al., 2021].

Обильные осадки также оказывают негативное влияние на лесные биомы и приводят к аномалиям потоков CO_2 в лесных экосистемах [Gushchina et al., 2023]. В частности, обильные осадки после продолжительного периода сухой погоды могут привести к резкому увеличению скорости почвенного дыхания на фоне роста влажности почвы [Manzoni et al., 2020]. Этот эффект известен как «эффект Бирча»

[Birch, 1964]. Экстремальные осадки могут вызывать подтопление местности, что ведет к снижению скорости почвенного дыхания [Kramer et al., 2008]. Кроме того, сильные дожди, сопровождающиеся поверхностным переувлажнением почвы, могут вызывать сильную эрозию почвы и вымывание органического углерода за пределы экосистемы [Dinsmore et al., 2013].

Данные наблюдений, полученные для различных типов лесных биомов, выявили наличие противоположных тенденций в изменении составляющих углеродного баланса под воздействием экстремальных погодных явлений в разных географических регионах. Отличия в условиях роста и механизмах адаптации лесов к негативному воздействию атмосферных факторов (экстремальным температурам и осадкам) могут привести к значительным неопределенностям в оценках взаимосвязей между лесными экосистемами и атмосферой. Изучение отклика наземных экосистем на экстремальные погодные явления представляет собой сложную задачу, требующую экспериментальных и модельных исследований, что позволит обеспечить лучшее понимание процессов адаптации лесных экосистем и возможность прогнозирования реакции различных лесных биомов на воздействие внешних факторов [Gushchina et al., 2023].

Основная цель нашего исследования – оценить реакцию потоков CO_2 на экстремальные погодные явления (положительные и отрицательные аномалии температуры и осадков) в различных типах лесных экосистем внетропических широт. Было использовано несколько подходов к определению порогов экстремальности погодных явлений, что позволило оценить как мгновенное, так и запаздывающее влияние экстремальных погодных явлений на аномалии потоков CO_2 .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования влияния экстремальных температур и осадков на потоки CO_2 в лесных экосистемах внетропических широт были использованы данные метеорологических наблюдений и измерения потоков методом турбулентных пульсаций на станциях глобальной сети мониторинга за потоками парниковых газов FLUXNET [The Data Portal..., 2023]. Существующие пропуски в рядах метеорологических наблюдений заполнялись с использованием данных реанализа ERA5 [Smith, 2011]. В частности, были использованы данные о температуре воздуха на 2 м с трехчасовым разрешением, а также данные о количестве осадков с часовым разрешением для 1991–2021 гг.

Для анализа отклика внетропических лесных экосистем на экстремальные явления погоды было вы-

брано 26 станций мониторинга, имеющих длинные периоды наблюдений, находящихся в различных эколого-климатических условиях (рис. 1), а также в районах, характеризующихся наиболее значительным увеличением повторяемости экстремальных погодных явлений за последние десятилетия [Железнова и Гущина, 2023; FAO, 2020]. Выбранные станции относятся к пяти типам биомов в соответствии с международной классификацией, принятой в Международной геосферно-биосферной программе (International Geosphere-Biosphere Programme,

IGBP) и используемой в сети мониторинга потоков парниковых газов FLUXNET [Belward et al., 1999]: смешанные хвойно-широколиственные леса, широколиственные леса, хвойные вечнозеленые (таежные) леса, вечнозеленые широколиственные леса и хвойные листопадные (лиственничные) леса. Максимальный период непрерывных наблюдений на выбранных станциях составил 26 лет, минимальный – 3 года. Более детальные характеристики растительности на станциях мониторинга потоков представлены в таблице.

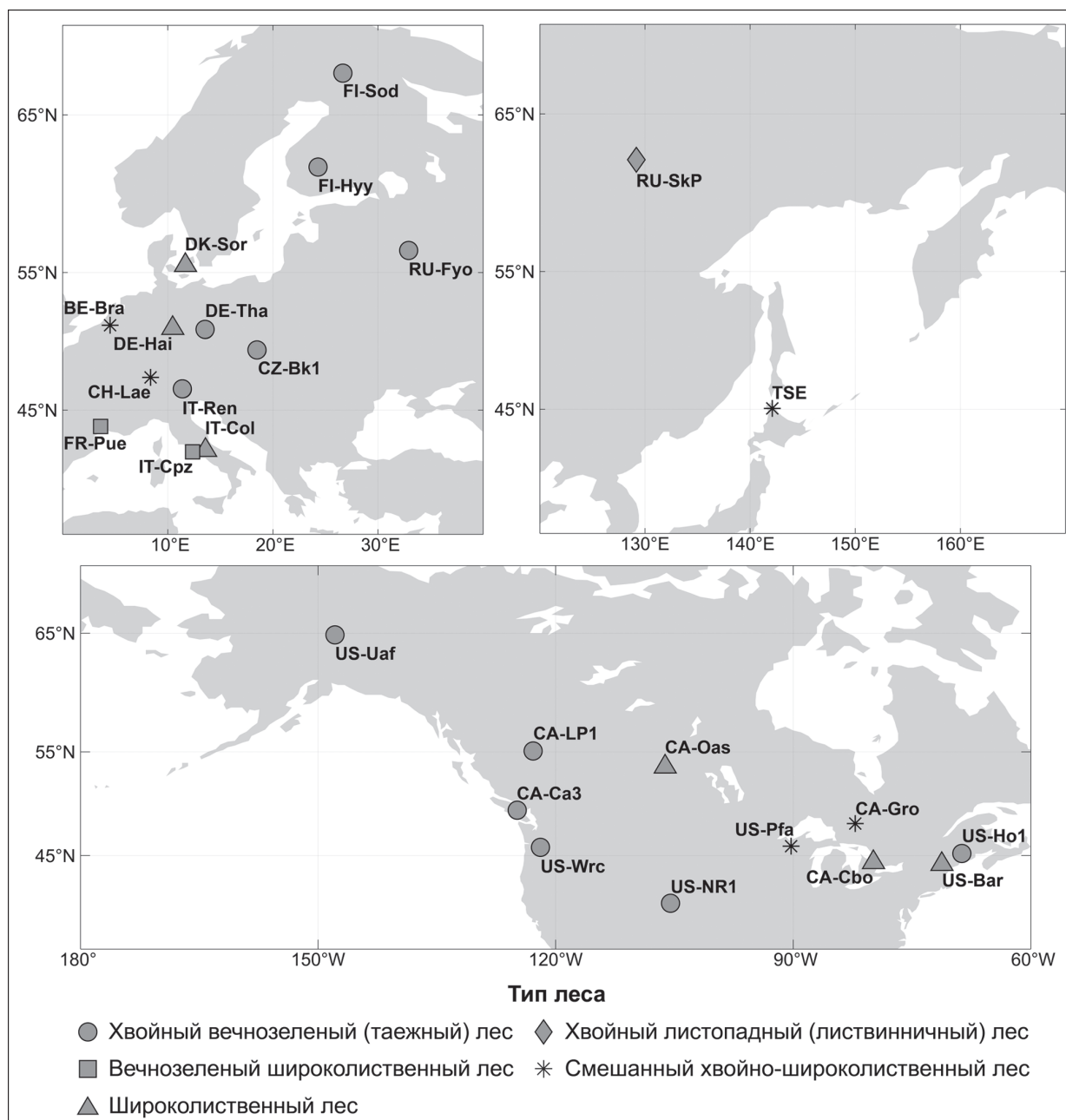


Рис. 1. Станции глобальной сети мониторинга FLUXNET, отобранные для анализа влияния экстремальных погодных условий на потоки CO_2

Fig. 1. The stations of global FLUXNET network selected for the analysis of the CO_2 flux response to extreme weather conditions

Таблица
Станции сети FLUXNET, выбранные для анализа отклика потоков CO₂ на аномалии температуры и осадков

Станция (код FLUXNET)	Тип биома (классификация IGBP)	Тип климата (по Кёппену)	Видовой состав древесного яруса растительности	Возраст древосто- я	Средняя высота древостоя, м	Период измерений
BE-Bra	Смешанный хвойно-широколи- ственный лес (Mixed Forest)	Cfb	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>Quercus robur</i>	94	21	1999–2014
CA-Gro		Dfb	<i>Populus tremuloides</i> , <i>Picea marian</i> , <i>Picea glauca</i> , <i>Betula papyrifera</i> , <i>Abies balsame</i>	93	31	2003–2014
CH-Lae		Dfb	<i>Picea abies</i> , <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i>	52–185	30,6	2004–2014
US-PFa		Dfb	<i>Populus grandidentata</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>Acer rubrum</i> , <i>Tilia tomentosa</i> , <i>Alnus incana</i>	110–120	24	1996–2022
TSE		Dfb	<i>Quercus crispula</i> , <i>Betula ermanii</i> , <i>Betula platyphylla</i> var. <i>japonica</i> , <i>Abies sachalinensis</i> , <i>Picea jezoensis</i>	175	18–25	2001–2002
CA-Oas	Широколиственный лес (Deciduous Broadleaf forests)	Dfc	<i>Populus tremuloides</i> , <i>Populus balsamifera</i> , <i>Corylus cornuta</i> , <i>Alnus crispa</i>	104	22	1996–2010
DE-Hai		Dfb	<i>Fagus sylvatica</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Acer plantanoides</i> , <i>Carpinus betulus</i>	250	33	2000–2012
DK-Sor		Cfb	<i>Fagus sylvatica</i>	102	25,8	1996–2014
IT-Col		Cwa	<i>Fagus sylvatica</i>	90	20,2	1996–2014
US-Bar		Dfb	<i>Fagus grandifolia</i> , <i>Acer saccharum</i> , <i>Betula alleghaniensis</i> , <i>Betula papyrifera</i> , <i>Tsuga canadensis</i>	120	19	2004–2017
CA-Cbo	Хвойный вечнозеленый (таеж- ный) лес (Evergreen Needleleaf forests)	Dfb	<i>Acer rubrum</i> , <i>Pinus strobus</i> , <i>Populus grandidentata</i> , <i>Fraxinus americana</i>	107	22	1995–2020
CZ-BK1		Dfb	<i>Picea abies</i>	27	12	2004–2014
DE-Tha		Cfb	<i>Picea abies</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>Larix decidua</i> , <i>Pinus sylvestris</i>	136	25	1996–2014
FI-Hyy		Dfc	<i>Pinus sylvestris</i>	80	14	1996–2014
FI-Sod		Dfc	<i>Pinus sylvestris</i>	100	12,7	2001–2014
IT-Ren		Cfb	<i>Picea abies</i> , <i>Pinus cembra</i> , <i>Larix decidua</i>	90	29	1998–2013
RU-Fyo		Dfb	<i>Picea abies</i> , <i>Betula pubescens</i>	150	15	1998–2014
US-NR1		Dfc	<i>Abies lasiocarpa</i> , <i>Picea engelmannii</i> , <i>Pinus contorta</i>	118	18	1998–2014
CA-LP1		Csa	<i>Pinus contorta</i>	97	15	2007–2021
CA-Ca3		Cfb	<i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Thuja plicata</i> , <i>Abies grandis</i>	35	8	2001–2021
US-Ho1	Вечнозеленый широколиствен- ный лес (Evergreen Broadleaf forests)	Dfb	<i>Picea rubens</i> , <i>Pinus strobus</i> , <i>Tsuga canadensis</i>	130	20	1996–2020
US-Uaf		Dwc	<i>Picea mariana</i>	85	3	2003–2021
US-Wrc		Csb	<i>Picea rubens</i> , <i>Tsuga canadensis</i>	500	60	1999–2015
IT-Cpz		Csb	<i>Quercus ilex</i>	100	10	1997–2009
FR-Pue		Csa	<i>Buxus sempervirens</i> , <i>Quercus ilex</i>	129	19	2000–2014
RU-SkP	Хвойный листопадный (лист- венный) лес (Deciduous Needleleaf forests)	Dfc	<i>Larix</i> , <i>Salix</i> , <i>Betula pendula</i>	190	20	2012–2014

Анализ данных по потокам CO_2 , полученных со станций мониторинга, проводился в соответствии с международными рекомендациями для обработки данных измерений методом турбулентных пульсаций (eddy covariance). Среднесуточные значения потоков CO_2 для каждой выбранной станции были рассчитаны путем усреднения 30-минутных данных измерений. Пробелы в данных по потокам, вызванные перебоями в работе оборудования, слабой турбулентностью, осадками и др., были восстановлены с использованием программного пакета ReddyProc [Wutzler et al., 2018].

Среднесуточные значения температуры воздуха были рассчитаны на основе 30-минутных данных измерений или, при их отсутствии, трехчасовых данных реанализа. Среднесуточное количество осадков рассчитывалось как суточная сумма данных об осадках по данным реанализа с часовым временным разрешением или данным наблюдений на мониторинговых станциях с 30-минутным разрешением. Температурные аномалии были рассчитаны путем вычитания среднесуточного значения температуры воздуха, рассчитанного по данным реанализа за 1991–2021 гг., для каждого календарного дня.

Периоды экстремальных температур были определены как промежутки, когда аномалия среднесуточной температуры превышала 95% квантиль (для экстремально высоких температур) или не достигала 5% квантиля (для экстремально низких температур) функции плотности вероятности. Для анализа долгосрочных временных рядов по температуре было сделано предположение о его нормальном распределении [Железнова и Гущина, 2023]. Функции распределения были рассчитаны отдельно для каждого месяца и затем усреднены за весь период 1991–2021 гг.

Для определения порога экстремальных осадков были использованы два подхода. В первом подходе дни с экстремально обильными осадками были определены как дни с суточным количеством осадков, превышающим 95% квантиль функции плотности вероятности (для осадков применялось распределение Вейбулла). Второй подход был основан на оценке индекса *API* (Antecedent Precipitation Index), который определяет кумулятивный эффект выпавших осадков на потоки CO_2 . Индекс рассчитывался как [Li et al., 2021]:

$$API = \sum_{t=1}^M P_t k^t,$$

где P_t – количество осадков, выпавших за предшествующий заданному дню период продолжительностью t дней, M – продолжительность периода для расчета накопленного числа осадков, а k – параметр, характеризующий снижение вклада выпав-

ших осадков в текущее влагосодержание корнеобитаемого слоя почвы с течением времени. В нашем исследовании мы приняли, что M равно 14 дням, а k равно 0,8.

Экстремально высокий *API* определялся как аномалия, превышающая одно стандартное отклонение (СКО) временного ряда *API* на каждой станции. Чтобы исключить влияние сезонного цикла, СКО рассчитывалось отдельно для каждого месяца. Пороговым значением для чрезвычайно низкого *API* являлся порог в 5% от амплитуды временного ряда. Амплитуда была определена как разница между средним максимумом и средним минимумом *API* для каждого месяца, усредненная за 1991–2021 гг. Порог в 1 СКО неприменим для низкого *API*, поскольку СКО часто превышает среднее значение *API* для конкретного месяца, и, следовательно, значения ниже –1 СКО являются отрицательными, что невозможно для количества осадков.

Экстремально высокие / низкие аномалии потоков CO_2 были определены как превышающие ± 1 СКО временного ряда для каждого отдельного месяца.

Квантильный подход не применялся для потоков и *API*, так как их эмпирические функции распределения вероятности значительно различались в зависимости от типа экосистемы, что затрудняло выбор типа теоретического распределения. Кроме того, короткие временные ряды на нескольких станциях также затрудняли определение соответствующего теоретического распределения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ отклика потоков CO_2 на экстремальные погодные условия, связанные с экстремально высокими / низкими температурой и осадками, выявил высокое разнообразие реакций потоков CO_2 в разных типах тропических лесов. Внутригодовая изменчивость CO_2 обмена определяется главным образом сезонными изменениями фотосинтезирующей биомассы растительности [Gushchina et al., 2023]. В теплую половину года при оптимальных для роста растений температурах, приходящей солнечной радиации и влажности почвы скорость фотосинтеза древесных растений и дыхание экосистемы имеют максимальные значения как в хвойных, так и в лиственных лесах. В холодную половину года даже для вечнозеленых древесных пород фотосинтез или полностью отсутствует, или существенно подавлен в результате уменьшения притока солнечной радиации и низких температур воздуха. Поэтому в настоящем исследовании отклик различных типов лесных экосистем на аномальные погодные условия в теплое и холодное время года

рассматривался отдельно. Начало и конец тепло- го сезона определялись как устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через 0°C на протяжении не менее семи последовательных дней. Для нескольких станций, находящихся в теп- лых климатических условиях с преобладающими на протяжении всего года положительными темпе- ратурами (например, станции в Средиземноморье), смена сезонов для листопадных лесов определялась по резкому изменению значений GPP, возникающе- му во время появления и опада листьев.

Во всех рассматриваемых лесных экосистемах в течение теплого полугодия в периоды экстремально высоких температур (превышающих 95% квантиль) наблюдалась положительная аномалия потока CO₂, соответствующая усилению эмиссии CO₂ в атмосфе-

ру (рис. 2А). В течение 29–33% дней с аномально вы- сокими температурами отмечались положительные аномалии потока CO₂, превышающие 1 СКО. Это обусловлено возможным уменьшением скорости фото- синтеза и снижением GPP в лесных экосистемах при аномально высоких температурах. Отрицательные аномалии CO₂ также наблюдались в периоды экстре- мально высоких температур, однако процент случаев с подобными эпизодами существенно ниже и состав- ляет 7–22% (см. рис. 2А). Противоположный отклик потоков CO₂ на повышение температуры может быть связан с отличиями в режиме увлажнения почвы в разных лесных экосистемах, что приводит к возник- новению как положительных, так и отрицательных аномалий потоков CO₂, наблюдаемых при экстре- мально высоких температурах.

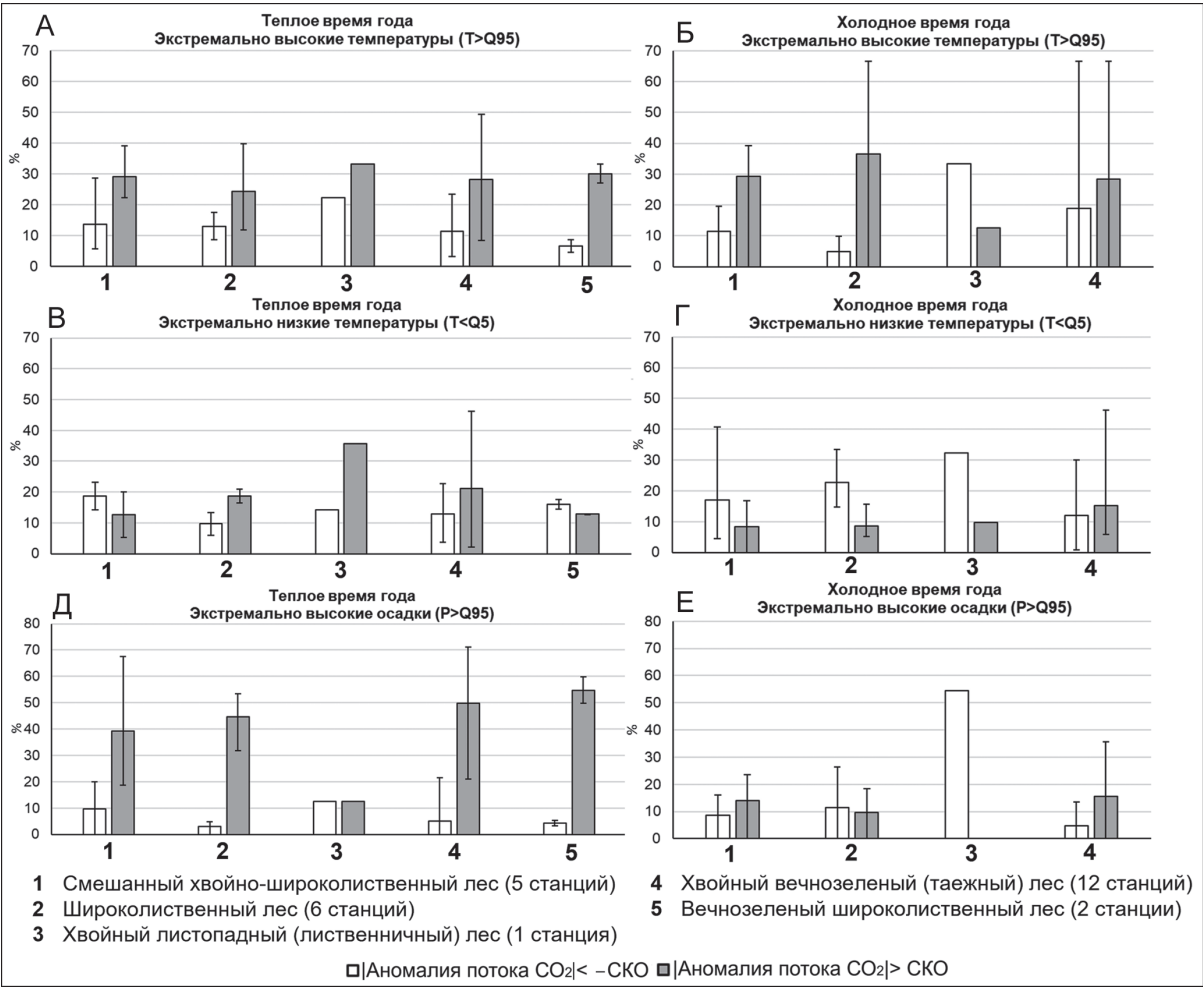


Рис. 2. Процент дней с аномалиями потока CO₂, превышающими 1 СКО и возникающими одновременно с экстремально высокими (А, Б) и низкими (В, Г) температурами и экстремально высокими (Д, Е) осадками в теплое (левая колонка) и холодное (правая колонка) время года. Столбиками показано среднее значение по биому, черными вертикальными отрезками – разброс % дней с аномалиями потока CO₂ по станциям внутри одного биота

Fig. 2. The percentage of days for different forest types when CO₂ flux anomalies greater than 1 STD occurred simultaneously with extremely high (A, B) and low (B, Г) temperatures and extremely high (Д, Е) precipitation during the warm (left column) and cold (right column) seasons. The column represents the mean for the biome, the black vertical whiskers show the spread of % of days across stations within one biome

Отклик потока CO_2 на отрицательные аномалии температуры в теплое время года существенно различается не только между различными типами лесных биомов, но даже и между лесами в пределах одного биома в зависимости от их географического положения, видового состава растительности и микроклиматических условий. Так, на трех станциях, расположенных в зоне смешанных лесов и на одной станции в зоне вечнозеленых широколиственных лесов, поглощение CO_2 устойчиво увеличивалось при отрицательных аномалиях температуры, что указывает на более благоприятные условия для фотосинтеза при относительно низких летних температурах. Однако для большинства станций, располагающихся в таежных, широколиственных и лиственных лесах положительные аномалии CO_2 при отрицательных аномалиях температуры наблюдались все же чаще, чем отрицательные (см. рис. 2В). Подобный эффект может быть связан с более интенсивным влиянием снижения температуры на физиологические процессы в растительности, чем на процессы в почвенном покрове.

Сравнивая влияние положительных и отрицательных аномалий температуры в теплый период на поток CO_2 можно увидеть, что экстремально высокие температуры оказывали более сильное влияние на поток CO_2 , чем экстремально низкие, и выражались преимущественно в увеличении эмиссии CO_2 в атмосферу. Это подтверждает гипотезу о том, что волны жары являются ключевым фактором, влияющим на структуру углеродного баланса во внетропических лесных экосистемах.

Влияние температурных аномалий на поток CO_2 в холодное время года проявлялось главным образом в изменении интенсивности дыхания экосистемы, регулируемой вариациями температуры воздуха. В холодный период рассматривалось только четыре биома, так как в вечнозеленых широколиственных лесах в условиях средиземноморского климата холодного периода не отмечалось (температуры устойчиво не опускались ниже 0°C). Оттепели (температура выше 95% квантиля) в зимний период в основном приводили к усилению эмиссии CO_2 в атмосферу (см. рис. 2Б), обусловленной увеличением дыхания экосистемы. Экстремально низкие температуры в холодный период, наоборот, сопровождалась отрицательными аномалиями потока CO_2 (см. рис. 2Г). В таежных лесах, расположенных в более высоких широтах, аномалии потока CO_2 наблюдались редко, что обусловлено очень маленькими значениями потоков в условиях низкой фотосинтетической активности растений.

Поскольку характеристики осадков (форма, интенсивность и продолжительность) резко различаются в теплый и холодный сезоны, можно ожидать,

что они могут вызывать разные изменения в потоке CO_2 . Для анализа использовались две характеристики режима осадков: суточное количество осадков, отражающее мгновенное влияние интенсивных осадков на потоки CO_2 , а также индекс API , отражающий кумулятивный эффект осадков за двухнедельный период.

Результаты анализа показали, что практически во всех рассматриваемых типах лесных экосистем обильные осадки в теплое время года приводили к увеличению эмиссии CO_2 в атмосферу: положительные аномалии потока $\text{CO}_2 > 1$ СКО отмечались в 40–55% дней с экстремальными осадками (см. рис. 2Д). Наблюдаемый отклик может быть связан с «эффектом Бирча» [Birch, 1964], который проявляется в интенсификации почвенного дыхания в результате резкого повышения влажности почвы и, как следствие, увеличения скорости разложения и минерализации органического вещества в почве при сильных осадках и интенсивном обводнении верхних почвенных горизонтов.

Кумулятивный эффект (API) от экстремально высоких осадков в теплый период характеризуется преобладанием экстремальных положительных аномалий потока CO_2 над отрицательными (рис. 3А). Однако процент дней с усилением поглощения CO_2 в течение двух недель после интенсивных осадков существенно выше, чем для мгновенного отклика. Увеличение поглощения CO_2 в период после обильных осадков может быть связано с усилением скорости фотосинтеза растительного покрова при солнечной погоде и оптимальных условиях почвенного увлажнения.

Продолжительный дефицит осадков, представленный экстремально низкими значениями API , в теплое время года сопровождался преимущественно отрицательными аномалиями потока CO_2 (усиление поглощения) в большинстве рассматриваемых лесных экосистем (см. рис. 3В). Это характеризует высокий адаптивный потенциал исследуемых лесных экосистем к кратковременным (менее 14 дней) периодам без осадков. С другой стороны, усилению поглощения CO_2 могла способствовать малооблачная погода, преобладающая в периоды без осадков, которая сопровождается увеличением притока прямой солнечной радиации и соответствующей активизацией процессов фотосинтеза. Положительные аномалии потока CO_2 встречались чаще отрицательных в лиственном лесу в центральной Якутии (см. рис. 3В, гистограмма 2), что отражает более сильное негативное влияние дефицита осадков на скорость фотосинтеза лиственных древостоев, чем на скорость экосистемного дыхания. Это может быть обусловлено, прежде всего, поверхностной структурой корневой системы древостоев, обуслов-

ливающей условия дефицита доступной влаги у древесных растений в продолжительные периоды без осадков. Кроме того, на увеличение экосистемного дыхания может оказывать влияние усиление гетеротрофного почвенного дыхания за счет вклада оттаивших богатых органическим веществом многолетнемерзлых грунтов.

В отличие от теплого времени года, когда осадки оказывают как прямое, так и косвенное влияние на поток CO_2 через изменение влажности почвы, воздействующее на скорость фотосинтеза и дыхания древесных растений, а также скорость эмиссии CO_2 с поверхности почвы, в холодный период года в

лесах умеренных широт при отрицательных температурах и устойчивом снежном покрове отсутствуют и прямые, и косвенные физические и биологические механизмы воздействия осадков на потоки CO_2 . В холодное время года реакцию потоков CO_2 на аномальные осадки и API можно ожидать лишь в начале и конце холодного сезона до установления снежного покрова и промерзания грунта, а также после таяния снежного покрова. Отклик потоков CO_2 на аномалии осадков может отмечаться в периоды оттепелей при полном исчезновении снежного покрова. Подобные периоды зафиксированы на станциях с морским умеренным климатом.

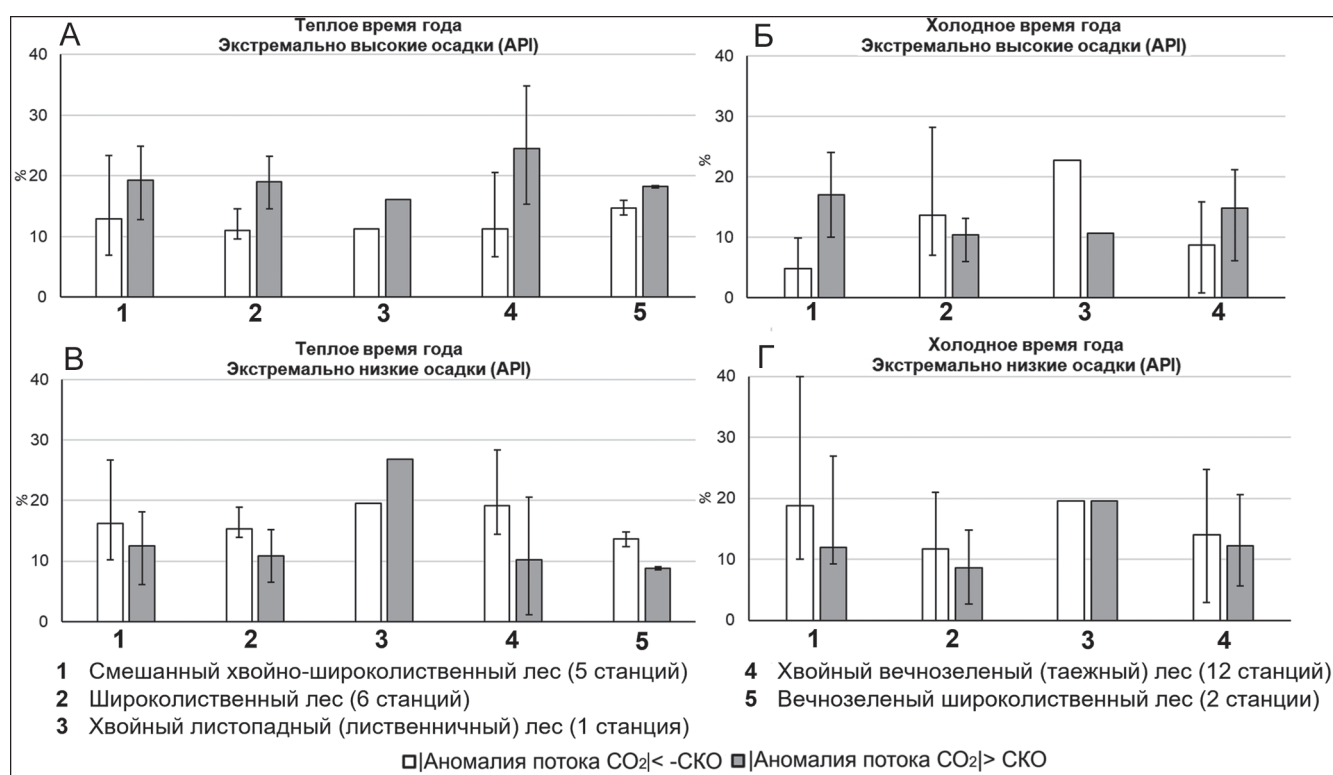


Рис. 3. Процент дней с аномалиями потока CO_2 , превышающими 1 СКО и возникающими одновременно с экстремально высокими (А, Б) и низкими (В, Г) API в теплое (левая колонка) и холодное (правая колонка) время года. Столбиками показано среднее значение по биому, черными вертикальными отрезками – разброс % дней с аномалиями потока CO_2 по станциям внутри одного биота

Fig. 3. The percentage of days when CO_2 flux anomalies greater than 1 STD occurred simultaneously with extremely high (A, B) and low (B, Г) API during the warm (left column) and cold (right column) seasons. The column represents the mean for the biome, the black vertical whiskers show the spread of % of days across stations within one biome

На станциях мониторинга в зоне распространения широколиственных лесов с морским климатом без постоянного снежного покрова, например в Дании (станция DK-Sor) и Италии (станция IT-Col), в зимние месяцы преобладало поглощение CO_2 в дни с экстремально большим количеством осадков (см. рис. 2Е, белый столбец под номером 2). В том же

типе леса на станциях DE-Hai и DK-Sor кумулятивное воздействие сильных осадков ($API > \text{СКО}$) также приводило к отрицательной аномалии потока CO_2 (см. рис. 3Б, белый столбец под номером 2). В смешанных хвойно-широколиственных лесах, напротив, положительные аномалии потока CO_2 наблюдались на 13% чаще, чем отрицательные аномалии.

Засушливые периоды, наблюдаемые в холодное время года (низкий API), вели к отрицательным аномалиям потока CO_2 на большинстве исследуемых станций (см. рис. 3Г), как и в теплый период года. Максимальный процент дней (40%) с сильными отрицательными аномалиями потока CO_2 , связанными с низким API , наблюдался в смешанном лесу в Швейцарских Альпах (станция CH-Lae).

Учитывая отсутствие прямого воздействия осадков на поток CO_2 в холодное время года в большинстве рассмотренных лесных экосистем, некоторые выявленные связи между аномалиями осадков и потоков CO_2 , особенно на станциях, расположенных в северных широтах, могли быть обусловлены комбинированным воздействием нескольких атмосферных факторов. Во многих случаях комбинированное воздействие, например, температуры и осадков может привести к положительным аномалиям потока CO_2 . Солнечная радиация также могла оказывать влияние, усиливая возникновение отрицательных аномалий потока CO_2 в периоды таяния снега, включая периоды без осадков.

ВЫВОДЫ

Анализ отклика потоков CO_2 на экстремальные погодные условия, связанные с экстремально высокими / низкими температурой и осадками, выявил высокое разнообразие реакций потоков CO_2 в разных типах лесных биомов внетропической зоны. Выявленные особенности отклика определялись совокупностью биотических и абиотических факторов, включая характер растительного покрова и региональные климатические условия, что требу-

ет дальнейших исследований и увеличения числа станций мониторинга.

Одним из ключевых результатов настоящего исследования является вывод о том, что в ответ на экстремальные погодные условия в лесных экосистемах умеренных широт чаще возникают положительные аномалии потоков CO_2 , т. е. усиление эмиссии CO_2 в атмосферу за счет ослабления ассимиляционных процессов в растениях. Усиление поглощения преобладает только при низких температурах в теплый период, а также при дефиците осадков как в теплый, так и в холодный период.

Условия экстремальной жары чаще вызывают аномалии потоков CO_2 , чем экстремально низкие температуры, что указывает на необходимость дальнейших исследований влияния волн жары на углеродный баланс.

Отклик потоков CO_2 на мгновенный и кумулятивный эффект аномальных осадков существенно различается: в момент выпадения интенсивных дождей в лесах умеренных широт значительно возрастает эмиссия CO_2 , тогда как продолжительный период с обильными осадками (до 14 дней) часто приводит к усилению поглощения CO_2 лесной экосистемой.

Разнообразие отклика лесных биомов на аномальную температуру и осадки указывает на сложный механизм отклика лесов на экстремальные погодные явления. Потоки CO_2 могут служить индикаторами состояния и функционирования растительного покрова и почвенной биоты. Очевидно, что подобные исследования требуют расширения числа исследуемых станций, включающих данные мониторинга потоков в различных типах лесных экосистем за большие интервалы времени.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 22–17–00073.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Железнова И.В., Гущина Д.Ю. Изменчивость экстремальных температур воздуха и осадков в конце XX и начале XXI века в различных природных зонах по данным реанализа ERA5 // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2023. Т. 59. № 5. С. 549–559. DOI: 10.31857/S0002351523050139.
- Кислов А.В., Торопов П.А., Платонов В.С. и др. Региональное моделирование климата для географического анализа // *Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. Геогр.* 2019. № 5. С. 3–12.
- Anjileli H., Huning L., Mofstakhari H. et al. Extreme heat events heighten soil respiration, *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, no. 1, p. 6632, DOI: 10.1038/s41598-021-85764-8.
- Belward A.S., Estes J., Kline K. et al. The IGBP-DIS global 1 km land-cover data set DISCover: A project overview, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1999, vol. 65, no. 9, p. 1013–1020.
- Birch H.F. Mineralisation of plant nitrogen following alternate wet and dry conditions, *Plant and Soil*, 1964, p. 43–49.
- Charrier G., Martin-StPaul N., Damesin C. et al. Interaction of drought and frost in tree ecophysiology: rethinking the timing of risks, *Annals of Forest Science*, 2021, vol. 78, no. 2, p. 1–15, DOI: 10.1007/s13595-021-01052-5.
- Ciais P., Reichstein M., Viovy N. et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *Nature*, 2005, vol. 437, no. 7058, p. 529–533, DOI: 10.1038/nature03972.
- Dinsmore K.J., Billett M.F., Dyson K.E. Temperature and precipitation drive temporal variability in aquatic carbon and GHG concentrations and fluxes in a peatland catchment, *Global change biology*, 2013, vol. 19, no. 7, p. 2133–2148, DOI: 10.1111/gcb.12209.

- FAO. *Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report*, FAO, Rome, Italy, 2020, с. 11–23, DOI: 10.4060/ca9825en.
- Flannigan M.D., Stocks B.J., Wotton B.M. Climate change and forest fires, *Science of the total environment*, 2000, vol. 262, no. 3, p. 221–229, DOI: 10.1016/S0048-9697(00)00524-6.
- Flower C.E., Gonzalez-Meler M.A. Responses of temperate forest productivity to insect and pathogen disturbances, *Annual review of plant biology*, 2015, vol. 66, p. 547–569, DOI: 10.1146/annurev-arplant-043014-115540.
- Forzieri G., Dakos V., McDowell N. et al. Emerging signals of declining forest resilience under climate change, *Nature*, 2022, vol. 608, no. 7923, p. 534–539, DOI: 10.1038/s41586-022-04959-9.
- Frank D., Reichstein V., Bach M. et al. Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: concepts, processes and potential future impacts, *Global change biology*, 2015, vol. 21, no. 8, p. 2861–2880, DOI: 10.1111/gcb.12916.
- Gazol A., Camarero J., Vicente-Serrano S. et al. Forest resilience to drought varies across biomes, *Global change biology*, 2018, vol. 24, no. 5, p. 2143–2158, DOI: 10.1111/gcb.14082.
- Gushchina D., Tarasova M., Satosina E. et al. The Response of Daily Carbon Dioxide and Water Vapor Fluxes to Temperature and Precipitation Extremes in Temperate and Boreal Forests, *Climate*, 2023, vol. 11, no. 10, p. 206, DOI: 10.3390/cli11100206.
- Hoover D.L., Knapp A.K., Smith M.D. The immediate and prolonged effects of climate extremes on soil respiration in a mesic grassland, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, vol. 121, no. 4, p. 1034–1044, DOI: 10.1002/2015JG003256.
- Kramer K., Vreugdenhil S.J., Van Der Werf D.C. Effects of flooding on the recruitment, damage and mortality of riparian tree species: A field and simulation study on the Rhine floodplain, *Forest Ecology and Management*, 2008, vol. 255, no. 11, p. 3893–3903, DOI: 10.1016/j.foreco.2008.03.044.
- Kramer R.D., Ishii H.R., Carter K. et al. Predicting effects of climate change on productivity and persistence of forest trees, *Ecological Research*, 2020, vol. 35, no. 4, p. 562–574, DOI: 10.1111/1440-1703.12127.
- Li X., Wei Y., Li F. Optimality of antecedent precipitation index and its application, *Journal of Hydrology*, 2021, vol. 595, p. 126027, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126027.
- Manzoni S., Chakrawal A., Fischer T. et al. Rainfall intensification increases the contribution of rewetting pulses to soil heterotrophic respiration, *Biogeosciences*, 2020, vol. 17, no. 15, p. 4007–4023, DOI: 10.5194/bg-17-4007-2020.
- Ritter F., Berkelhammer M., Garcia C. Distinct response of gross primary productivity in five terrestrial biomes to precipitation variability, *Communications Earth & Environment*, 2020, vol. 1, no. 1, p. 34, DOI: 10.1038/s43247-020-00034-1.
- Smith M.D. An ecological perspective on extreme climatic events: a synthetic definition and framework to guide future research, *Journal of Ecology*, 2011, vol. 99, no. 3, p. 656–663, DOI: 10.1111/j.1365-2745.2011.01798x.
- Ummenhofer C.C., Meehl G.A. Extreme weather and climate events with ecological relevance: a review, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2017, vol. 372, no. 1723, p. 20160135, DOI: 10.1098/rstb.2016.0135.
- Wutzler T., Lucas-Moffan A., Migliavacca M. et al. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc, *Biogeosciences*, 2018, vol. 15, no. 16, p. 5015–5030, DOI: 10.5194/bg-15-5015-2018.
- Xu B., Arain M., Black T. et al. Seasonal variability of forest sensitivity to heat and drought stresses: a synthesis based on carbon fluxes from North American forest ecosystems, *Global change biology*, 2020, vol. 26, no. 2, p. 901–918, DOI: 10.1111/gcb.14843.
- Zhang Z., Weimin Ju., Yanlian Z. et al. Revisiting the cumulative effects of drought on global gross primary productivity based on new long-term series data (1982–2018), *Global Change Biology*, 2022, vol. 28, no. 11, p. 3620–3635, DOI: 10.1111/gcb.16178.
- Электронный ресурс
The Data Portal Serving the FLUXNET Community, URL: <https://fluxnet.org/data/> (дата обращения 25.03.2023).

Поступила в редакцию 23.09.2023

После доработки 15.10.2023

Принята к публикации 04.12.2023

EFFECTS OF TEMPERATURE AND PRECIPITATION ANOMALIES ON CARBON DIOXIDE FLUXES IN THE EXTRATROPICAL FORESTS OF THE NORTHERN HEMISPHERE

E.M. Satosina¹, D.Y. Gushchina², M.A. Tarasova³, I.V. Zhelezнова⁴, E.R. Emelianova⁵,
R.R. Gibadullin⁶, A.M. Osipov⁷, A.V. Olchev⁸

¹⁻⁸ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology
^{1,5} A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Science,
Laboratory of Ecological and Climatic Research

¹ Ph.D. student; e-mail: lisan.sat@gmail.com

² Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: dasha155@mail.ru

³ Ph.D. student; e-mail: mkolennikova@mail.ru

⁴ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: zheleznovaiv@my.msu.ru

⁵ Junior Scientific Researcher; e-mail: katikget@yandex.ru

⁶ Bachelor student; e-mail: rasil00121@mail.ru

⁷ Leading Engineer; e-mail: sashaosipov@list.ru

⁸ Professor, D.Sc. in Biology; e-mail: aolchev@gmail.com

Modern climate change, accompanied by rapidly increasing global air temperature, changing precipitation patterns, frequency and severity of extreme weather events, may have a significant impact on the functioning, growth, and development of forest ecosystems. The aim of the study was to assess the effects of extreme weather events (significant positive and negative anomalies in air temperature and precipitation) on the carbon dioxide (CO₂) fluxes in boreal and temperate forest ecosystems in the Northern Hemisphere. 26 greenhouse gas (GHG) flux monitoring stations of the global FLUXNET network with the most continuous observations were selected for the analysis of CO₂ fluxes. The stations are located in forest ecosystems of different biome types according to the IGBP classification. Meteorological conditions were analyzed using observations from meteorological stations and ERA5 reanalysis data. The results showed that the response of CO₂ fluxes to temperature and precipitation anomalies varies depending mainly on the type of forest ecosystem, its geographical location and regional climatic conditions. Extremely high air temperature in any season leads to increased CO₂ emissions to the atmosphere in all forest types studied, with the most pronounced response in coniferous forests. Negative air temperature anomalies in the warm season could have the opposite effect, either increasing or decreasing the CO₂ uptake by forest ecosystems, depending on the forest ecosystem type. No significant response of CO₂ fluxes to extremely low temperatures in the cold season was found. During periods of heavy precipitation, the emission of CO₂ to the atmosphere dominated in all forest ecosystems under study. At the same time, after a large amount of precipitation during the warm season, a cumulative effect of available soil moisture in the plant root zone on CO₂ fluxes was revealed. As a result the CO₂ uptake by vegetation increases due to the growing rate of plant photosynthesis under sufficient soil moisture conditions.

Keywords: forest ecosystems, reanalysis, eddy covariance measurements, FLUXNET

Acknowledgments. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 22-17-00073).

REFERENCES

- Anjileli H., Huning L., Moftakhari H. et al. Extreme heat events heighten soil respiration, *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, no. 1, p. 6632, DOI: 10.1038/s41598-021-85764-8.
- Belward A.S., Estes J., Kline K. et al. The IGBP-DIS global 1 km land-cover data set DISCover: A project overview. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1999, vol. 65, no. 9, p. 1013–1020.
- Birch H.F. Mineralisation of plant nitrogen following alternate wet and dry conditions, *Plant and Soil*, 1964, p. 43–49.
- Charrier G., Martin-StPaul N., Damesin C. et al. Interaction of drought and frost in tree ecophysiology: rethinking the timing of risks, *Annals of Forest Science*, 2021, vol. 78, no. 2, p. 1–15, DOI: 10.1007/s13595-021-01052-5.
- Ciais P., Reichstein M., Viovy N. et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *Nature*, 2005, vol. 437, no. 7058, p. 529–533, DOI: 10.1038/nature03972.
- Dinsmore K.J., Billett M.F., Dyson K.E. Temperature and precipitation drive temporal variability in aquatic carbon and GHG concentrations and fluxes in a peatland catchment, *Global change biology*, 2013, vol. 19, no. 7, p. 2133–2148, DOI: 10.1111/gcb.12209.
- FAO. *Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report*, FAO, Rome, Italy, 2020, p. 11–23, DOI: 10.4060/ca9825en.
- Flannigan M.D., Stocks B.J., Wotton B.M. Climate change and forest fires, *Science of the total environment*, 2000, vol. 262, no. 3, p. 221–229, DOI: 10.1016/S0048-9697(00)00524-6.

- Flower C.E., Gonzalez-Meler M.A. Responses of temperate forest productivity to insect and pathogen disturbances, *Annual review of plant biology*, 2015, vol. 66, p. 547–569, DOI: 10.1146/annurev-arplant-043014-115540.
- Forzieri G., Dakos V., McDowell N. et al. Emerging signals of declining forest resilience under climate change, *Nature*, 2022, vol. 608, no. 7923, p. 534–539, DOI: 10.1038/s41586-022-04959-9.
- Frank D., Reichstein V., Bach M. et al. Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: concepts, processes and potential future impacts, *Global change biology*, 2015, vol. 21, no. 8, p. 2861–2880, DOI: 10.1111/gcb.12916.
- Gazol A., Camarero J., Vicente-Serrano S. et al. Forest resilience to drought varies across biomes, *Global change biology*, 2018, vol. 24, no. 5, p. 2143–2158, DOI: 10.1111/gcb.14082.
- Gushchina D., Tarasova M., Satosina E. et al. The Response of Daily Carbon Dioxide and Water Vapor Fluxes to Temperature and Precipitation Extremes in Temperate and Boreal Forests, *Climate*, 2023, vol. 11, no. 10, p. 206, DOI: 10.3390/cli11100206.
- Hoover D.L., Knapp A.K., Smith M.D. The immediate and prolonged effects of climate extremes on soil respiration in a mesic grassland, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, vol. 121, no. 4, p. 1034–1044, DOI: 10.1002/2015JG003256.
- Kramer K., Vreugdenhil S.J., Van Der Werf D.C. Effects of flooding on the recruitment, damage and mortality of riparian tree species: A field and simulation study on the Rhine floodplain, *Forest Ecology and Management*, 2008, vol. 255, no. 11, p. 3893–3903, DOI: 10.1016/j.foreco.2008.03.044.
- Kramer R.D., Ishii H.R., Carter K. et al. Predicting effects of climate change on productivity and persistence of forest trees, *Ecological Research*, 2020, vol. 35, no. 4, p. 562–574, DOI: 10.1111/1440-1703.12127.
- Li X., Wei Y., Li F. Optimality of antecedent precipitation index and its application, *Journal of Hydrology*, 2021, vol. 595, p. 126027, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126027.
- Manzoni S., Chakrawal A., Fischer T. et al. Rainfall intensification increases the contribution of rewetting pulses to soil heterotrophic respiration, *Biogeosciences*, 2020, vol. 17, no. 15, p. 4007–4023, DOI: 10.5194/bg-17-4007-2020.
- Ritter F., Berkelhammer M., Garcia C. Distinct response of gross primary productivity in five terrestrial biomes to precipitation variability, *Communications Earth & Environment*, 2020, vol. 1, no. 1, p. 34, DOI: 10.1038/s43247-020-00034-1.
- Smith M.D. An ecological perspective on extreme climatic events: a synthetic definition and framework to guide future research, *Journal of Ecology*, 2011, vol. 99, no. 3, p. 656–663, DOI: 10.1111/j.1365-2745.2011.01798x.
- Ummenhofer C.C., Meehl G.A. Extreme weather and climate events with ecological relevance: a review, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2017, vol. 372, no. 1723, p. 20160135, DOI: 10.1098/rstb.2016.0135.
- Wutzler T., Lucas-Moffan A., Migliavacca M. et al. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc, *Biogeosciences*, 2018, vol. 15, no. 16, p. 5015–5030, DOI: 10.5194/bg-15-5015-2018.
- Xu B., Arain M., Black T. et al. Seasonal variability of forest sensitivity to heat and drought stresses: a synthesis based on carbon fluxes from North American forest ecosystems, *Global change biology*, 2020, vol. 26, no. 2, p. 901–918, DOI: 10.1111/gcb.14843.
- Zhang Z., Weimin Ju., Yanlian Z. et al. Revisiting the cumulative effects of drought on global gross primary productivity based on new long-term series data (1982–2018), *Global Change Biology*, 2022, vol. 28, no. 11, p. 3620–3635, DOI: 10.1111/gcb.16178.
- Zheleznova I.V., Gushchina D.Y. Variability of Extreme Air Temperatures and Precipitation in Different Natural Zones in the Late 20th and Early 21st Centuries According to ERA5 Reanalysis Data, *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2023, vol. 59, no. 5, p. 549–559, DOI: 10.31857/S0002351523050139.
- Web-source*
The Data Portal Serving the FLUXNET Community, URL: <https://fluxnet.org/data/> (access date 25.03.2023).

Received 23.09.2023

Revised 15.10.2023

Accepted 04.12.2023

ИЗМЕНЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРАН – ЭКОНОМИЧЕСКИХ ГИГАНТОВ АЗИИ В КОНТЕКСТЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА

Н.Н. Алексеева¹, Д.Л. Лопатников², А.И. Банчева³

^{1,3} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра физической географии мира и геоэкологии*

² *Институт географии РАН, лаборатория географии мирового развития*

¹ *И.о. зав. кафедрой, доц., канд. геогр. наук; e-mail: nalex01@mail.ru*

² *Ст. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: imartos@mail.ru*

³ *Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ban-sai@mail.ru*

С конца прошлого столетия эпицентр экологического неблагополучия и генерации глобальных экологических угроз переместился в Азию. Главную роль в этом сыграли три экономических гиганта: сначала Япония, затем – Китай и Индия. В последние десятилетия в этих азиатских странах, находящихся на разных стадиях социально-экономического развития, происходят все более сложные и разнонаправленные экологически значимые процессы. Цель исследования состояла в выявлении основных тенденций базовых экологических характеристик Японии, Китая и Индии и динамики их положения в контексте геоэкологического перехода. Работа базировалась на концепциях экологической кривой С. Кузнецца (ЭКК) и геоэкологического перехода Д.Л. Лопатникова. Сопоставление эколого-экономических параметров проводилось на основе статистических данных Всемирного банка, ОЭСР и национальных баз данных. Анализировались временные ряды по эмиссии диоксида серы, оксидов азота, твердых частиц, углекислого газа преимущественно за период с 1990 по 2020 г. Динамика положения стран на кривой за 30-летний период позволяет выявить траектории их экологического развития, а также определить перспективы на ближайшее время. По динамике ключевых индикаторов за исследуемый период Япония устойчиво находится на нисходящем отрезке, а Китай и Индия – по некоторым показателям на нисходящем, пройдя в исследуемый период точку перегиба, по другим – на восходящем отрезке. В процессе интерпретации динамики показателей по окружающей среде выявлены основные факторы (экономические, институциональные, технологические и др.), обусловившие прогресс их экологического развития. При этом замедление экономики в периоды мирового экономического кризиса 2008–2009 гг. и пандемии COVID-19 по-разному отразилось на ключевых показателях трех стран. Место стран в международных экологических рейтингах коррелирует с уровнем социально-экономического развития, что укладывается в логику ЭКК. Если в Китае уже видны первые признаки разворота в сторону экологизации хозяйства, то об Индии этого пока сказать нельзя. Выявленные экологически позитивные тренды у экономических гигантов Азии, за исключением Японии, пока нельзя считать долгосрочной тенденцией ввиду относительно короткого ряда данных и сохранения поливариантности их экологических перспектив.

Ключевые слова: геоэкологический переход, экологическая кривая С. Кузнецца, декарбонизация, Индия, Китай, Япония, экологические рейтинги, углекислый газ, загрязнение

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.3

ВВЕДЕНИЕ

За первые два десятилетия XXI в. в мировом геоэкологическом пространстве произошли, без преувеличения, тектонические сдвиги. Один из них – смещение эпицентра экологического неблагополучия по базовым экологическим параметрам в Азию. Большую часть прошлого века главным очагом генерации глобальных экологических проблем были страны Запада, прежде всего США и зарубежная Европа. Первой страной зарубежной Азии, столкнувшейся с острым экологическим кризисом, стала Япония в период «экономического чуда».

Сегодня картина иная. Наиболее проблемными странами по базовым экологическим параметрам стали Китай и Индия. Смещение главного очага экологического неблагополучия в эти страны – следствие глобального сдвига промышленности в Восточную и Юго-Восточную Азию в процессе их догоняющего развития. В определенной степени государства Востока повторяют путь Запада с временным лагом запаздывания в 70–100 лет. Это стало результатом второй волны индустриализации, которая по своим масштабам была еще более грандиозной, что повлекло за собой экологические последствия, соразмерные масштабу происходящего [Лопатников, 2020].

Тридцать лет назад в пятерку мировых экономических лидеров по ВВП из азиатских стран входила только Япония (5,5 трлн долл. в 1995 г., 17,5% мирового ВВП) [Mapped: The World's Largest..., 2020]. Сегодня «большая азиатская тройка» входит в пятерку мировых лидеров по ВВП, причем как по номиналу, так и по паритету покупательной способности (ППС) [Рейтинг стран..., 2022]. Согласно данным мониторинга ВШЭ, ключевыми драйверами мирового роста в ближайшие годы и, возможно, десятилетия будет азиатский регион во главе с КНР и Индией, Ближний Восток и Африка [GlobVago..., 2023].

Опыт высокоразвитых стран Запада и Японии показывает, что по мере экономического роста возрастают технические и финансовые возможности не только для купирования наиболее острых из его экологических издержек, но и появляются предпосылки для смены тренда трансформации общей экологической обстановки на позитивный (декаплинг). Немалую роль в этом играет рост запроса населения на экологическую санацию среды обитания по мере роста его благосостояния: в последние десятилетия в Китае и Индии, например, существенно выросла доля среднего класса, для которого качество окружающей среды становится важным потребительским благом.

С ростом благосостояния общества (ВВП или ВРП на человека) до определенного уровня объем загрязнений на душу населения и других видов антропогенного воздействия сначала растет, а затем снижается. Данную гипотезу выдвинули Дж. Гроссман и А. Крюгер на основе интерпретации кривой Нобелевского лауреата по экономике Саймона Кузнецца. Кривая, получившая в научной литературе название «экологическая кривая Кузнецца» (ЭКК), представляет собой перевернутую U-образную зависимость, описывающую взаимосвязи между экономическим ростом и экологическими издержками (уровнем загрязнения окружающей среды, производством отходов и проч.) [Grossman, Krueger, 1995]. После достижения определенного порогового уровня ВВП на душу населения уровень загрязнения и деградации окружающей среды начинает уменьшаться. В отличие от ряда других моделей (например, «нулевого роста» и «органического роста») экологическая кривая Кузнецца объясняет возможность совмещения экономического роста и снижения антропогенного воздействия за счет ряда факторов – эффективной экологической политики, в том числе инвестиций в охрану окружающей среды, изменение модели потребления, технологического развития, структурных сдвигов в экономике [Дружинин, Шкиперова, 2014]. Последнее, например, характерно для России, для которой на примере нескольких этапов экономического развития с

1990-х гг. доказана высокая степень взаимообусловленности экономических и экологических процессов с разнонаправленной динамикой загрязнения окружающей среды [Битюкова, Попов, 2015].

С середины 1990-х гг. проведено множество исследований, в которых использовались разные переменные, методы и вариации концепции ЭКК [Environmental Kuznets..., 2019; Naveed et al., 2022]. Экономисты в основном используют эконометрические методы и экономико-математическое моделирование. Преимущественно анализируются взаимосвязи между ростом экономики и загрязнением окружающей среды, а также экономическим ростом и потреблением энергии. Большинство эмпирических исследований по экономике окружающей среды сосредоточено на проверке гипотезы ЭКК для разных стран и регионов, однако их выводы не единодушны [Le, Ozturk, 2020].

Очевидно, что в странах-экономических гигантах Азии, находящихся на разных стадиях социально-экономического развития, последние десятилетия происходят все более сложные и разнонаправленные экологически значимые процессы. Гипотеза исследования состоит в том, что в Китае и Индии, вслед за Японией, начали проявляться экологически позитивные процессы, что свидетельствует о возможном начале геоэкологического перехода. Под ним понимается сдвиг от превалирования экологически негативных антропогенных процессов в мировом хозяйстве через стадию их разнонаправленности к изменению в будущем баланса экологически негативных и позитивных процессов в пользу последних [Лопатников, 2013; 2020]. Это можно установить на основе продолжительного положения стран на нисходящих отрезках ЭКК.

Цель исследования – выявить основные тенденции базовых экологических характеристик трех государств – экономических гигантов Азии (Китай, Индии и Японии) и дать оценку динамики их геоэкологического положения с опорой на экологическую кривую Кузнецца. Задачи исследования включали определение пороговых значений ВВП по ППС, при котором отмечается перелом кривой по ключевым параметрам (загрязнителям и углекислому газу) для каждой из трех стран, выявление внутренних факторов и внешних воздействий (мировые экономические кризисы, пандемия COVID-19 и др.), определяющих изменение их положения на кривой. В задачи работы также входило подтверждение гипотезы на основе анализа положения стран в международных экологических рейтингах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализировались временные ряды данных по эмиссии диоксида серы, оксидов азота, твердых

частиц, углекислого газа, в качестве критерия экономического роста в соответствии с принятой методикой построения кривой Кузнеця использовался показатель удельных доходов – ВВП по ППС на душу населения (в долл. США, в ценах 2017 г.). Применялись ряды панельных данных за период с 1990 по 2020 гг., по твердым частицам непрерывные ряды наблюдений имеются за более короткий период (с 2010 г.). Сопоставление эколого-экономических параметров Японии, КНР и Индии проводилось на основе статистических данных Всемирного банка [World Development..., 2023], ОЭСР [OECD environmental..., 2023], национальных баз данных [Portal Site..., 2023]. Предпочтение отдавалось сопоставимым данным международных организаций, так как базы статистических данных стран основаны на разных методиках и единицах оценки выбросов и концентраций загрязняющих веществ (расхождения могут достигать 50–60% [Ding et al., 2022]).

Для сравнительной оценки экологической обстановки использовались данные мировых рейтингов, составленных на основе индексов экологической эффективности, загрязнения, «зеленой» экономики, инновационных экологически чистых технологий. Каждый из них в отдельности не дает целостную экологическую характеристику, но при корректной интерпретации они позволяют с различных сторон оценить проблемы и противоречия экологического развития рассматриваемых стран.

Исследование основано на подходах на стыке геоэкологии и социально-экономической географии, методах ретроспективного анализа, визуализации статистических данных, а также на сравнительно-географическом методе. На основе построенных графиков экологической кривой Кузнеця интерпретировались показатели по состоянию окружающей среды и основные факторы (экономические, институциональные, технологические), их обусловившие.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Положение экономических гигантов Азии на кривой С. Кузнеця. Рассмотрим, как отличаются экономические гиганты Азии по положению на экологической кривой Кузнеця (рис. 1) и как можно объяснить их место на основе динамики эколого-экономических показателей. Для этого нами проанализирована зависимость от роста доходов объемов выбросов от стационарных источников в атмосферу диоксида серы, оксидов азота и углекислого газа за 1990–2020 гг., твердых частиц – за 2010–2020 гг. для Японии и за 2010–2019 гг. для Китая и Индии.

Если оценки ВВП на душу населения в положении максимума (точка перегиба кривой) колеблются в мире в широких пределах – от 3 до 100 тыс. долл.

[Дружинин, Шкиперова, 2014], то в исследуемых странах Азии они в целом ниже. По разным экологическим показателям точки перегиба кривой приходятся на разные диапазоны подушевого дохода (максимальные в Японии, минимальные в Индии). Выявление точек перегиба и динамика положения стран за 30-летний период на понижательных и/или повышательных отрезках ЭКК позволяют охарактеризовать специфику экологического развития стран, их перспективы на ближайшее время, а также выявить некоторые факторы этих изменений. Если в высокоразвитых странах выраженные экологически позитивные тренды стали наблюдаться примерно в 1980–1990 гг. и ранее (Япония) и продолжают поныне, то в Индии и Китае ситуация более разнонаправленная и менее определенная.

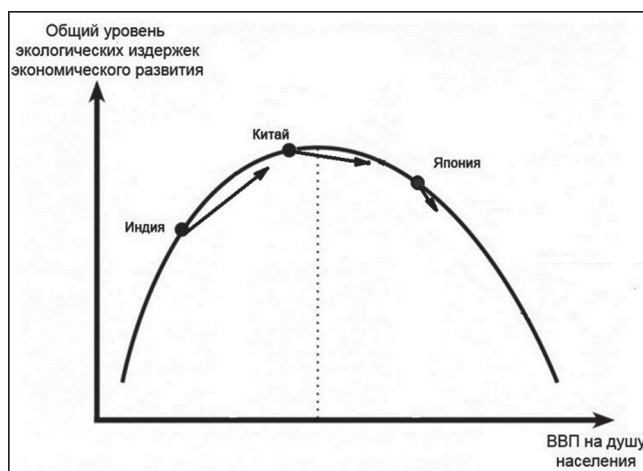


Рис. 1. Экономические гиганты Азии на экологической кривой Кузнеця и возможные траектории изменения их положения

Fig. 1. The position of Asian economic giants on the environmental Kuznets Curve and possible trajectories of their change

Диоксид серы (SO_2). Япония – первая из стран-гигантов, которой удалось снизить загрязнение диоксидом серы в воздухе еще в конце 1960-х гг. (среднесуточное содержание уменьшилось до ПДК (0,04 ppm, что равно 0,1076 мг/м³), а к 1980 г. – до концентрации 0,0296 мг/м³) [Банчева, 2018]. Это было достигнуто за счет ряда последовательных мер – принятия закона об охране атмосферного воздуха (1968), установления ПДК содержания загрязняющих веществ в воздухе для диоксида серы и оксидов азота (1973), а также внедрению технологической инновации на нефтеперерабатывающих заводах – прямого обессеривания нефти (с 1967 г.). ВВП на душу населения в тот период составлял порядка 5–7 тыс. долл. США (1970–1975 гг., в ценах 1990 г.). В настоящее время Япония на ЭКК по загрязнению диоксидом серы

находится на устойчивой понижающей траектории, кривая определяется по большей части колебаниями ВВП на душу населения, что отчетливо видно по 2009 и 2020 гг., когда произошло замедление экономики в периоды мирового экономического кризиса 2008–2009 гг. и пандемии COVID-19 [Демина, 2021] (рис. 2А).

В Китае точка перегиба ЭКК по загрязнению диоксидом серы наступила в 2006 г. при ВВП по ППС 6 тыс. долл. США/чел. [Лукьянов, 2018; Lu et al., 2010]. Несмотря на то что использование угля в топливно-энергетическом комплексе увеличилось примерно на 50%, эта в целом позитивная ситуация

была обусловлена технологической модернизацией, которая имела место в период 11-й пятилетки. На теплоэлектростанциях тогда внедрялись системы десульфуризации дымовых газов (к 2010 г. около 85% ТЭС были оборудованы этими системами). С начала 2000-х гг. действуют жесткие меры контроля в сфере энергетики и промышленности – штрафы для загрязнителей, цели по сокращению выбросов и снижению лимитов на выбросы диоксида серы. Кроме того, возросло производство электроэнергии на возобновляемых источниках. В итоге выбросы диоксида серы в 2007–2016 гг. сократились на 75% [Sulfur..., 2023].

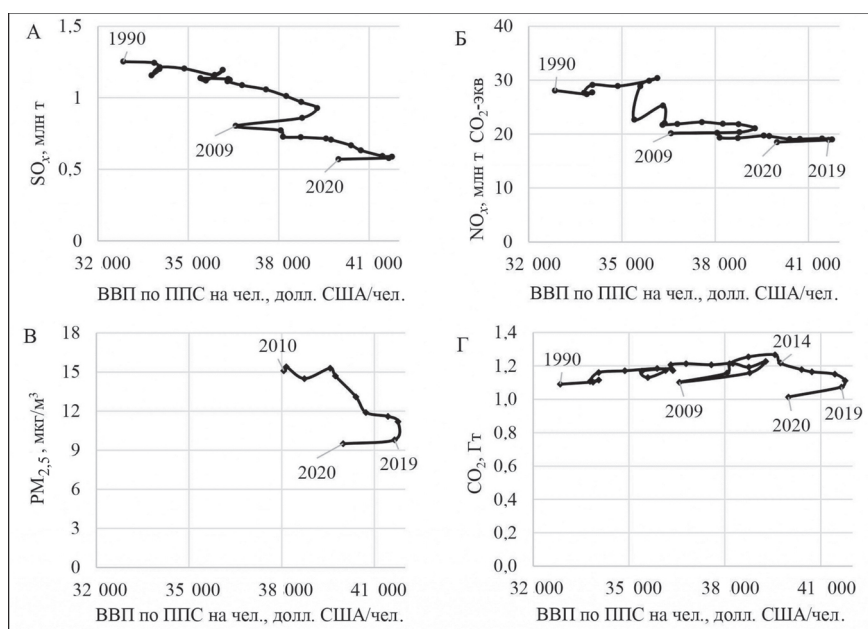


Рис. 2. Экологические кривые Японии по выбросам в атмосферу диоксида серы (А), оксидов азота (Б), концентрации твердых частиц ($PM_{2.5}$) в атмосфере (В) и эмиссиям углекислого газа (Г) в Японии в зависимости от ВВП по ППС на человека (в ценах 2017 г.) за период 1990–2020 гг. (2010–2020 гг. для $PM_{2.5}$) (составлено по данным [World Development..., 2023; OECD Environmental..., 2023])

Fig. 2. Environmental curves for Japan based on the emissions of sulfur dioxide (А), nitrogen oxides (Б), concentration of particulate matter ($PM_{2.5}$) in the atmosphere (В), and carbon dioxide emissions (Г) for 1990–2020 ($PM_{2.5}$ for 2010–2020); GDP at PPP (in 2017 prices) per capita, US dollars (compiled according to [World Development..., 2023; OECD Environmental..., 2023])

В Индии выбросы в атмосферу этого загрязнителя существенно прирастали в 1980–2010 гг. из-за интенсивного сжигания угля и отсутствия новых технологий для их контроля. Однако за 2010–2020 гг. выбросы SO_2 постепенно начали снижаться, и в большинстве индийских городов зафиксировано снижение их концентрации с 2013 г. при ВВП 4,8 тыс. долл. США/чел. Так же как в Китае, здесь началось внедрение технологий экологического контроля на ТЭС и промышленных предприятиях (скрубберов, десульфуризации дымовых газов). Последние установлены на 440 ТЭС общей мощностью 166,5 ГВт [India Power Plant..., 2020].

С 2015 г. также значительно увеличилось производство энергии на ВИЭ, что способствовало снижению загрязнения. Тем не менее Индия остается крупнейшим в мире источником выбросов SO_x , на ее долю в 2020 г. приходилось 15% глобальных выбросов из антропогенных источников [Dahiya et al., 2019].

Оксиды азота (NO_x). В Японии снижение концентраций оксидов азота в воздухе, как и диоксида серы, началось с 1970-х гг., чему способствовало внедрение технологий дожигания первичных продуктов сгорания, денитрификации отходящих газов при производстве стали (например, компанией Kawasaki

Steel в префектуре Тиба), оборудования по очистке выбросов от оксидов азота (системой избирательной каталитической нейтрализации и электронно-лучевым методом). Для исследуемого периода для NO_x характерны те же колебания, что и по диоксиду серы (2009, 2020), и более пологая, но отчетливая понижающаяся траектория (см. рис. 2Б). Объемы выбросов в Японии в настоящее время в 30 раз меньше, чем в Китае, и в 18 раз меньше, чем в Индии.

В КНР по подсчетам [Itahashi et al., 2019] объемы выбросов оксидов азота увеличивались вплоть

до 2011 г., по данным Всемирного банка – до 2016 г. Точка перегиба на ЭКК, датируемая 2016–2017 гг., соответствует среднему доходу 14,2 тыс. долл. США (рис. 3А). К этому периоду на электростанциях Китая была внедрена технология денитрификации дымовых газов, установлены нормы выбросов для новых транспортных средств по европейским стандартам и др. Несмотря на понижающийся тренд по выбросам оксидов азота, Китай пока занимает 1-е место в мире по их общим объемам, опережая США и Индию.

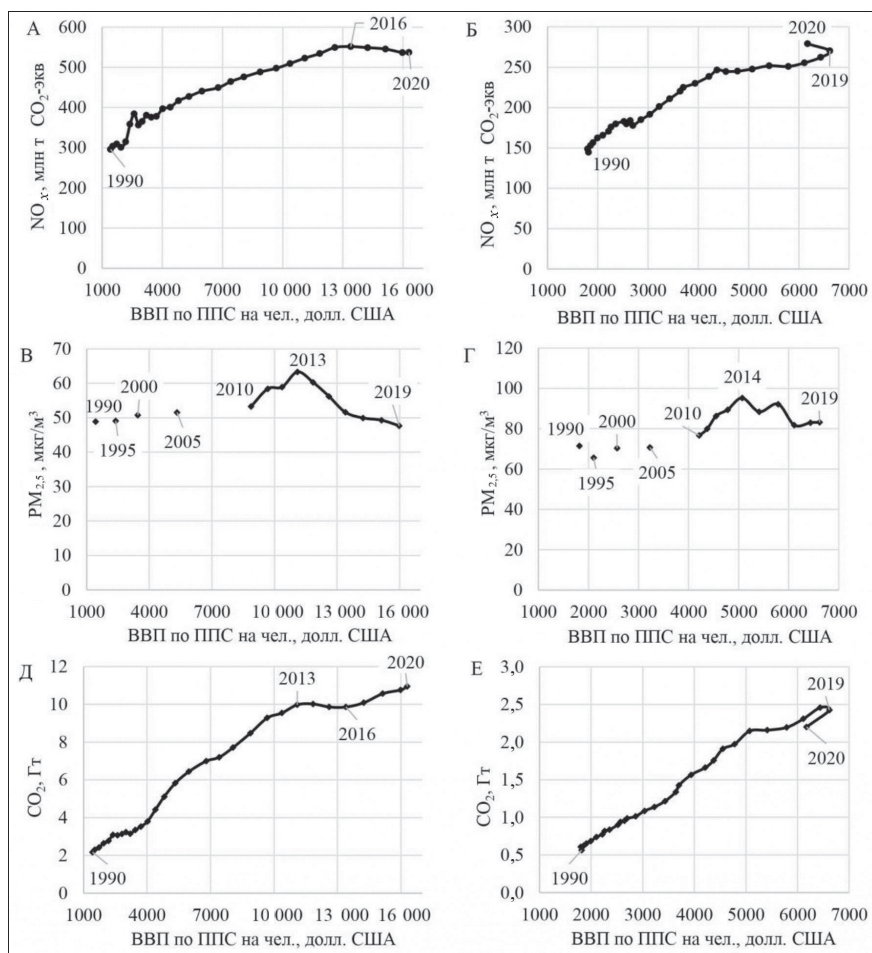


Рис. 3. Экологические кривые Китая (А, В, Д) и Индии (Б, Г, Е) по выбросам оксидов азота, концентрации твердых частиц ($\text{PM}_{2,5}$) в атмосфере и выбросам углекислого газа за период 1990–2020 гг. (1990–2019 гг. для $\text{PM}_{2,5}$) (составлено по данным [World Development..., 2023])

Fig. 3. Environmental curves for China (A, B, D) and India (B, G, E) based on the emissions of nitrogen oxides into the atmosphere, concentration of particulate matter ($\text{PM}_{2,5}$) in the atmosphere, and carbon dioxide emissions for 1990–2020 ($\text{PM}_{2,5}$ – for 1990–2019); GDP at PPP (in 2017 prices) per capita, US dollars (compiled according to [World Development..., 2023])

В Индии в настоящее время продолжается увеличение выбросов оксидов азота, несмотря на усилия, предпринимаемые в энергетическом секторе. Выбросы увеличились более чем на 50% за 2007–2016 гг., а начиная с 2017 г., темпы роста объемов выбросов NO_x затормозились, что связано

с вступлением в действие более жестких нормативов качества воздуха (рис. 3Б). Тем не менее даже экономический спад в период пандемии в 2020 г. не привел к существенному снижению эмиссий оксидов азота. Например, в районе Дели фиксировалось аномальное сокращение выбросов (на 60%) во вре-

мая первой фазы карантина (весна 2020 г.) до малых величин сразу после него. В то же время в сельских районах Северной Индии наблюдалось гораздо меньшее снижение концентраций NO_x , что связано с незначительным воздействием мер по ограничению транспорта [Misra et al., 2022]. Кроме того, одним из основных источников оксида азота в Индии, помимо теплоэнергетики и автотранспорта, являются биогенные/почвенные эмиссии с сезонным циклом выбросов с пиком летом [Ding et al., 2022].

При одинаковых значениях ВВП объем выбросов в Индии примерно в 2 раза меньше, чем в Китае (см. рис. 3А, Б). Для КНР и Индии сейчас характерны противоположные тенденции по выбросам оксида азота в атмосферу, соответственно небольшое сокращение и прирост.

Примечательно также, что экономика Китая оказалась менее чувствительной к экономическим кризисам 2008–2009 и 2020 гг., по сравнению с экономиками Японии и Индии, что и отражено на графиках ЭКК: по сравнению со столь выраженными японскими и индийскими «отскоками» экономика Китая впечатляет своей стабильностью, демонстрируя ровные восходящие значения ВВП по ППС и лишь небольшое замедление экономического роста в 2020 г., аналогичное 1990-м гг. При экономическом спаде Япония демонстрирует сокращение выбросов загрязняющих веществ, Индия же – увеличение (см. рис. 2Б и 3Б).

Твердые частицы. Мелкодисперсные твердые частицы являются одним из самых опасных загрязнителей для человека по данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ). В Японии в течение последних 30 лет наблюдается понижающаяся динамика их концентрации¹, что позволило достичь уровня содержания $\text{PM}_{2,5}$ ниже ПДК (15 мкг/м^3 , с 2009 г.). Этому способствовало совершенствование законодательной базы (мониторинг, ограничения выбросов сажи и пыли для некоторых стационарных источников и транспортных средств, использование инструмента оценки воздействия на окружающую среду, налоговые льготы на эко-автомобили, популяризация общественного транспорта) [Ministry..., 2023]. За 20 лет (2000–2022) выбросы сажи и пыли сократились с 60,7 тыс. т/год до 23,5 [Portal Site..., 2023]. Концентрации $\text{PM}_{2,5}$ в воздухе уменьшились с 30 мкг/м^3 (2001) до $9,5$ (2020) (рис. 2В).

В Китае и Индии точка перегиба по $\text{PM}_{2,5}$ приходится на 2013–2014 гг. при разных значениях подушевого ВВП по ППС (соответственно около 11 и 5 тыс. долл. США/чел.), хотя короткий ряд

данных не позволяет делать долгосрочных выводов. При этом Индия лидирует по концентрации твердых частиц в атмосфере: здесь максимальные концентрации достигали $95,3 \text{ мкг/м}^3$ в 2014 г., в Китае – $63,3 \text{ мкг/м}^3$ в 2013 г. (см. рис. 3В, Г). То есть формируется ситуация, обратная по сравнению с оксидами азота: здесь при одинаковых значениях ВВП по ППС (например, 5 тыс. долл. США/чел.) концентрации $\text{PM}_{2,5}$ в Индии почти в 2 раза выше. Кроме того, траектория кривой Индии носит ломаный характер, свидетельствующий о недостаточной эффективности предпринимаемых мер по снижению загрязнения твердыми частицами.

В последние годы в Китае внедряются технологии контроля состояния воздуха в городах. Так, борьба с загрязнением вошла в число «трех великих битв» Китая. План по борьбе за чистоту воздуха включает в себя ликвидацию устаревших производственных мощностей, контроль потребления угля и стимулирование использования железнодорожного транспорта для грузовых перевозок. Таким образом, государственное регулирование и технологическая модернизация становятся важнейшими факторами снижения выбросов и загрязнения воздуха.

Несмотря на принимаемые меры, уровень загрязнения воздуха мелкодисперсными частицами в Китае и Индии все еще очень высок. Если учитывать нормативы ВОЗ, то среднегодовой уровень $\text{PM}_{2,5}$ должен составлять не более 10 мкг/м^3 , среднесуточный – не более 25 мкг/м^3 . Понятно поэтому, что Индия и Китай – первые в мире по заболеваемости и смертности от загрязнения воздуха. Ежегодная смертность в Индии из-за загрязнения воздуха твердыми частицами оценивается в 1,6 млн чел. [Сдасюк, 2021]. Установлено, что в Китае за 2000–2016 гг. из-за воздействия $\text{PM}_{2,5}$ умерло около 31 млн чел., при этом за 2000–2013 гг. смертность от этого показателя выросла на 29%, а за 2013–2016 гг., следуя за снижением концентраций $\text{PM}_{2,5}$ в воздухе, уменьшилась практически до уровня 2000 г. [Liang et al., 2020].

Эмиссии углекислого газа. Большинство исследований, посвященных связи между экономическим ростом и загрязнением, рассматривают углекислый газ как важнейший индикатор деградации окружающей среды [Shahbaz, Sinha, 2019], хотя он не является загрязнителем воздуха. Потребление энергии и реальный доход являются основными факторами, определяющими выбросы парниковых газов, в особенности CO_2 .

Япония, которая начиная с 1990-х гг. проводит активную климатическую политику, поставила цель достичь углеродной нейтральности к 2050 г. В 2013 г. ей удалось пройти точку перегиба на кривой Кузнецова и в настоящее время сохранять слабый, но все же понижающийся тренд (см. рис. 2Г).

¹ Данные Всемирного банка расходятся с данными Статистического бюро Японии, однако в обоих источниках динамика понижающаяся. Для построения графика взяты национальные данные.

В Китае и Индии отмечается неуклонный рост кривой (см. рис. 3Д, Е). Рост экономики при увеличении численности населения и уровня потребления обуславливает существенное повышение объемов выбросов CO_2 этих стран в последние десятилетия, эти же факторы будут определять динамику выбросов в будущем [Григорьев и др., 2020]. Если в Китае в период пандемии 2020 г. темпы роста эмиссии углекислого газа лишь замедлились, то в Индии произошло их сокращение, которое, по предварительным данным, носило временный характер.

Китай провозгласил достижения углеродной нейтральности в 2060 г. [Climate Action..., 2023]. В 2013–2016 гг. впервые наметилась стабилизация эмиссий углекислого газа при росте подушевых доходов: быстрее стало расти производство электроэнергии, получаемой из ВИЭ, увеличилось потребление природного газа (см. рис. 3Д). Вслед за коротким снижением темпов добычи угля и снятием в 2018 г. запрета на ввод новых угольных электростанций, кривая вновь пошла вверх. Тем не менее, взяв на себя роль сверхдержавы в сфере глобального управления климатом и опираясь на масштабные инвестиции в ВИЭ и повышение энергоэффективности, КНР внедряет экологически чистые технологии и стремится к «зеленому» развитию внутри страны, хотя за пределами страны его действия не столь экологичны. Так, в рамках инициативы «Один пояс – один путь» в течение 2014–2019 гг. китайские банки инвестировали в развитие угольных мощностей стран-участниц в 5 раз больше, чем в солнечные и ветряные станции [Алексеева, Фортигина, 2022].

Помимо этого, для Китая, Индии и стран АСЕАН, согласно выводам [Zhang, 2021; Pal, Mitra, 2017; Duong et al., 2022], существует вероятность формирования в долгосрочной перспективе N-образной зависимости между ВВП на душу населения и выбросами CO_2 . N-образная гипотеза кривой С. Кузнецца включает третий этап, когда экологическая деградация усугубляется по мере продолжения роста доходов ввиду технологического устаревания производства и эффекта масштаба, и в итоге окружающая среда снова ухудшается с ростом доходов [Lorente, Alvarez-Herranz, 2016]. Таким образом, даже если Китай сможет достичь пика выбросов CO_2 к 2030 г., все еще сохраняется неопределенность, не возрастут ли в будущем выбросы вместе с национальным доходом. А чтобы избежать эффекта технологического устаревания, определяющего третий этап кривой, в ходе 14-го пятилетнего плана (2021–2025) требуется принятие прорывных политических решений и энергетических инноваций.

Индия наметила самый поздний срок перехода к углеродной нейтральности – 2070 г. Являясь бы-

строрастущей экономикой с крупными источниками выбросов, как ожидается, она еще долго будет обеспечивать рост эмиссий диоксида углерода и других парниковых газов, несмотря на внедрение ВИЭ, повышение энергоэффективности в разных секторах экономики, снижение доли угля в энергобалансе страны. В то же время Индии, как стране с самым большим населением в мире², приходится решать противоречивые задачи экономического развития и преодоления острейших социально-демографических проблем, с одной стороны, и снижения выбросов парниковых газов, ограничивающих это развитие, с другой.

Позиции в экологических рейтингах. Международные экологические рейтинги широко используются для оценки достижений стран в сфере сохранения благоприятной окружающей среды, устойчивого развития, движения в сторону «зеленой» экономики, прогресса климатической политики [Алексеева и др., 2018].

Один из наиболее авторитетных глобальных рейтингов составляется на основе индекса экологической эффективности (*Environmental Performance Index*), разработанного Йельским и Колумбийским университетами (США). Он измеряет достижения стран с точки зрения экологического состояния и управления природными ресурсами на основе 40 показателей в 11 категориях, которые отражают различные аспекты экологического состояния, от сохранения биологического разнообразия до государственной политики в области охраны окружающей среды. По индексу экологической эффективности в 2022 г. Япония занимала 25-е место, Китай – 160-е место, Индия – последнее 180-е место [Environmental Performance..., 2022]. Верхние позиции рейтинга экологической эффективности занимают страны Северной Европы и Великобритания с высоким душевым ВВП, что в целом подтверждает гипотезу ЭКК.

По индексу загрязнений (*Pollution Index*) в 2023 г. (из 111 стран) – Япония занимает 27-е место (39,0), Индия – 80-е (72,8), Китай – 99-е (78,8) [Pollution Index..., 2023].

Глобальный индекс «зеленой» экономики, рассчитываемый для 160 стран, измеряет на основе интегрального подхода национальные экологические показатели устойчивого развития. Для каждого из его 18 показателей рассматривается степень прогресса, достигнутого каждой из стран с 2005 по 2020 г., и ее удаленность от установленных ООН Целей устойчивого развития. Ни одна из крупных экономик не показывает хороших результатов по данному индексу: США занимает 38-е место; Япо-

² Индия превысила население Китая. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5939907> (дата обращения 15.06.2023).

ния – 47-е, Бразилия – 52-е, Китай – 58-е, Республика Корея – 59-е, Индия – 144-е место [Results..., 2023]. Тем не менее индекс четко показывает обратную корреляцию между уровнем развития страны и индексом «зеленой» экономики. Это иллюстрирует соответствующая последовательность трех крупнейших экономик Азии.

Глобальный индекс инновационных экологически чистых технологий (*Global Cleantech Innovation Index*) оценивает готовность стран к внедрению передовых экологических технологий. Он ранжирует 166 стран на основе пяти блоков: развертывание ИКТ, навыки, исследования и разработки (НИОКР), отраслевая деятельность и доступ к финансированию. По этому индексу впереди высокоразвитые страны со сложившимся постиндустриальным укладом и интеллектоемким хозяйством. Согласно индексу наиболее готовы к внедрению экологически чистых технологий малые постиндустриальные страны с высоким уровнем ВВП на душу населения (Швеция, Швейцария и Нидерланды), из стран Азии – Сингапур. Из крупных стран самый высокий показатель только у США (1-е место), у Японии 19-е место. Китай – наиболее подготовленная к экологическим инновациям развивающаяся страна, занял 35-е место, за ним следуют Бразилия (40-е), Индия (46-е) и Южная Африка (56-е) [Technology and Innovation..., 2023]. Таким образом, чем выше положение страны по данному рейтингу, тем дальше она от точки перегиба на понижательном отрезке экологической кривой Кузнецца.

В целом, рассмотренные индексы коррелируют с общим уровнем социально-экономического развития государств. Это наглядно проявляется по позициям, которые занимают в этих рейтингах Индия, Китай и Япония, что укладывается в логику эколого-экономической интерпретации экологической кривой Кузнецца. Об этом же свидетельствует доля расходов бюджета на охрану окружающей среды: в Японии она самая высокая из трех стран (1,3% ВВП); в Индии (0,017%) она в 3,6 раза меньше, чем в Китае (0,061%) [Сдасюк, 2021]. Если в Китае, более 10 лет назад провозгласившем цель создания «экологической цивилизации», видны признаки разворота в сторону экологизации хозяйства, то об Индии этого пока сказать нельзя. При более чем двукратной разнице доходов в 2022 г. (ВВП по ППС на душу населения у Китая – 18,2 тыс. долл. США/чел. в год, Индии – 7,1 тыс. долл.) [Business and economic..., 2023], активно развивающаяся Индия может достичь точки перегиба по ряду экологических показателей при более низких уровнях душевого дохода, тем более что валовые и удельные показатели выбросов основных загрязнителей (кроме твердых частиц) у нее в разы меньше, чем у КНР.

ВЫВОДЫ

Взаимосвязь экономического развития трех выбранных государств и экологических проблем нелинейна. Ключевые экологические индикаторы за исследуемый период имели траекторию, в той или иной степени близкую к классической экологической версии кривой С. Кузнецца.

В Японии, стране первой волны «экономических чудес» со сложившимся постиндустриальным укладом хозяйства, значительно раньше Китая и Индии наметился ряд выраженных экологически позитивных трендов, связанных с запросом на улучшение среды обитания жителей густонаселенной страны с относительно высоким уровнем доходов, а также благодаря институциональному развитию и технологическим возможностям. По показателям диоксида серы, оксидов азота и $PM_{2,5}$ в Японии в 1990–2020 гг. произошло снижение выбросов / концентраций веществ относительно ВВП. Находясь на нисходящей ветви кривой С. Кузнецца, по диоксиду углерода Япония прошла «точку перегиба» в 2013 г. при ВВП 40 тыс. долл. США/чел.

Вслед за Японией, по мере роста ВВП и благосостояния населения, развития экологической политики и формирования общественного запроса на более здоровую окружающую среду, на путь экологически направленной модернизации хозяйства вступили КНР и Индия. Китай прошел «точку перегиба» на кривой С. Кузнецца по таким показателям, как диоксид серы, диоксид азота и $PM_{2,5}$. Индия – вероятно, только по диоксиду серы и $PM_{2,5}$. Диапазон значений ВВП в «точке перегиба» составляет от 5 тыс. (Индия по $PM_{2,5}$) до 13 тыс. долл. США/чел. (Китай по NO_x).

Выявленные экологически позитивные процессы у экономических гигантов Азии пока нельзя считать долгосрочной тенденцией в соответствии с классической моделью кривой С. Кузнецца ввиду относительно короткого ряда данных и сохранения поливариантности экологических перспектив данных стран (за исключением Японии, хотя и здесь есть примеры негативных необратимых изменений окружающей среды). Необходимо эколого-географический мониторинг изменения базовых экологических показателей в Китае, Индии и Японии.

Если Китаю и Индии удастся по примеру Японии в ближайшие десятилетия добиться устойчивой смены трендов в экологических характеристиках на позитивные, это будет иметь общепланетарное значение и внесет решающий вклад в потенциально возможный глобальный геоэкологический переход.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0008 и темы государственного задания географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова № 121040100322-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеева Н.Н., Аршинова М.А., Банчева А.И. Положение России в международных экологических рейтингах // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26. № 1. С. 134–152. DOI: 10.22363/2313-2310-2018-26-1-134-152.
- Алексеева Н.Н., Фортыхина Е.А. Климатический вектор эколого-экономической модернизации Китая // Азия и Африка сегодня. 2022. № 9. С. 37–45. DOI: 10.31857/S032150750018521-5.
- Банчева А.И. Геоэкологическое состояние ландшафтов острова Хоккайдо (Япония): дис. ... канд. геогр. наук. М., 2018. 130 с.
- Битюкова В.Р., Попов А.А. Экологические последствия структурных сдвигов в промышленности России в 1990–2014 гг. // Экология и промышленность России. 2015. № 6. С. 4–10.
- Григорьев Л.М., Макарова И.А., Соколова А.К., Павлюшина В.А., Степанов И.А. Изменение климата и неравенство: потенциал для совместного решения проблем // Вестник международных организаций. 2020. Т. 15. № 1. С. 7–30.
- Демина Я.В., Мазитова М.Г. Пандемия COVID-19 и ее влияние на экономику Японии // Японские исследования. 2021. № 3. С. 57–75. DOI: 10.24412/2500-2872-2021-3-57-75.
- Дружинин П.В., Шкиперова Г.Т. Оценка взаимовлияния экономических и экологических процессов // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогнозы. 2014. Т. 32. № 2. С. 213–224.
- Дружинин П.В., Шкиперова Г.Т., Поташева О.В. Экологическая кривая Кузнецца: случай России и Финляндии // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2018. Т. 8. № 11А. С. 83–97.
- Лопатников Д.Л. Миграция мирового центра экологического неблагополучия и «геоэкологический переход» // Изв. РАН. Сер. Геогр. 2020. № 5. С. 728–736. DOI: 10.31857/S2587556620050106.
- Лопатников Д.Л. Экологический переход // Региональные исследования. 2013. Т. 41. № 3. С. 4–8.
- Лукиянов Л.Е. Инструменты анализа взаимосвязи экономического развития и экологической обстановки в Китае // Географическая среда и живые системы. 2020. № 4. С. 57–69. DOI: 10.18384/2712-7621-2020-4-57-69.
- Сдасюк Г.В. Новая Индия. География развития: достижения, проблемы, перспективы. М.: Канон+, 2021. 520 с.
- Dahiya S., Anhauser L., Farrow A. et al. Global SO₂ emission hotspot database. The world's worst sources of SO₂ pollution, 2019, *Greenpeace Environment Trust*, 2019, 39 p.
- Ding J., A van der R., Mijling B. et al. NO_x emissions in India derived from OMI satellite observations, *Atmospheric Environment: X*, 2022, vol. 14, 100174.
- Duong N.B., Mayers E.E., Nhan N.D. et al. Extended environmental Kuznets curve in Asia-Pacific countries: an empirical analysis, *J. of Int. Economics and Management*, 2022, vol. 22(3), p. 46–61.
- Environmental Kuznets Curve: A Manual*, B. Özcan, I. Öztürk (eds.), Academic Press, 2019, 162 p.
- Grossman G., Krueger A. Economic growth and the environment, *The Quarterly J. of Economics*, 1995, vol. 110, p. 353–377.
- Itahashi S., Yumimoto K., Kurokawa J. et al. Inverse estimation of NO_x emissions over China and India 2005–2016: contrasting recent trends and future perspectives, *Environ. Res. Lett.*, 2019, vol. 14, 124020.
- Le H.P., Ozturk I. The impacts of globalization, financial development, government expenditures, and institutional quality on CO₂ emissions in the presence of environmental Kuznets curve, *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, p. 2680–2269.
- Liang F., Xiao Q., Huang K. et al. The 17-y spatiotemporal trend of PM_{2.5} and its mortality burden in China, *Proc. of the Nat. Academy of Sciences*, 2020, vol. 117(41), p. 25601–25608, DOI: 10.1073/pnas.1919641117.
- Lorente D.B., Álvarez-Herranz A. Economic Growth and Energy Regulation in the environmental Kuznets Curve, *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 25, p. 16478–94.
- Misra P., Takigawa M., Khatrri P. et al. Nitrogen oxides concentration and emission change detection during COVID-19 restrictions in North India, *Sci Rep.*, 2021, vol. 11, 9800.
- Naveed A., Ahmad N., Zadeh Aghdam R.F., Menegaki A.N. What have we learned from environmental Kuznets Curve hypothesis? A citation-based systematic literature review and content analysis, *Energy Strategy Reviews*, 2022, vol. 44, 100946.
- Pal D., Mitra S.K. The environmental Kuznets curve for carbon dioxide in India and China: Growth and pollution at crossroad, *J. of Policy Modeling*, 2017, vol. 39(2), p. 371–385.
- Shahbaz M., Sinha A. Environmental Kuznets curve for CO₂ emissions: a literature survey, *J. Econ Stud.*, 2019, vol. 46, p. 106–168.
- Zhang J. Environmental Kuznets Curve Hypothesis on CO₂ Emissions: Evidence for China, *J. of Risk and Financial management*, 2021, vol. 14, 93.
- Электронные ресурсы**
- Рейтинг стран по ВВП в 2022 году. URL: <https://svspsb.net/danmark/vvp-stran.php> (дата обращения 15.08.2023).
- Business and economic data for 200 countries, URL: <https://www.theglobaleconomy.com/> (дата обращения 27.07.2023).
- Climate Action Tracker, URL: <https://climateactiontracker.org/countries/japan/net-zero-targets/> (дата обращения 20.08.2023).
- Environmental Performance Index Results. Yale Center for Environmental Law & Policy, 2022, URL: <https://epi.yale.edu/epi-results/2022/component/epi> (дата обращения 05.08.2023).
- GlobBaro HSE. Барометр мировой экономики. ВШЭ. 2023. № 14. URL: <https://wec.hse.ru/mirror/pubs/share/841484604.pdf> (дата обращения 27.07.2023).
- India Power Plant Emissions. Official Website of the International Trade Administration, 2020, URL: <https://www.>

- trade.gov/market-intelligence/india-power-plant-emissions (дата обращения 03.08.2023).
- Lu Z., Streets D.G., Zhang Q., Wang S. The Trend of Sulfur Dioxide Emissions in China after 2000. *Environmental Science*, 2010, URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Trend-of-Sulfur-Dioxide-Emissions-in-China-2000-Lu-Streets/f11c95f91a3c93672a339639d08e0b-797810db43> (дата обращения 30.06.2023).
- Mapped: The World's Largest Economies, Sized by GDP (1970–2020), Markets, 2022, URL: <https://www.visualcapitalist.com/cp/the-worlds-largest-economies-1970-2020/> (дата обращения 15.07.2023).
- Ministry of the Environment, Japan, URL: <https://www.env.go.jp/air/osen/pm/info.html> (дата обращения 07.08.2023).
- OECD environmental data and indicators. OECD. Environment, URL: <https://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/data-and-indicators.htm> (дата обращения 20.06.2023).
- Pollution Index by Country 2023 Mid-Year, *Numbeo*, URL: https://www.numbeo.com/pollution/rankings_by_country.jsp (дата обращения 21.08.2023).
- Portal Site of Official Statistics of Japan, URL: <https://www.e-stat.go.jp> (дата обращения 07.08.2023).
- Results from the 2022 Global Green Economy Index (GGEI), *Dual Citizen*, URL: <https://dualcitizeninc.com/results-from-the-2022-global-green-economy-index-ggei/> (дата обращения 25.07.2023).
- Sulfur Dioxide Emissions Fall in China, Rise in India, *NASA Earth Observatory*, URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/91270/sulfur-dioxide-emissions-fall-in-china-rise-in-india> (дата обращения 29.08.2023).
- Technology and Innovation Report 2023, UNCTAD, 2023, URL: <https://unctad.org/tir2023> (дата обращения 12.08.2023).
- World Development Indicators, *The World Bank, Data Bank*, URL: <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators> (дата обращения 15.06.2023).

Поступила в редакцию 26.09.2023

После доработки 16.11.2023

Принята к публикации 04.12.2023

CHANGES OF ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF THE ASIAN “ECONOMIC GIANTS” IN THE CONTEXT OF THE GEOECOLOGICAL TRANSITION

N.N. Alekseeva¹, D.L. Lopatnikov², A.I. Bancheva³

^{1,3} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of World Physical Geography and Geoecology*

² *Institute of Geography of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Geography of World Development*

¹ *Executive Head of the Department, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: nalex01@mail.ru*

² *Senior Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: imartos@mail.ru*

³ *Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ban-sai@mail.ru*

Since the end of the last century the epicenter of environmental problems and global environmental threats has moved to Asia. Three economic giants played the main role: at first Japan, then China and India. In recent decades increasingly complicated and multidirectional environmentally significant processes have taken place in these Asian countries, which are at different stages of socio-economic development. The purpose of the study was to identify the main trends in the basic environmental characteristics of Japan, China and India and study the dynamics of their position in the context of the geoecological transition. The work was based on the concepts of the environmental Kuznets curve (EKC) and the geoecological transition of D.L. Lopatnikov. Comparison of environmental and economic parameters was carried out on the basis of statistical data from the World Bank, OECD and national databases. Time series for sulfur dioxide, nitrogen oxides, particulate matter and carbon dioxide emissions were analyzed mainly for the period 1990–2020. The dynamics of the countries' position on the curve over a 30-year period makes it possible to identify the trajectories of their environmental development, as well as determine prospects for the short-term future. According to the dynamics of key indicators, Japan is steadily on a downward segment of the curve, while China and India are on a downward segment for some indicators, having passed an inflection point during the period under study, and on an upward segment for other ones. The interpretation of dynamics of the environmental indicators revealed the main factors (economic, institutional, technological, etc.) which lay behind their environmental advancement. At the same time, the economic slowdown during the 2008–2009 global economic crisis and the COVID-19 pandemic had a different impact on the key indicators of the three countries. The position of countries in the international environmental ratings correlates with the level of socio-economic development, which fits into the logic of the EKC. While the first signs of a turn towards the greener economy are already visible in China, the same is still not true for India. The environmentally positive trends which were identified for the economic giants of Asia, with the exception of Japan, cannot yet be considered a long-term trend due to the relatively short series of data and the continuing diversity of their environmental prospects.

Keywords: geoeological transition, environmental Kuznets curve, decoupling, India, China, Japan, environmental rankings, carbon dioxide, pollution

Acknowledgments. The study was carried out under the state task theme of the Institute of Geography, RAS (FMWS-2024-0008) and the state task theme of the MSU Faculty of Geography (121040100322-8).

REFERENCES

- Alekseeva N.N., Arshinova M.A., Bancheva A.I. Polozhenie Rossii v mezhdunarodnykh ekologicheskikh reitingakh [Position of Russia in International Environmental Ratings], *Vestnik RUDN, Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2018, vol. 26, no. 1, p. 134–152, DOI: 10.22363/2313-2310-2018-26-1-134-152. (In Russian)
- Alekseeva N.N., Fortygina E.A. Klimaticheskii vektor ekologo-ekonomicheskoi modernizatsii Kitaya [The Climatic Vector of Ecological and Economic Modernization of China], *Aziya i Afrika segodnya*, 2022, no. 9, p. 37–45, DOI: 10.31857/S032150750018521-5. (In Russian)
- Bancheva A.I. *Geoekologicheskoe sostoyanie landshaftov ostrova Hokkaido (Yaponiya)* [Geoeological Assessment of the Hokkaido Island landscapes (Japan)], PhD Thesis in Geography, Moscow, 2018, 130 p. (In Russian)
- Bityukova V.R., Popov A.A. Ekologicheskie posledstviya strukturnykh sdvigo v promyshlennosti Rossii v 1990–2014 gg. [Environmental consequences of structural changes in Russian industry in 1990–2014], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2015, no. 6, p. 4–10. (In Russian)
- Dahiya S., Anhauser L., Farrow A. et al. *Global SO₂ emission hotspot database. The world's worst sources of SO₂ pollution*, Greenpeace Environment Trust, 2019, 39 p.
- Demina Ya.V., Mazitova M.G. Pandemiya COVID-19 i ee vliyaniye na ekonomiku Yaponii [The COVID-19 pandemic and its impact on the Japanese economy], *Yaponskie issledovaniya*, 2021, 3, p. 57–75. (In Russian)
- Ding J., A van der R., Mijling B. et al. NO_x emissions in India derived from OMI satellite observations, *Atmospheric Environment: X*, 2022, vol. 14, 100174.
- Druzhinin P.V., Shkiperova G.T. Otsenka vzaimovliyaniya ekonomicheskikh i ekologicheskikh protsessov [Assessment of Mutual Influence of Economic and Ecological Processes], *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognozy*, 2014, vol. 32, no. 2, p. 213–224. (In Russian)
- Druzhinin P.V., Shkiperova G.T., Potasheva O.V. Ekologicheskaya krivaya Kuznetsa: sluchai Rossii i Finlyandii [Environmental Kuznets curve: the cases of Russia and Finland], *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra*, 2018, vol. 8, no. 11A, p. 83–97. (In Russian)
- Duong N.B., Mayers E.E., Nhan N.D. et al. Extended environmental Kuznets curve in Asia-Pacific countries: an empirical analysis, *J. of Int. Economics and Management*, 2022, vol. 22(3), p. 46–61.
- Environmental Kuznets Curve: A Manual*, B.Özcan, I. Öztürk (eds.), Academic Press, 2019, 162 p.
- Grigor'ev L.M., Makarova I.A., Sokolova A.K., Pavlyushina V.A., Stepanov I.A. Izmenenie klimata i neravenstvo: potentsial dlya sovmestnogo resheniya problem [Climate Change and Inequality: How to Solve These Problems Jointly?], *Vestnik mezhdunarodnykh organizatsii*, 2020, vol. 15, no. 1, p. 7–30, DOI: 10.17323/1996-7845-2020-01-01. (In Russian)
- Grossman G., Krueger A. Economic growth and the environment, *The Quarterly J. of Economics*, 1995, vol. 110, p. 353–377.
- Itahashi S., Yumimoto K., Kurokawa J. et al. Inverse estimation of NO_x emissions over China and India 2005–2016: contrasting recent trends and future perspectives, *Environ. Res. Lett.*, 2019, vol. 14, 124020.
- Le H.P., Ozturk I. The impacts of globalization, financial development, government expenditures, and institutional quality on CO₂ emissions in the presence of environmental Kuznets curve, *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, p. 2680–2269, DOI: 10.1007/s11356-020-08812-22020.
- Liang F., Xiao Q., Huang K. et al. The 17-y spatiotemporal trend of PM_{2.5} and its mortality burden in China, *Proc. of the National Academy of Sciences*, 2020, 117 (41), p. 25601–25608.
- Lopatnikov D.L. Ekologicheskii perekhod [Ecological Transition], *Regional'nye issledovaniya*, 2013, vol. 41, no. 3, p. 4–8. (In Russian)
- Lopatnikov D.L. Migratsiya mirovogo tsentra ekologicheskogo neblagopoluchiya i "geoekologicheskii perekhod" [Migration of the Center of the Ecological Trouble and Geo-Ecological Transition], *Izv. RAN, Seriya geogr.*, 2020, no. 5, p. 728–736, DOI: 10.31857/S2587556620050106. (In Russian)
- Lorente D.B., Álvarez-Herranz A. Economic Growth and Energy Regulation in the environmental Kuznets Curve, *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 25, p. 16478–94.
- Luk'yanov L.E. Instrumenty analiza vzaimosvyazi ekonomicheskogo razvitiya i ekologicheskoi obstanovki v Kitae [Analysis tools of the relationship between economic development and the environmental situation in China], *Geograficheskaya sreda i zhivye sistemy*, 2020, no. 4, p. 57–69, DOI: 10.18384/2712-7621-2020-4-57-69. (In Russian)
- Misra P., Takigawa M., Khatri P. et al. Nitrogen oxides concentration and emission change detection during COVID-19 restrictions in North India, *Sci Rep.*, 2021, 11, 9800, URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87673-2> (дата обращения 05.08.2023).
- Naveed A., Ahmad N., Zadeh Aghdam R.F., Menegaki A.N. What have we learned from environmental Kuznets Curve hypothesis? A citation-based systematic literature review and content analysis, *Energy Strategy Reviews*, 2022, vol. 44, 100946.
- Pal D., Mitra S.K. The environmental Kuznets curve for carbon dioxide in India and China: Growth and pollution at crossroad, *J. of Policy Modeling*, 2017, vol. 39(2), p. 371–385.
- Sdasyuk G.V. *Novaya Indiya. Geografiya razvitiya: dostizheniya, problemy, perspektivy* [New India. Development Geography. Achievements, Problems, Perspectives], Moscow, Kanon+ Publ., 2021, 520 p. (In Russian)
- Shahbaz M., Sinha A. Environmental Kuznets curve for CO₂ emissions: a literature survey, *J. Econ Stud.*, 2019, vol. 46, p. 106–168.

Zhang J. Environmental Kuznets Curve Hypothesis on CO₂ Emissions: Evidence for China, *J. of Risk and Financial management*, 2021, vol. 14, 93.

Web sources

Business and economic data for 200 countries, URL: <https://www.theglobaleconomy.com/> (access date 27.07.2023).

Climate Action Tracker, URL: <https://climateactiontracker.org/countries/japan/net-zero-targets/> (access date 20.08.2023).

Environmental Performance Index Results, Yale Center for Environmental Law & Policy, 2022, URL: <https://epi.yale.edu/epi-results/2022/component/epi> (access date 05.08.2023).

GlobBaro HSE. Barometer of the world economy, HSE, 2023, no. 14, URL: <https://wec.hse.ru/mirror/pubs/share/841484604.pdf> (access date 27.07.2023).

India Power Plant Emissions: Official Website of the International Trade Administration, 2020, URL: <https://www.trade.gov/market-intelligence/india-power-plant-emissions> (access date 03.08.2023).

Lu Z., Streets D.G., Zhang Q., Wang S. The Trend of Sulfur Dioxide Emissions in China after 2000, *Environmental Science*, 2010, URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Trend-of-Sulfur-Dioxide-Emissions-in-China-2000-Lu-Streets/f11c95f91a3c93672a339639d08e0b-797810db43> (access date 30.06.2023).

Mapped: The World's Largest Economies, Sized by GDP (1970–2020), Markets, 2022, URL: [https://www.](https://www.visualcapitalist.com/cp/the-worlds-largest-economies-1970-2020/)

[visualcapitalist.com/cp/the-worlds-largest-economies-1970-2020/](https://www.visualcapitalist.com/cp/the-worlds-largest-economies-1970-2020/) (access date 15.07.2023).

Ministry of the Environment, Japan, URL: <https://www.env.go.jp/air/osen/pm/info.html> (access date 07.08.2023).

OECD environmental data and indicators, OECD, Environment, URL: <https://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/data-and-indicators.htm> (access date 20.06.2023).

Pollution Index by Country 2023 Mid-Year, Numbeo, URL: https://www.numbeo.com/pollution/rankings_by_country.jsp (access date 21.08.2023).

Portal Site of Official Statistics of Japan, URL: <https://www.e-stat.go.jp> (access date 07.08.2023).

Reiting stran po VVP v 2022 godu [Countries rating by GDP in 2022], URL: <https://svspb.net/danmark/vvp-stran.php> (access date 15.08.2023).

Results from the 2022 Global Green Economy Index (GGEI), Dual Citizen, URL: <https://dualcitizeninc.com/results-from-the-2022-global-green-economy-index-ggei/> (access date 25.07.2023).

Sulfur Dioxide Emissions Fall in China, Rise in India, NASA Earth Observatory, URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/91270/sulfur-dioxide-emissions-fall-in-china-rise-in-india> (access date 29.08.2023).

Technology and Innovation Report 2023, UNCTAD, 2023, URL: <https://unctad.org/tir2023> (access date 12.08.2023).

World Development Indicators, The World Bank, Data Bank, URL: <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators> (access date 15.06.2023).

Received 26.09.2023

Revised 16.11.2023

Accepted 04.12.2023

АГРОЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ КОРМОВЫХ УГОДИЙ РЕГИОНОВ РОССИИ

И.А. Трофимов¹, Л.С. Трофимова², Е.П. Яковлева³, И.О. Алябина⁴,
И.С. Урусевская⁵, С.А. Шоба⁶

^{1–3} Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса,
лаборатория геоботаники и агроэкологии

^{4–6} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения,
кафедра географии почв

^{4,6} Евразийский центр по продовольственной безопасности, Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова

¹ Зав. лабораторией, вед. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: viktrofi@mail.ru

² Вед. науч. сотр., доцент, канд. с.-х. наук; e-mail: viktrofi@mail.ru

³ Ст. науч. сотр.; e-mail: viktrofi@mail.ru

⁴ Проф., доцент, вед. науч. сотр. центра, д-р биол. наук; e-mail: alio@yandex.ru

⁵ Вед. науч. сотр., проф., д-р биол. наук; e-mail: alio@yandex.ru

⁶ Зав. кафедрой, директор центра, проф., д-р биол. наук, чл.-корр. РАН; e-mail: alio@yandex.ru

С целью информационного обеспечения регионально-, ландшафтно- и экологически дифференцированного сельского хозяйства, рационального природопользования, сохранения плодородия почв, повышения продуктивности и устойчивости агроэкосистем и агроландшафтов в ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса» разработано агроландшафтно-экологическое районирование природных кормовых угодий (ПКУ) в границах 11 природно-экономических (экономических) районов страны – Северного, Северо-Западного, Волго-Вятского, Центрального, Центрально-Черноземного, Поволжского, Северо-Кавказского, Уральско-го, Западно-Сибирского, Восточно-Сибирского, Дальневосточного. Комплект документов агроландшафтно-экологического районирования ПКУ по каждому природно-экономическому району России включает следующие материалы: карта М 1:2 500 000, легенда, база данных по земельным угодьям, база данных по кормовым угодьям, база данных по негативным процессам, классификация кормовых угодий, классификация оленьих пастбищ, стратегия и перспективные пути рационального природопользования в сельском хозяйстве. Районирование ПКУ разработано на базе Карты почвенно-экологического районирования РФ М 1:2 500 000 факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, которая использована как контурная и информационная основа. Районирование выполнено также с использованием многочисленных картографических и статистических данных, а также доступных литературных и фондовых источников, сравнительно-географического и агроландшафтно-экологического методов. На основе агроландшафтно-экологического районирования ПКУ развитие сельского хозяйства обретает зональную, региональную, ландшафтную и экологическую адаптацию и специализацию, что позволяет с наибольшей эффективностью использовать местные природные ресурсы, свести к минимуму развитие негативных процессов. Базы данных карты почвенно-экологического районирования дополнены новой информацией и показателями, характеризующими состояние ландшафтов и их компонентов: климата, рельефа, гидрологического режима, почв, растительности, ПКУ, развития негативных процессов, экологического и хозяйственного состояния. Это является существенным вкладом в инвентаризацию земельных и кормовых угодий, рациональное природопользование и охрану агроэкосистем и агроландшафтов. В перспективе целесообразно объединение материалов и баз данных почвенно-экологического районирования РФ и агроландшафтно-экологического районирования ПКУ разных регионов Российской Федерации, созданных на единой основе, для оценки и мониторинга состояния агроландшафтов, почв, кормовых угодий и принятия управленческих решений по рациональному природопользованию в сельском хозяйстве.

Ключевые слова: агроэкосистемы, земельные угодья, базы данных

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.4

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальной научной и практической проблемой России являются региональная, ландшафтная и экологическая дифференциации ее природных, земельных и климатических ресурсов с целью создания высокопродуктивного, устойчивого

и экологически чистого сельского хозяйства, адаптированного к условиям каждой природной зоны, провинции и округа.

Почвенно-экологическое районирование России, разработанное на факультете почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, учитывающее не только

биоклиматическое (зональное), но и региональное разнообразие почвенного покрова, используется в качестве научной основы для разработки различных специальных видов районирования, в том числе и новой системы агроландшафтно-экологической дифференциации страны, направленной на рациональное использование и сохранение плодородия почв [Карта..., 1997; Карта..., 2013; Национальный атлас почв..., 2011].

Районирование является одним из основных конкретных путей биологизации и экологизации сельского хозяйства. Оно занимает центральное место в стратегии его адаптивной интенсификации [Жученко, 1994].

Первое районирование (инвентаризация) природных кормовых угодий (ПКУ) СССР было проведено в 1932–1935 гг. по заданию Наркомзема под руководством Л.Г. Раменского. Труды инвентаризации (14 томов) хранятся в фондах ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса».

В 1971–1980 гг. сотрудниками лаборатории геоботаники Всесоюзного НИИ кормов выполнено второе районирование ПКУ СССР, проведена огромная техническая работа по обобщению накопившихся к тому времени материалов обследования природных кормовых угодий Гипроземов, которые покрывали до 80% территории страны. В результате первого и второго районирований были созданы только обобщенные схемы районирования ПКУ.

В 2023 г. ФНЦ «ВИК имени В.Р. Вильямса» разработал Агроландшафтно-экологическое районирование ПКУ России на базе Почвенно-экологического районирования России, выполненного на факультете почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, с целью информационного обеспечения регионально-, ландшафтно- и экологически дифференцированного сельского хозяйства, рационального природопользования, сохранения плодородия почв, повышения продуктивности и устойчивости агроэкосистем и агроландшафтов. Основные его особенности заключаются в том, что оно осуществляется на новом современном уровне научных знаний, более высоком уровне междисциплинарности и системности.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследований – агроландшафты и агроэкосистемы (природно-сельскохозяйственные экосистемы), в которых наибольшее внимание уделено роли кормовых экосистем – ПКУ, которые используются или потенциально пригодны для выпаса животных или скашивания на корм.

Методологические основы агроландшафтно-экологического районирования опираются на концепцию сохранения и воспроизводства используемых в сельскохозяйственном производстве земельных

и других природных ресурсов, плодородия почв, продуктивного долголетия агроэкосистем и агроландшафтов Всероссийского НИИ кормов имени В.Р. Вильямса; концепции экологического каркаса агроландшафтов и эколого-хозяйственного баланса Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и Института географии РАН [Николаев, 1992; Кочуров, 1997].

Агроландшафтно-экологическое районирование ПКУ выполнено с использованием сравнительно-географического и агроландшафтно-экологического методов, эколого-ландшафтного и агроэкологического подходов [Докучаев, 1953; Агроландшафтно-экологическое..., 2005; Агроландшафты..., 2010, 2015].

В качестве контурной и информационной основы агроландшафтно-экологического районирования ПКУ использованы материалы Почвенно-экологического районирования Российской Федерации факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова. Оно представляет собой разделение территории на регионы, однотипные по структуре почвенного покрова и наиболее полно отвечающие запросам сельскохозяйственного производства [Карта..., 1997; Карта..., 2013].

В качестве информационной основы использовались также Национальный атлас почв РФ, природно-сельскохозяйственное, ландшафтно-экологическое районирование территории, эколого-географические, геоботанические карты, данные государственного земельного учета, фондовые, наземные и дистанционные данные [Национальный атлас почв..., 2011; Природно-сельскохозяйственное районирование..., 1983; Природные кормовые угодья..., 2001; Шашко, 1985; Экологическая..., 1999].

Использовались также многочисленные публикации, посвященные изучению объектов наших исследований [Сочава, 1978; Одум, 1975, 1987; Райкил, 1987; Спеддинг, 1987; Henwood, 2010; Holzel et al., 2012; Moon, 2013; Dengler et al., 2014; Kämpf et al., 2016].

При проведении исследований все источники информации изучались, сопоставлялись и критически анализировались. Базы данных пополнялись новой информацией и показателями, характеризующими состояние агроландшафтов, сельскохозяйственных земель, растительности, природных кормовых угодий, что является существенным вкладом в инвентаризацию кормовых ресурсов, рациональное природопользование и охрану агроэкосистем и агроландшафтов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С целью информационного обеспечения регионально-, ландшафтно- и экологически дифференцированного сельского хозяйства, рационального

природопользования, сохранения плодородия почв, повышения продуктивности и устойчивости агроэкосистем и агроландшафтов разработано агроландшафтно-экологическое районирование ПКУ в границах 11 природно-экономических (экономических) районов страны – Северного, Северо-Западного, Волго-Вятского, Центрального, Центрально-Черноземного, Поволжского, Северо-Кавказского, Уральского, Западно-Сибирского, Восточно-Сибирского и Дальневосточного.

Комплект документов агроландшафтно-экологического районирования по каждому природно-экономическому району России включает следующие материалы: карту М 1:2 500 000, легенду карты, базу данных по земельным угодьям, базу данных по кормовым угодьям, базу данных по негативным процессам, классификацию кормовых угодий, классификацию оленьих пастбищ (если имеются), стратегию и перспективные пути адаптивной интенсификации сельского хозяйства.

Впервые районирование ведется по природно-экономическим районам Российской Федерации, более детально и на современной основе. Базы данных карт почвенно-экологического районирования дополнены новой информацией и показателями, характеризующими состояние агроландшафтов, сельскохозяйственных земель, растительности, природных кормовых угодий, что является существенным вкладом в инвентаризацию кормовых угодий, рациональное природопользование и охрану агроэкосистем и агроландшафтов [Агроландшафтно-экологическое..., 2005; Агроландшафты..., 2010, 2015].

В перспективе целесообразно объединение материалов и баз данных почвенно-экологического районирования Российской Федерации и агроландшафтно-экологического районирования ПКУ разных регионов Российской Федерации, созданных на единой основе, для оценки и мониторинга состояния агроландшафтов, почв, кормовых угодий и принятия управленческих решений по рациональному природопользованию в сельском хозяйстве.

Карта агроландшафтно-экологического районирования ПКУ природно-экономического района. Впервые созданы не схемы, а карты районирования ПКУ. Карты агроландшафтно-экологического районирования ПКУ всех природно-экономических районов России составлены в масштабе 1:2 500 000 на современной высокоинформативной картографической топографической основе [Россия..., 1999].

Общегеографическая карта «Россия и сопредельные государства» масштаба 1:2 500 000 создана Федеральной службой геодезии и картографии России при участии картографо-геодезических служб Белоруссии и Украины. В качестве картографических источников составления карты были использованы

топографические карты масштабов 1:1 000 000 и 1:500 000, гидрографические и батиметрические карты, а также зарубежные карты и атласы последних лет издания, материалы космических фотосъемок, дежурные картографические и справочные материалы Центрального картографо-геодезического фонда Федеральной службы геодезии и картографии России.

На картографической основе показаны рельеф, гидрографическая сеть, дороги, населенные пункты, что позволяет анализировать эти показатели и использовать их для ориентирования и привязки разных источников информации.

Карта почвенно-экологического районирования масштаба 1:2 500 000 и легенда к ней содержат обширную и разностороннюю информацию о составе и структуре почвенного покрова и его зонально-региональных особенностях, характере растительности, рельефе, почвообразующих породах, параметрах атмосферного и почвенного климата, а также о качестве и современном использовании почв.

Почвенно-экологическое районирование проведено в тесной связи со всеми экологическими и географическими факторами его дифференциации. Почвенно-экологическое районирование используется в качестве базового для разработки различных специальных видов районирования: земледельческого, природно-сельскохозяйственного, агроландшафтного, комплексного почвенно-агромелиоративного и других, направленных на рациональное использование земельных ресурсов и сохранение почв страны.

На карте агроландшафтно-экологического районирования ПКУ всех природно-экономических районов России показаны шесть видов границ, в том числе четыре вида агроландшафтно-экологических (взяты с карты Почвенно-экологического районирования): 1) зон, 2) горных территорий, 3) провинций, 4) округов и два вида административных (имеющихся на картографической основе): 1) субъектов Российской Федерации, 2) природно-экономических районов.

В контурах на карте проставлены соответствующие индексы единиц районирования: крупных (зон, горных территорий), средних (провинций) и мелких (округов). Индексы и названия зон и провинций совпадают с данными Карты почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Индексы округов идут по порядку в границах природно-экономического района. В качестве примера представлен фрагмент карты Центрально-Черноземного района (рис. 1).

Карта и легенда к ней предназначены для использования в практических целях для сельского хозяйства и управления почвенно-земельными ресурсами.

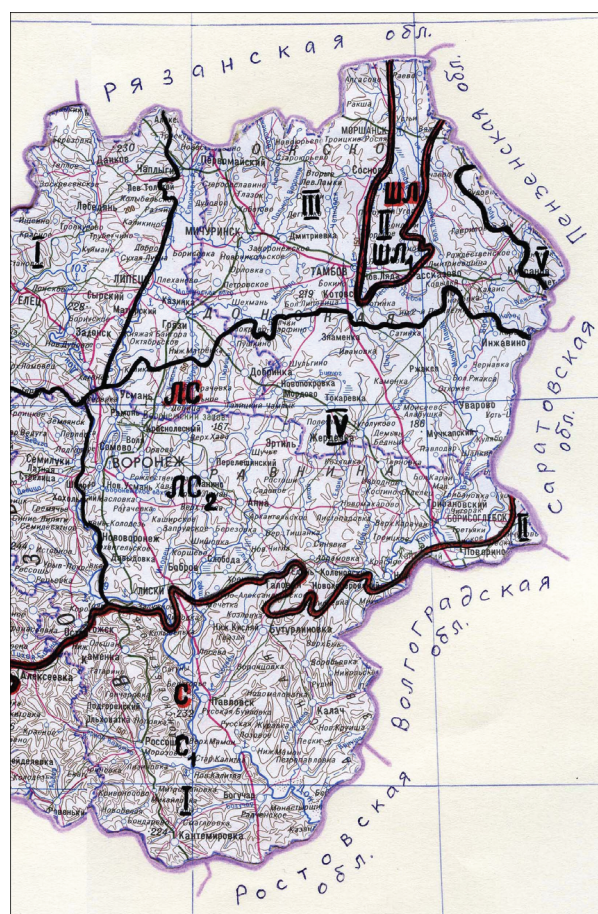


Рис. 1. Фрагмент карты агроландшафтно-экологического районирования Центрально-Черноземного природно-экономического района (рукопись)

Fig. 1. Fragment of the map of agrolandscape-ecological zoning of the Central Chernozem natural-economic region (the handwriting)

Легенда карты. Специальное тематическое содержание карты раскрыто в легенде. В ней даны агроклиматическая, агроландшафтно-экологическая и хозяйственная характеристики всех выделенных единиц агроландшафтно-экологического районирования, представлены состав и структура земельных угодий, ПКУ и оленьих пастбищ, экологическое состояние ландшафтов.

Легенда карты агроландшафтно-экологического районирования кормовых угодий составлена в форме таблицы, где приведены следующие показатели: 1) индексы (те же, что и на карте), 2) название, 3) краткая характеристика единиц районирования (зон, горных территорий, провинций и округов), 4) структура земельных угодий (пашня, сенокосы, пастбища, леса, кустарники, болота и др.), 5) структура природных кормовых угодий (с указанием классов и индексов основных типов и модификаций угодий по прилагаемой классификации), 6) экологическое состояние ландшафтов (в том числе пашни, ПКУ, леса, радиационное загрязнение территории) для каждой зоны, провинции и округа.

В качестве примера приведены фрагмент легенды к карте «Агроландшафтно-экологическое районирование ПКУ Поволжского природно-экономического района» и схема агроландшафтно-экологического районирования Поволжского природно-экономического района (рис. 2, табл. 1).

Ландшафтная характеристика зон, провинций и округов проводилась с использованием показателей и критериев обобщенных типов и уклонов рельефа, эрозионной опасности, типов и подтипов почв, структуры почвенно-растительного покрова, принятых в природно-сельскохозяйственном районировании земельного фонда СССР и почвенно-экологическом районировании Российской Федерации, национальном атласе почв и других источниках [Карта..., 1997; Карта..., 2013; Национальный атлас почв..., 2011; Природно-сельскохозяйственное районирование..., 1983, 1984; Природные кормовые угодья..., 2001; Шашко, 1985; Экологическая..., 1999].

В качестве основных агроклиматических показателей по зонам и провинциям районирования использовались следующие: континентальность

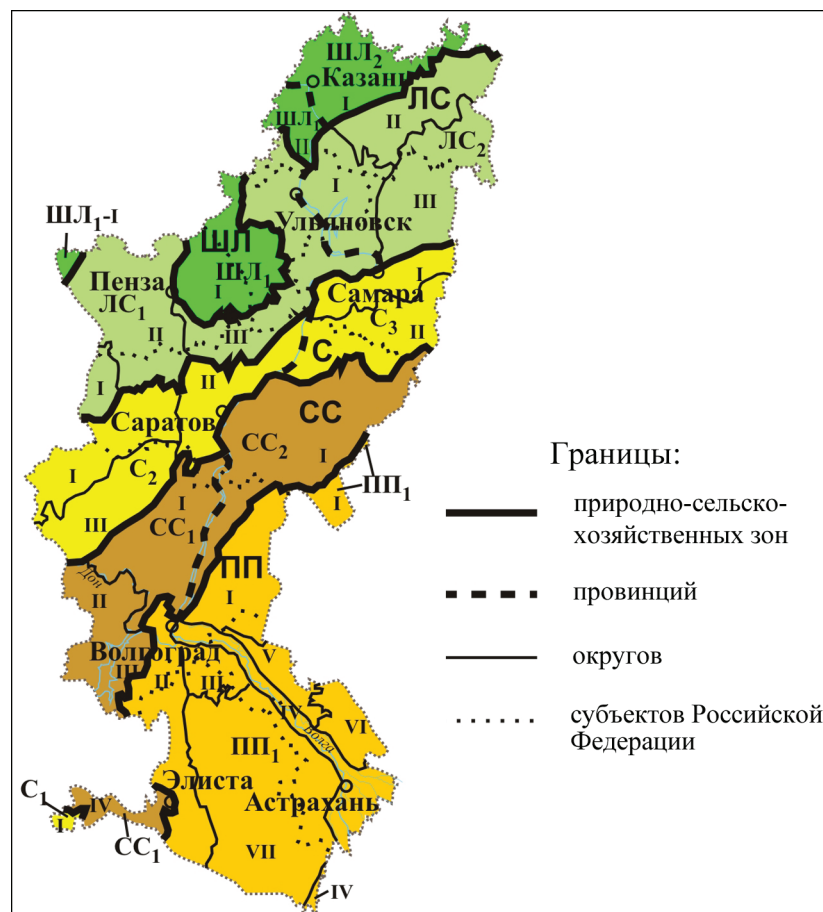


Рис. 2. Схема агроландшафтно-экологического районирования Поволжского природно-экономического района.
 Условные обозначения: Широколиственно-лесная зона: ШЛ₁ – Среднерусская провинция, ШЛ₂ – Прикамская провинция;
 Лесостепная зона: ЛС₁ – Среднерусская провинция, ЛС₂ – Заволжская провинция; Степная зона: С₁ – Предкавказская провинция, С₂ – Южнорусская провинция, С₃ – Заволжская провинция; Сухостепная зона: СС₁ – Донская провинция, СС₂ – Заволжская провинция; Полупустынная зона: ПП₁ – Прикаспийская провинция;
 I–VII – номера округов

Fig. 2. Scheme of agro-landscape and ecological zoning of the Volga natural and economic region.

Legend: Broadleaf forest zone: ШЛ₁ – Central Russian Province, ШЛ₂ – Kama Province; Forest-steppe zone: ЛС₁ – Central Russian Province, ЛС₂ – Zavolzhskaya province; Steppe zone: С₁ – Pre-Caucasian province, С₂ – South Russian Province, С₃ – Zavolzhskaya province; Dry steppe zone: СС₁ – Don Province, СС₂ – Zavolzhskaya province; Semi-Desert zone: ПП₁ – Caspian Province;
 I–VII – District numbers

климата, суммы температур выше 10°C, продолжительность периода с температурой выше 10°C, продолжительность безморозного периода, средняя температура июля, средняя температура января, осадки за год, годовой коэффициент увлажнения по Высоцкому-Иванову, высота снежного покрова, вероятность сухих и засушливых лет, преобладающий тип водного режима почв (по данным агроклиматического и почвенно-экологического районирования Российской Федерации, Национального атласа почв и др.).

Оценки состава и структуры земельных угодий, типологического состава и структуры ПКУ приведены с использованием опубликованных и фондовых материалов, статистической информации, данным дистанционных и наземных наблюдений, описаний, измерений и расчетов авторов [Земельный..., 2001; Государственный..., 2020, 2021].

Оценка экологического состояния агроландшафтов, земельных угодий (пашни, природных кормовых угодий, лесов) и радиоактивного загрязнения территории по зонам, провинциям и округам приведена по данным экологической и эколого-географической карт, почвенно-экологического районирования Российской Федерации, национального атласа почв и другим источникам [Карта..., 1997; Карта..., 2013; Национальный атлас почв..., 2011; Природно-сельскохозяйственное районирование..., 1983, 1984; Экологическая..., 1999; Эколого-географическая..., 1996].

Классификация ПКУ. Более подробная характеристика ПКУ дана в классификации кормовых угодий (на примере Прикаспийской провинции Полупустынной зоны Поволжья), которая дополняет легенду карты (табл. 2).

Таблица 1
Фрагмент легенды к карте «Агроландшафтно-экологическое районирование ПКУ Поволжского природно-экономического района»

Индекс	Название единиц районирования	Структура земельных угодий, %	Структура ПКУ, %	Экологическое состояние ландшафтов
ПП	Полупустынная зона*			
ПП ₁	Прикаспийская провинция полупустынных низменных платформенных равнин в Прикаспийской низменности*			
ВП	Черноземельский округ аккумулятивно-морских аридных равнин с плоским и волнистым рельефом. На юге и юго-востоке округа рельеф бутристый, грядовый. Почвы: бурые полупустынные (в т. ч. солонцеватые) и их комплексы с солонцами. В структуре земельных угодий ПКУ занимают небольшие площади и представлены, главным образом, пастбищами разной степени сбитости. Наиболее распространены полынно-мятликовые, полынно-эбелековые пастбища (42)*** в комплексе с чернополынными (40), биюргуновыми и кокпековыми (49). Часто встречаются сильно сбитые эфемеровые, эбелековые, однолетнесолянковые пастбища (43); разреженные группировки псаммофитов (полыни песчаная и веничная, верблюдка, колосняк, джузгун)	Пашня 11 Сенокосы – Пастбища 73 Леса – Кустарники 1 Под водой 1 Болота 1 Прочие 13	П-1** 40 П-3 57 П-5 2 П-6 1	Пахотные земли – кризисное ПКУ – от напряженного до кризисного Радиоактивное загрязнение – нет

Примечания. *Описание зоны и провинции сокращено. **Шифр подкласса по классификации ПКУ. ***Номер пастбища по классификации ПКУ.

Таблица 2
Классификация природных кормовых угодий Поволжского природно-экономического района (фрагмент)

№ п/п	Название типов и модификаций	Рельеф	Основные виды растений	Урожайность		Качество корма, се- зон исполь- зования
				сенокосов, ц/га сена	пастбищ, ц/га сухой поедае- мой массы	
Полупустынная зона						
Класс П-3. Равнинные полупустынные пастбища						
Подкласс П-3а. Пастбища на светло-каштановых и бурых полупустынных песчаных и супесчаных почвах						
42	Белополынно-злаковые, белополынно-прутьяковые, злаковые, прутняковые, среднесбитые белополынные, а также полынно-злаковые, полынные, по-лынно-однолетниковые с солянками на засоленных почвах	Пологобугристые равнины	Житняк сибирский, ковыли сарептский и волоса-тик, мятлик луковичный, мортуки восточный и пшеничный, кострец кровельный, полыни: белая, таврическая, солончаковая; прутняк простертый, эбелек, солянки: русская, листовничная, древовид-ная; гулявник Лёзеля, лебеда татарская	–	2,8–3,5	Хорошее ЛЮЗ*
43	Сильносбитые однолетниковые и эфемеровые	Пологобугристые равнины	Кострец кровельный, мортук пшеничный, мятлик луковичный, ковыль волосатик, гулявники высокий и Лёзеля, эбелек, солянка русская, лебеда татарская	–	1,2	Хорошее В*

Примечания. *Сезон использования: весна (В), лето (Л), осень (О), зима (З).

Флористический состав, продуктивность ПКУ, ее сезонная динамика, качество корма определялись с использованием опубликованных и фондовых материалов, наземных наблюдений, описаний, измерений и расчетов авторов.

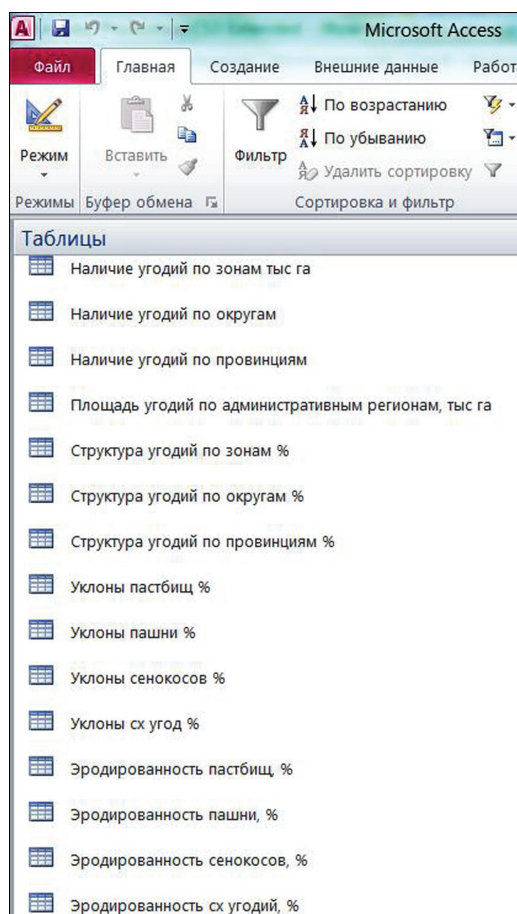


Рис. 3. База данных по земельным угодьям Поволжского природно-экономического района (фрагмент)

Fig. 3. Database on land of the Volga natural and economic region (fragment)

Базы данных. Базы данных по земельным угодьям природно-экономических районов составлены в программе Microsoft Access. Состав и структура базы данных (фрагмент) приведены для Поволжского природно-экономического района (рис. 3). Содержание блока базы данных «Эродированность пастбищ» представлено полностью (рис. 4).

Управление агроландшафтами. Управление агроландшафтами, их продукционной, средообразующей и природоохранной функциями является важнейшей государственной задачей в целях сохранения, воспроизводства и обеспечения продуктивного долголетия сельскохозяйственных земель и плодородия почв России, самой основы, производственного базиса сельского хозяйства [Агроландшафтно-экологическое..., 2005; Агроландшафты..., 2010, 2015].

В качестве примера приведено управление агроландшафтами Поволжья, которое направлено на создание их экологически устойчивой структуры и обеспечение нормального функционирования, в том числе:

- 1) увеличение доли ПКУ в структуре агроландшафтов;
- 2) разработку и реализацию комплекса биомелиоративных и фитомелиоративных мероприятий по предотвращению эрозии, дефляции и восстановления плодородия почв;
- 3) залужение или залесение эродированных и дефлированных земель;
- 4) возделывание многолетних трав на эрозионноопасных и дефляционноопасных пахотных землях;
- 5) разработку и реализацию комплекса мероприятий по нормализации допустимых нагрузок на агроэкосистемы и агроландшафты и рациональному их использованию.

The screenshot shows the Microsoft Access application window with the 'Erodability of pastures' (Эродированность пастбищ %) table selected. The table contains the following data:

Код	Название региона	Эрозион	Эродиро	Дефляц опа	Дефлирс	В
1	Астраханская обл			68	22	
2	Волгоградская обл	51	34	34	2	
3	Республика Калмыкия	8	7	92	39	
4	Пензенская обл	48	33	5		
5	Самарская обл	60	44	37	1	
6	Саратовская обл	39	32	59	2	
7	Республика Татарстан	37	33	5		
8	Ульяновская обл	64	49	37	1	
9	Поволжский ПЭР	28	21	60	17	
*	(№)	0	0	0	0	

Рис. 4. Эродированность пастбищ Поволжского природно-экономического района (фрагмент базы данных).

По данным Государственного земельного учета на 01.01.2001 г. [Земельный..., 2001]

Fig. 4. Erosion of pastures of the Volga natural and economic region (fragment of the database).

According to the data of the State Land Registration on 01.01.2001 [Land..., 2001]

Создание экологически устойчивой структуры и обеспечение нормального функционирования агроландшафтов Поволжья являются в настоящее время первоочередными вопросами в решении

проблем смягчения засух, уменьшения эрозии почв, оптимизации продуктивности сельскохозяйственных угодий и улучшения окружающей среды (табл. 3).

Таблица 3

Состояние агроэкосистем Поволжья и стратегия мелиоративных мероприятий (фрагмент)*

Зоны	Негативные свойства и процессы агроэкосистем	Стратегия мелиоративных мероприятий
Полупустынная зона	– Очень низкая влагообеспеченность, продолжительный дефицит влажности, сильная засушливость; – среднее и сильное проявление опустынивания земель; – значительное распространение и сильное проявление дефляции, широкое распространение засоления в сочетании с солонцовым процессом.	– Оптимизация агроландшафтов, повышение их устойчивости к засухам, опустыниванию и эрозии почв, усиление роли природных пастбищ; – комплекс биомелиоративных и фитомелиоративных мероприятий по повышению устойчивости к засухам, предотвращению эрозии, дефляции; – залужение или залесение эродированных и дефлированных земель; – посевы засухоустойчивых и солеустойчивых культур; – агротехнические и гидротехнические мероприятия по регулированию солевого и солонцового процессов.

Примечание. *Таблица составлена с использованием карты почвенно-агроэкологического районирования сельскохозяйственных земель России [Панкова, Новикова, 1998] и других источников.

ВЫВОДЫ

В ФНЦ «ВИК имени В.Р. Вильямса» разработано агроландшафтно-экологическое районирование природных кормовых угодий (ПКУ) в границах 11 природно-экономических (экономических) районов страны – Северного, Северо-Западного, Волго-Вятского, Центрального, Центрально-Черноземного, Поволжского, Северо-Кавказского, Уральского, Западно-Сибирского, Восточно-Сибирского, Дальневосточного с целью информационного обеспечения регионально-, ландшафтно- и экологически дифференцированного сельского хозяйства, рационального природопользования, сохранения плодородия почв, повышения продуктивности и устойчивости агроэкосистем и агроландшафтов.

Комплект документов агроландшафтно-экологического районирования ПКУ по каждому природно-экономическому району России включает следующие материалы: карту М 1:2 500 000, легенду, базу данных по земельным угодьям, базу данных по кормовым угодьям, базу данных по негативным процессам, классификацию кормовых угодий, классификацию оленьих пастбищ (если имеются), стратегию и перспективные пути рационального природопользования в сельском хозяйстве.

Районирование ПКУ разработано на базе карты почвенно-экологического районирования РФ М 1:2 500 000 факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, которая использована как контурная и информационная основа. Районирование выполнено также с использованием многочисленных картографических и статистических данных, а

также доступных литературных и фондовых источников, сравнительно-географического и агроландшафтно-экологического методов.

Впервые созданы не схемы, а карты агроландшафтно-экологического районирования ПКУ. Они составлены в масштабе 1:2 500 000 на современной высокоинформативной топографической основе для всех природно-экономических районов России.

Базы данных карты почвенно-экологического районирования дополнены новой информацией и показателями, характеризующими состояние ландшафтов и их компонентов: климата, рельефа, гидрологического режима, почв, растительности, ПКУ, развития негативных процессов, экологического и хозяйственного состояния.

На основе агроландшафтно-экологического районирования ПКУ развитие земледелия и растениеводства обретает зональную, региональную, ландшафтную и экологическую адаптацию и специализацию, что позволяет с наибольшей эффективностью использовать местные природные ресурсы, свести к минимуму негативные последствия применения техногенных факторов интенсификации, обеспечить биологизацию и экологизацию сельского хозяйства. Это является существенным вкладом в инвентаризацию земельных и кормовых угодий, рациональное природопользование и охрану агроэкосистем и агроландшафтов.

В перспективе целесообразно объединение материалов и баз данных почвенно-экологического районирования РФ и агроландшафтно-экологического районирования ПКУ разных

регионов Российской Федерации, созданных на единой основе, для осуществления мониторинга состояния агроландшафтов, почв, кормовых

угодий и принятия управленческих решений по рациональному природопользованию в сельском хозяйстве России.

Благодарности. Статья подготовлена в рамках темы FGGW-2022-0005 государственного задания № 075-01191-22-00 ФГБНУ «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса»; научного проекта РНФ № 22-14-00107 ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»; № 1736-р Евразийского центра по продовольственной безопасности МГУ имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агроландшафтно-экологическое районирование и адаптивная интенсификация кормопроизводства Центрального экономического района Российской Федерации. М.: Изд-во ФГНУ «Росинформагротех», 2005. 396 с.
- Агроландшафты Поволжья. Районирование и управление / В.М. Косолапов, И.А. Трофимов, Л.С. Трофимова, Е.П. Яковлева. М.; Киров: Дом печати – ВЯТКА, 2010. 336 с.
- Агроландшафты Центрального Черноземья. Районирование и управление / В.М. Косолапов, И.А. Трофимов, Л.С. Трофимова, Е.П. Яковлева. М.: Наука, 2015. 198 с.
- Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2019 году. М.: Росреестр, 2020. 206 с.
- Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2020 году. М.: Росреестр, 2021. 197 с.
- Докучаев В.В. Наши степи прежде и теперь. М.: Сельхозгиз, 1953. 152 с.
- Жученко А.А. Стратегия адаптивной интенсификации сельского хозяйства (концепция). Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1994. 148 с.
- Земельный фонд Российской Федерации на 1 января 2001 года / Росземкадастр, ФКЦ «Земля». М.: Экос, 2001. 230 с.
- Карта почвенно-экологического районирования Восточно-Европейской равнины. Масштаб 1:2 500 000 / науч. ред. Г.В. Добровольский, И.С. Урусевская. М.: ЭКОР, 1997.
- Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации / И.С. Урусевская, И.О. Алябина, В.П. Винюкова [и др.]; науч. ред. Г.В. Добровольский, И.С. Урусевская. Масштаб 1 : 2 500 000. М.: Талка+, 2013. 16 л.
- Кочуров Б.И. География экологических ситуаций (экодиагностика территорий). М.: ИГ РАН, 1997. 132 с.
- Национальный атлас почв Российской Федерации. М.: Астрель; АСТ, 2011. 632 с.
- Николаев В.А. Основы учения об агроландшафтах // Агроландшафтные исследования. Методология, методика, региональные проблемы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. С. 4–57.
- Одум Ю.П. Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.
- Одум Ю.П. Свойства агроэкосистем // Сельскохозяйственные экосистемы. М.: Агропромиздат, 1987. С. 12–18.
- Панкова Е.И., Новикова А.Ф. Карта почвенно-агроэкологического районирования сельскохозяйственных земель России // Экология. 1998. № 1. С. 28–35.
- Природно-сельскохозяйственное районирование земельного фонда СССР. Карта масштаба 1:8 000 000 / МСХ, ГИЗР. М.: ГУГК, 1984. 1 л.
- Природно-сельскохозяйственное районирование и использование земельного фонда СССР / под ред. А.Н. Каштанова. М.: Колос, 1983. 336 с.
- Природные кормовые угодья Российской Федерации и сопредельных государств (карта 1:4 000 000). М.: ФСТК, 2001. 4 л.
- Райкил Дж. Моделирование агроэкосистем: уроки, данные экологией // Сельскохозяйственные экосистемы. М.: Агропромиздат, 1987. С. 155–177.
- Россия и сопредельные государства: карта. Масштаб 1:2 500 000. М.: Роскартография, 1999. 16 л.
- Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 320 с.
- Спеддинг К.Р.В. Сельскохозяйственные системы и роль моделирования // Сельскохозяйственные экосистемы. М.: Агропромиздат, 1987. С. 178–185.
- Шапко Д.И. Агроклиматические ресурсы СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 247 с.
- Экологическая карта России (масштаб 1:8 000 000). М.: Картография, 1999. 1 л.
- Эколого-географическая карта Российской Федерации (масштаб 1:4 000 000). М.: ФСТК, 1996. 4 л.
- Dengler J., Janisova M., Torok P. et al. Biodiversity of Palaearctic grasslands: A synthesis, *Agric. Ecoyst. Environ.*, 2014, vol. 182, p. 1–14. DOI: 10.1016/j.agee.2013.12.015.
- Henwood W.D. Toward a strategy for the conservation and protection of the world's temperate grasslands, *Great Plains Res.*, 2010, vol. 20, p. 121–134, URL: <https://www.jstor.org/stable/23782179> (дата обращения 10.08.2022).
- Holzel N., Haub C., Ingelfinger M.P. et al. The return of the steppe large-scale restoration of degraded land in southern Russia during the post-Soviet era, *J. Nat. Conserv.*, 2012, vol. 10, p. 75–85, DOI: 10.1078/1617-1381-00009.
- Kämpf I., Mathar W., Kuzmin I. et al. Post-Soviet recovery of grassland vegetation on abandoned fields in the forest steppe zone of western Siberia, *Biodivers. Conserv.*, 2016, vol. 25, p. 2563–2580.
- Moon D. The Plough that Broke the Steppes: Agriculture and Environment on Russia's Grasslands, 1700–1914, 2013, OUP, Oxford, 319 p., DOI: 10.5612/slavicreview.73.4.903.

Поступила в редакцию 27.08.2022

После доработки 16.08.2023

Принята к публикации 04.12.2023

AGROLANDSCAPE-ECOLOGICAL ZONING OF NATURAL FORAGE LANDS IN RUSSIAN REGIONS

I.A. Trofimov¹, L.S. Trofimova², E.P. Yakovleva³, I.O. Alyabina⁴, I.S. Urusevskaya⁵, S.A. Shoba⁶

¹⁻³ Williams Federal Research Center of Forage Production & Agroecology, Laboratory of Geobotany and Agroecology

⁴⁻⁶ Lomonosov Moscow State University, Soil Science Faculty, Department of Soil Geography

^{4,6} Lomonosov Moscow State University, Eurasian Center for Food Security

¹ Head of the Laboratory, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: viktrofi@mail.ru

² Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Agricultural Sciences; e-mail: viktrofi@mail.ru

³ Senior Scientific Researcher; e-mail: viktrofi@mail.ru

⁴ Professor; Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Biology; e-mail: alio@yandex.ru

⁵ Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Biology; e-mail: alio@yandex.ru

⁶ Head of the Department; Director of the Center, Professor, D.Sc. in Biology,
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; e-mail: alio@yandex.ru

Agrolandscape and ecological zoning of natural forage lands (NFL) has been developed at the Williams Federal Research Center of Forage Production & Agroecology for the information support of regionally, landscape and ecologically differentiated agriculture, rational nature management, preservation of soil fertility, and increase of productivity and sustainability of agroecosystems and agrolandscapes. The zoning covers 11 natural and economic (economic) regions of the country, i. e. Northern, Northwestern, Volga-Vyatka, Central, Central Chernozem, Volga Region, North Caucasian, Urals, West Siberian, East Siberian, Far Eastern. The set of documents for agro-landscape and ecological zoning of the NFL for each natural and economic region of Russia includes the following materials: map M 1:2 500 000, legend, database on lands, database on forage lands, database on negative processes, classification of forage lands, classification of deer pastures, strategy and promising ways of agricultural nature management. The NFL zoning was developed on the basis of the Map of Soil and Ecological Zoning of the Russian Federation M 1:2 500 000 elaborated at the MSU Faculty of Soil Science, which is used as a contour and information basis. Numerous cartographic and statistical data, and available literary and stock sources were used for the zoning, which was based on comparative geographical and agro-landscape-ecological methods. The agro-landscape and ecological zoning of the NFL provides zonal, regional, landscape and ecological adaptation and specialization for the development of agriculture, which allows using local natural resources with the greatest efficiency and minimizing the development of negative processes. The databases of the soil-ecological zoning map have been supplemented with new information and indicators characterizing the state of landscapes and their components, such as climate, relief, hydrological regime, soils, vegetation, NFL, the development of negative processes, ecological and economic conditions. This is a significant contribution to the inventory of lands and fodder lands, nature management and protection of agroecosystems and agricultural landscapes. In the future, it is advisable to combine materials and databases of the soil-ecological zoning of the Russian Federation and the agro-landscape-ecological zoning of NFL of different regions of the Russian Federation, created on a single basis, to assess and monitor the state of agrolandscapes, soils and forage lands, and take administrative decisions on nature management in agriculture.

Keywords: agroecosystems, lands, databases

Acknowledgments. The paper was prepared under the research theme FGGW-2022-0005 of the state task 075-01191-22-00 for the Williams Federal Research Center of Forage Production & Agroecology. It was also financially supported by the Russian Science Foundation (project 22-14-00107 of the Lomonosov Moscow State University and 1736-p of the MSU Eurasian Center for Food Security).

REFERENCES

- Agrolandshaftno-ekologicheskoe raionirovanie i adaptivnaya intensivifikatsiya kormoproizvodstva Tsentral'nogo ekonomicheskogo raiona Rossiiskoi Federatsii* [Agrolandscape-ecological zoning and adaptive intensification of fodder production in the Central Economic Region of the Russian Federation], Moscow, FGNU "Rosinform-agrotekh" Publ., 2005, 396 p. (In Russian)
- Agrolandshafty Povolzh'ya. Raionirovanie i upravlenie* [Agricultural landscapes of the Volga region, Zoning and management], V.M. Kosolapov, I.A. Trofimov, L.S. Trofimova, E.P. Yakovleva, Moscow, Kirov, Dom pechati – VYATKA Publ., 2010, 336 p. (In Russian)
- Agrolandshafty Tsentral'nogo Chernozem'ya. Raionirovanie i upravlenie* [Agrolandscapes of the Central Chernozem Region. Zoning and management], V.M. Kosolapov, I.A. Trofimov, L.S. Trofimova, E.P. Yakovleva (authors), Moscow, Nauka Publ., 2015, 198 p. (In Russian)
- Dengler J., Janisova M., Torok P. and Wellstein C. Biodiversity of Palaearctic grasslands: A synthesis, *Agric. Ecoyst. Environ.*, 2014, 182, 1–14, DOI: 10.1016/j.agee.2013.12.015.
- Dokuchaev V.V. *Nashi stepi prezhe i teper'* [Our steppes before and now], Moscow, Sel'khozgiz Publ., 1953, 152 p. (In Russian)

- Ekologicheskaya karta Rossii, masshtab 1:8 000 000* [Ecological map of Russia, scale 1:8 000 000], Moscow, Cartography Publ., 1999, 1 sh. (In Russian)
- Ekologo-geograficheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. 1:4 000 000* [Ecological and geographical map of the Russian Federation. 1:4 000 000], Moscow, Federal Service of Geodesy and Cartography Publ., 1996, 4 sh. (In Russian)
- Gosudarstvennyi (natsional'nyi) доклад o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' v Rossiiskoi Federatsii v 2019 godu* [State (national) report on the state and use of lands in the Russian Federation in 2019], Moscow, Rosreestr Publ., 2020, 206 p. (In Russian)
- Gosudarstvennyi (natsional'nyi) доклад o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' v Rossiiskoi Federatsii v 2020 godu* [State (national) report on the state and use of lands in the Russian Federation in 2020], Moscow, Rosreestr Publ., 2021, 197 p. (In Russian)
- Henwood W.D. Toward a strategy for the conservation and protection of the world's temperate grasslands, *Great Plains Res.*, 2010, 20, 121–134, URL: <https://www.jstor.org/stable/23782179>.
- Holzel N., Haub C., Ingelfinger M.P. et al. The return of the steppe large-scale restoration of degraded land in southern Russia during the post-Soviet era, *J. Nat. Conserv.*, 2012, 10, 75–85, DOI: 10.1078/1617-1381-00009.
- Kämpf L., Mathar W., Kuzmin I. et al. Post-Soviet recovery of grassland vegetation on abandoned fields in the forest steppe zone of western Siberia, *Biodivers. Conserv.*, 2016, 25, 2563–2580.
- Karta "Rossiya i sopredel'nye gosudarstva". Masshtab 1:2 500 000* [Map "Russia and neighboring states". Scale 1:2 500 000], Moscow, Roskartografiya Publ., 1999, 16 sh. (In Russian)
- Karta pochvenno-ekologicheskogo raionirovaniya Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:2 500 000* [Map of soil-ecological zoning of the Russian Federation. Scale 1:2 500 000], I.S. Urusevskaya, I.O. Alyabina, V.P. Vinyukova [et al.], G.V. Dobrovol'skii, I.S. Urusevskaya (eds.), Moscow, Talka+ Publ., 2013, 16 sh. (In Russian)
- Karta pochvenno-ekologicheskogo raionirovaniya Vostochno-Evropeiskoi ravniny. Masshtab 1:2 500 000* [Map of soil-ecological zoning of the East European Plain. Scale 1:2 500 000], G.V. Dobrovol'skii, I.S. Urusevskaya (eds.), Moscow, EKOR Publ., 1997. (In Russian)
- Kochurov B.I. *Geografiya ekologicheskikh situatsii (ekodiagnostika territorii)* [Geography of ecological situations (ecological diagnostics of territories)], Moscow, Institute of Geography RAS Publ., 1997, 132 p. (In Russian)
- Moon D. *The Plough that Broke the Steppes: Agriculture and Environment on Russia's Grasslands, 1700–1914*, 2013, OUP, Oxford, 319 p., DOI: 10.5612/slavicreview.73.4.903.
- Natsional'nyi atlas pochv Rossiiskoi Federatsii* [National Soil Atlas of the Russian Federation], Moscow, Astrel', AST Publ., 2011, 632 p. (In Russian)
- Nikolaev V.A. [Fundamentals of the doctrine of agrolandscapes], *Agrolandshaftnye issledovaniya. Metodologiya, metodika, regional'nye problemy* [Agrolandscape research. Methodology, technique, regional problems], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1992, p. 4–57. (In Russian)
- Odum Yu.P. *Fundamentals of ecology*, Moscow, Mir Publ., 1975, 740 p.
- Odum Yu.P. [Properties of agroecosystems], *Sel'skokhozyaistvennye ekosistemy* [Agricultural ecosystems], Moscow, Agropromizdat Publ., 1987, p. 12–18. (In Russian)
- Pankova E.I., Novikova A.F. *Karta pochvenno-agroekologicheskogo raionirovaniya sel'skokhozyaistvennykh zemel' Rossii* [Map of soil-agroecological zoning of agricultural lands in Russia], *Ekologiya*, 1998, no 1, p. 28–35. (In Russian)
- Prirodno-sel'skokhozyaistvennoe raionirovanie i ispol'zovanie zemel'nogo fonda SSSR* [Natural and agricultural zoning and the use of the land fund of the USSR], A.N. Kashtanov (ed.), Moscow, Kolos Publ., 1983, 336 p. (In Russian)
- Prirodno-sel'skokhozyaistvennoe raionirovanie zemel'nogo fonda SSSR. Karta masshtab 1:8 000 000* [Natural and agricultural zoning of the land fund of the USSR. Map scale 1:8 000 000], Moscow, Main Directorate of Geodesy and Cartography Publ., 1984, 1 sh. (In Russian)
- Prirodnye kormovye ugod'ya Rossiiskoi Federatsii i sopredel'nykh gosudarstv (karta m 1:4 000 000)* [Natural forage lands of the Russian Federation and neighboring states (map scale 1:4 000 000)], Moscow, Federal Service of Geodesy and Cartography Publ., 2001, 4 sh. (In Russian)
- Raikil Dzh. [Agroecosystem Modeling: Lessons from Ecology], *Sel'skokhozyaistvennye ekosistemy* [Agricultural ecosystems], Moscow, Agropromizdat Publ., 1987, p. 155–177. (In Russian)
- Shashko D.I. *Agroklimaticheskie resursy SSSR* [Agro-climatic resources of the USSR], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985, 247 p. (In Russian)
- Sochava V.B. *Vvedenie v uchenie o geosistemakh* [Introduction to the study of geosystems], Novosibirsk, Nauka Publ., 1978, 320 p. (In Russian)
- Spedding K.R.V. [Agricultural systems and the role of modeling], *Sel'skokhozyaistvennye ekosistemy* [Agricultural ecosystems], Moscow, Agropromizdat Publ., 1987, p. 178–185. (In Russian)
- Zemel'nyi fond Rossiiskoi Federatsii na 1 yanvarya 2001 goda* [Land fund of the Russian Federation as of January 1, 2001], Roszemkadastr, Federal Cadastral Center "Zemlya", Moscow, Ekos Publ., 2001, 230 p. (In Russian)
- Zhuchenko A.A. *Strategiya adaptivnoi intensivifikatsii sel'skogo khozyaistva (kontseptsiya)* [Strategy for adaptive intensification of agriculture (concept)], Pushchino, Department of Scientific and Technical Information of the Pushchino Scientific Center RAS Publ., 1994, 148 p. (In Russian)

Received 27.08.2022

Revised 16.08.2023

Accepted 04.12.2023

ПРИРОДНЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ И ЦЕЗИЙ-137 В ПОЧВАХ И ДОННЫХ ОСАДКАХ ОЗЕРА ХАНКА

К.В. Савельева¹, Д. Дженг², А.К. Рожкова³, Д.Х. Шлык⁴, Э.А. Токарь⁵,
Т.А. Воробьева⁶, Н.В. Кузьменкова⁷

^{1–3, 6, 7} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

^{4, 5} Институт химии ДВО РАН, лаборатория рентгеноструктурного анализа

¹ Факультет почвоведения, кафедра радиэкологии и экотоксикологии, магистр; e-mail: universe2910.67@gmail.com

² Химический факультет, кафедра радиохимии, магистр; e-mail: zhengzhaogang98@gmail.com

³ Химический факультет, кафедра радиохимии, канд. хим. наук; e-mail: aleksandra.rozhkova@chemistry.msu.ru

⁴ Канд. хим. наук; e-mail: daria79@list.ru

⁵ Канд. хим. наук; e-mail: d.edd@mail.ru

⁶ Географический факультет, кафедра рационального природопользования,
доц., канд. геогр. наук; e-mail: tvorobyova@yandex.ru

⁷ Химический факультет, кафедра радиохимии, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: kuzmenkovanv@my.msu.ru

В статье рассматривается радионуклидный состав почв территорий, прилегающих к озеру Ханка, а также донных отложений озера и реки Спасовки, впадающей в Ханку. Рассмотрены вопросы распространения и пространственной изменчивости удельной активности естественных (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) и искусственного (^{137}Cs) радионуклидов. Хозяйственное использование водосборного бассейна озера Ханка приобрело в последние годы особое значение, так как территория попала под государственную программу «Дальневосточный гектар», поэтому в статье подчеркивается значимость изучения загрязнения природной среды и геоэкологических проблем, а также необходимости принятия мер по их решению. В статье подробно описывается состав и свойства почв вблизи озера Ханка, определены условия радиальной миграции радионуклидов. Равнинные места с высокой влажностью и водоупорным горизонтом благоприятны для торфообразования (горизонт торфа может достигать 50 см), что способствует миграции радионуклидов в более глубокие горизонты. На возвышенных территориях формируются оглеенные дерново-подзолистые и подзолисто-буроземные почвы глинистого и суглинистого гранулометрического состава, что наоборот препятствует миграции радионуклидов вниз по профилю. Для почв установлено среднее содержание органической составляющей – 4%. Для некоторых образцов выявлен минералогический состав, демонстрирующий наличие, помимо калиевых и натриевых полевых шпатов, фаз гипса кальциевого лангбейнита в верхних слоях, что указывает на использование соляных сульфатных минеральных удобрений. Для донных осадков содержание органических веществ составило 2–3%. Определены фоновые уровни запасов радионуклидов в почвах в районе расположения озера: ^{137}Cs – 18–177 Бк/м²; ^{238}U и ^{232}Th – 500–1800 Бк/м²; ^{40}K – 1300–11000 Бк/м² соответственно. Установлено отсутствие влияния радиационных катастроф на территорию исследования. Обнаружено интенсивное вымывание ^{40}K с водосбора озера поверхностным стоком. Наименьшее содержание запасов ^{40}K обнаружено в почвах и речных донных отложениях (до 1–10 кБк/м² соответственно), а наибольшее – в озерных отложениях (8–20 кБк/м²).

Ключевые слова: удельная активность, условия миграции радионуклидов

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.5

ВВЕДЕНИЕ

Геоэкологические проблемы Приморского края, водосборного бассейна оз. Ханка и, в частности, биосферного заповедника «Ханкайский», влияющие на стабильность экосистем охраняемой зоны, активно обсуждаются в последние годы [Иванова и др., 2022; Клышевская и др., 2019; Mikhailovskaya et al., 2017; Kiku et al., 2014; Baklanov et al., 2019]. Однако основной упор в них делается на проблеме распространения валовых и подвижных форм тяжелых металлов в водах бассейна оз. Ханка. Рас-

пространению и пространственной изменчивости удельной активности естественных и искусственных радионуклидов уделяется гораздо меньше внимания. Многочисленные экологические, геохимические и другие исследования не выявляют превышения фонового уровня загрязнения в почвенно-растительном покрове даже такими распространенными техногенными радионуклидами, как ^{137}Cs и ^{90}Sr [Клышевская и др., 2019]. Вклад ^{137}Cs от АЭС «Фукусима» составляет от 11 до 300 Бк/м² в почвах Приморского края, что соответственно не

превышает 22% от общего содержания этого радионуклида в почве [Mikhailovskaya et al., 2017]. Общие запасы ^{137}Cs в донных осадках озера Ханка по оценкам китайских исследователей [Zhang et al., 2022] на данный момент составляют 4600 Бк/м². Испытания ядерного оружия, проводимые, например, в Китайской Народной Республике на полигоне Лоб-Нор, или Чернобыльская катастрофа не оказали влияния на радиационный фон района расположения оз. Ханка [Сойфер, 2002]. Основу естественного радиационного фона местности составляет радиоактивность горных пород (продукты распада рядов ^{238}U , ^{235}U и ^{232}Th).

Для территории вокруг оз. Ханка оценка удельной активности ^{40}K особенно актуальна, так как большая часть этих территорий на сегодняшний день активно используется для выращивания сельскохозяйственных культур. В свою очередь, применение минеральных удобрений, в частности калийных, увеличивает риск загрязнения почв ^{40}K , поскольку вместе с почвенными частицами выносятся азотные, фосфорные и калийные удобрения. Концентрация взвешенных частиц, вынесенных в результате эрозии почв, в водах оз. Ханка по результатам китайских исследователей в 1996 г. составляла около 50 мг/л, что в несколько раз ниже их концентрации в водах Малой Ханки [Xiangnan, 2010]. Предполагается, что эта разница обусловлена разными методами измерения взвешенных частиц, однако, отмечается также, что такие высокие значения концентрации взвешенных частиц типичны как для китайской, так и для российской частей озера. Результаты отечественных исследователей по гидрохимическим показателям соответствуют нормативам, однако обнаружено превышение предельно допустимых концентраций взвешенных частиц в основной акватории оз. Ханка [Катайкина, Матвеев, 2022]. По показателю концентрации биогенных элементов в водах озера не было обнаружено превышения санитарных норм [Коженкова, Юрченко, 2022].

Целью данной работы было определение фоновых уровней радионуклидов ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs в донных осадках оз. Ханка и почвах прибрежных территорий, выявление закономерностей их пространственного распределения в районе исследований. Для достижения поставленной цели нами впервые были проведены комплексные исследования почв вокруг озера, донных осадков реки и самого озера на содержание в них гамма-излучающих радионуклидов.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Геоморфология озера. Озеро Ханка – это мелководный водоем со средней глубиной 4,5 м, который является самым крупным пресноводным озером

Восточной Азии, расположенным в центре Приханкайской низменности. Площадь водной поверхности варьирует от 5010 до 3940 км² в зависимости от сезонных условий. Озеро имеет около 90 км в длину и максимум 67 км в ширину. Площадь водосбора 21 770 км² (рис. 1). В озеро впадает 24 реки, но вытекает только р. Сунгача, которая соединяет его с р. Уссури, а затем с Амуром. Бассейн оз. Ханка расположен в средней части Западно-Ханкайско-Раздольненской тектонической депрессии. Орография водосборного бассейна озера представлена постепенным переходом от хребтов со среднегорным и низкогорным рельефом на востоке к мелкогорному и холмисто-увалистому рельефу на западе [Худяков, 1972]. Уровенный режим озера контролируется двумя основными факторами. Первый – водный баланс озера, обусловленный величиной накопленного влагозапаса на каждый момент времени, в том числе и подземного. Его динамика определяет общий сезонный и многолетний режим уровня. Второй фактор – ветровые воздействия, вызывающие систематические сгонно-нагонные деинвеляции уровня, временной масштаб которых измеряется часами и сутками.

Климат. Озеро Ханка лежит в области умеренного муссонного климата восточного сектора материка. Климатические условия в Ханкайской котловине определяются в основном муссонными и местными циркуляционными процессами. Мелководные пойменные водоемы ежегодно полностью промерзают, а снежный покров сохраняется около 130 дней в году (с декабря по март). В среднем, за год на территории оз. Ханка выпадает до 600 мм осадков, из которых 500 мм – в летнее время. В течение года повторяемость и направление ветров меняется в зависимости от сезона, преобладающими являются южное и юго-западное направления – от 33 до 48% (по станциям Хороль и Халкидон). Наибольшая среднемесячная скорость ветра в приозерье отмечается в апреле–мае: от 4 до 6 м/с [Попова, Качур, 2019].

Почвообразующие породы и почвы. Исследуемая область частично относится к Приханкайской низменности, которая сложена в основном песчано-глинистыми отложениями, покрытыми мощной толщей озерных и аллювиальных отложений. Почвообразующие породы Приханкайской низменности относятся к сложным нерасчлененным генетическим подразделениям и представляют собой озерные, аллювиальные и озерно-иллювиальные отложения. Это в основном рыхлые породы глинистого и тяжелосуглинистого гранулометрического составов с включениями обломочных наносных материалов [Национальный..., 2011]. Равнинные территории с луговой растительностью в связи

с плотной подстилающей породой заболочены, поэтому почвенный покров вблизи оз. Ханка на востоке и юго-востоке представлен в основном торфяными, луговыми и глеевыми почвами. Они характеризуются различным гранулометрическим и минералогическим составом, а распределение илистого вещества по профилю почв имеет слоистый характер. Равнинные места с высокой влажностью и водоупорным горизонтом создают благоприятные условия для торфообразования. Западная и юго-западная части исследуемой территории характеризуются достаточно сильной рас-

члененностью рельефа и высоким разнообразием почв. В прибрежных областях под лесной широколиственной растительностью с преобладанием дуба формируются дерново-подзолистые почвы с разными степенями оподзоливания и оглеения в нижних частях профиля. На возвышенных территориях под древесной широколиственной растительностью формируются богатые перегноем дерново-подзолистые и подзолисто-буроземные почвы с признаками оглеения в более глубоких частях профиля [Клышевская, 2019; Национальный..., 2011].

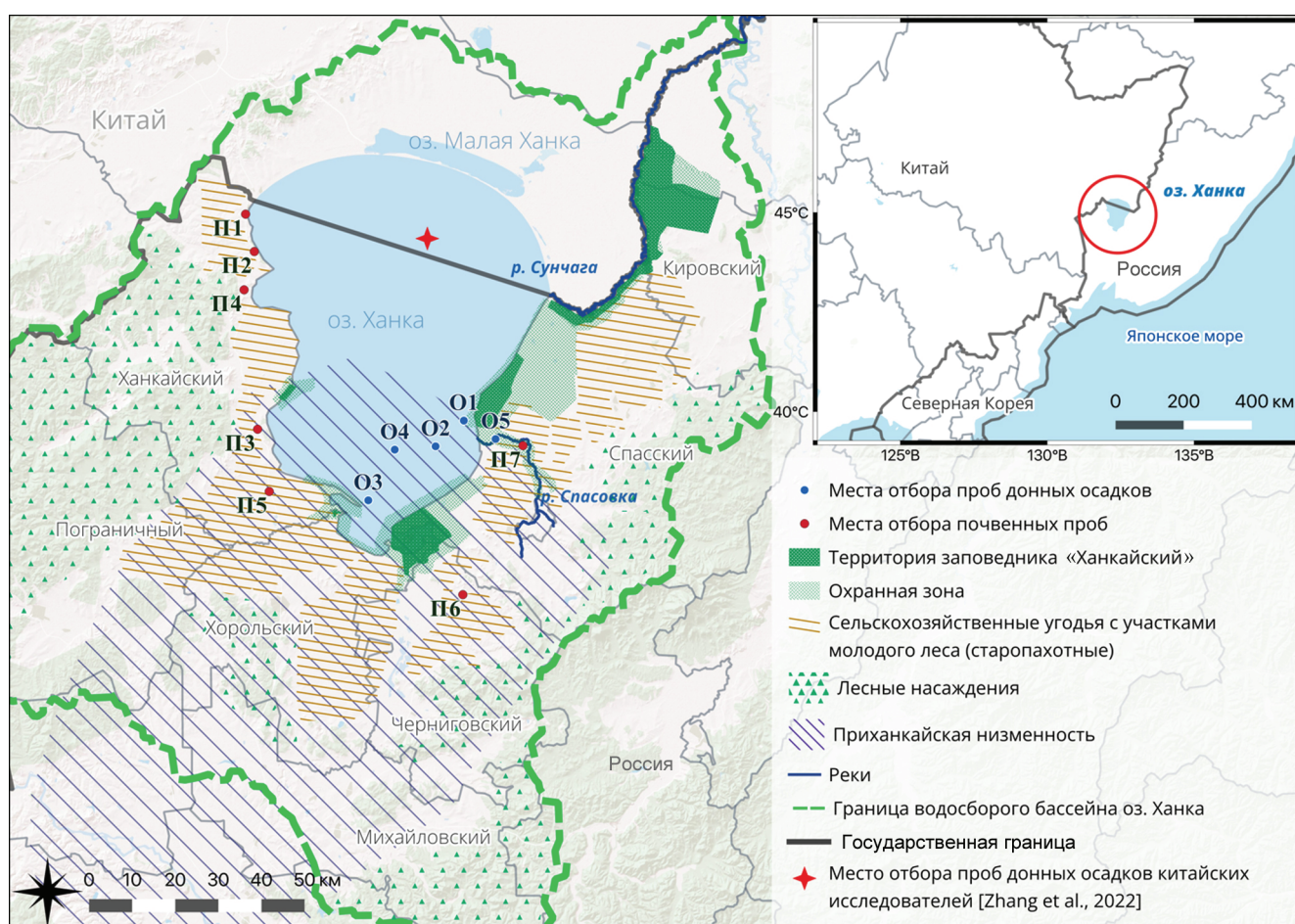


Рис. 1. Карта-схема отбора почв и донных осадков

Fig. 1. Map-scheme of selection of soils and bottom sediments

Геохимия ландшафтов. В соответствии с теорией геохимических ландшафтов, выделенных по условиям миграции радионуклидов, территория вокруг озера Ханка относится к группе агроландшафтов и лесостепей амурских и уссурийских видов. Выделяются глеевые и сорбционные геохимические барьеры. Обстановка характеризуется контрастными условиями механической латеральной миграции элементов между компонентами ландшафтов, от слабой на выровненных поверхностях до очень

энергичной на расчлененной местности [Перельман, 1975]. Большое значение для концентрации искусственных изотопов имеют сорбционные барьеры, меньшее – щелочных, восстановительных и др. Радиоактивные аномалии, образующиеся на барьерах, характеризуются высокой контрастностью, что облегчает их выявление (возможна меньшая чувствительность анализа и т. д.).

Донные осадки. Озерная котловина заполнена четвертичными отложениями мощностью 200 см.

Осадки оз. Ханка имеют терригенное происхождение и представлены в виде спрессованных песков и тонкозернистых глин, слои которых, вероятно, образованы за счет зерновых потоков [Павлюткин, Ханчук, 2002]. Несмотря на то что почвы вокруг оз. Ханка сложены бурыми суглинками, которые обуславливают мутность воды озера, глинистые осадки в озере распределены очень локально, причем самые большие площади занимают наиболее тонкие пелиты. В условиях активного водного режима большая часть пелитов для мелководного озера является транзитной. В местах поступления глинистого материала (устья равнинных рек) отмечается накопление отложений с преобладанием алевролитов [Росликова, 2006].

Растительность и сельскохозяйственное использование. Современный естественный растительный покров этой области, сформировавшийся после малого ледникового периода, представляет собой дубовые и кедрово-широколиственные леса. Растительный покров Ханкайско-Уссурийской равнины в связи с продолжительным вовлечением ее в хозяйственное использование сильно изменен. Большая часть выположенной территории занята сельскохозяйственными угодьями или заболочена. На сегодняшний момент преобладающим типом сельскохозяйственного использования почвенных ресурсов исследуемой территории является земледелие – в Ханкайском районе пашня занимает 22% от общей площади, в Спасском – 19, Хорольском – 47, Черниговском – 18%. На юге Дальнего Востока сконцентрировано производство сои, а вокруг озера Ханка есть рисоводство и еще более интенсивное овощеводство, которое требует больших мелиоративных работ [Национальный..., 2011].

В связи с активным сельскохозяйственным использованием бассейна озера Ханка, применением токсичных пестицидов, сбросом сточных вод в реки, а также с атмосферными осадками, загрязненными техногенными выбросами, в почвах, поверхностных водах и донных осадках накапливаются тяжелые металлы и радионуклиды [Доклад об экологической..., 2021]. Большая часть территории, прилегающей к озеру Ханка, относится к биосферному заповеднику «Ханкайский» (см. рис. 1). В связи с этим мониторинг состояния окружающей среды, в том числе радиологические исследования и исследования геохимической изменчивости этой территории, является неотъемлемой частью ее сохранения.

Объектами исследования являлись почвы территорий, прилегающих к оз. Ханка, разной степени удаленности от берегов озера (от 0,5 до 22 км), донные осадки южной части озера, а также донные осадки реки Спасовка в 5 км от устья.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Местом отбора почвенных проб были выбраны выположенные и залесенные участки, прилегающие к оз. Ханка с западной (см. рис. 1, точки П-1–П-5), южной (см. рис. 1, П-6) и восточной (см. рис. 1, П-7) сторон. Отбор почвенных образцов проводился на референсных участках, на сегодняшний день не используемых в сельскохозяйственных целях. Керны отбирались под молодым лесом. В процессе отбора идентифицировался старопашотный горизонт. По глубине его нахождения, а также по возрасту леса можно предположить, что данные участки активно использовались в сельскохозяйственных целях более 60 лет назад, до начала глобальных выпадений. Отбор почвенных кернов проводился с помощью металлического профиля 5×6 см. Керны были разрезаны с шагом 1 см и упакованы в транспортировочные пакеты. После доставки в лабораторию, пробы были просушены (100°C), перетерты и просеяны через сито 1 мм. Крупнозем (>1 мм), часто встречающийся на глубине 15–20 см (образцы П-3, П-4, П-5), извлекался из образцов и не участвовал во взвешивании и последующих анализах. Отобранные образцы почв характеризуются различным гранулометрическим составом от супеси до глины в зависимости от глубины.

Отбор проб донных осадков проводился в 2021 г. в южной (О-3) и юго-восточной частях озера Ханка (О-1, О-2, О-4), а также в реке Спасовке (О-5) (см. рис. 1). Образцы отбирались с помощью модифицированного пробоотборника Nesie [Грабенко, 2022] с глубины 3–4 м. Полученные керны разрезались с шагом 0,5 или 1 см, а затем пробы были просушены и перетерты.

В результате полевых работ отобрано семь кернов почв и пять кернов донных осадков, четыре из которых из оз. Ханка и один из р. Спасовки (см. рис. 1). Суммарно было проанализировано 182 почвенные пробы и 120 проб донных осадков.

Содержание гамма-излучающих радионуклидов определяли на гамма-спектрометре ORTEC GEM-C5060P4-B, оснащенный полупроводниковым детектором из высокочистого германия (HPGe) с Ве окном и относительной эффективностью 20%. Исследовано содержание следующих природных и техногенных радионуклидов: ^{137}Cs (661 кэВ), ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K (1460 кэВ). Удельная активность ^{238}U оценивалась по двум линиям, принадлежащим ^{226}Ra (186 кэВ) и его дочернему ^{214}Bi (609 кэВ). Удельная активность ^{232}Th оценивалась по дочерним ^{228}Ac (911,2 кэВ) и ^{212}Pb (238,6 кэВ). Масса образцов варьировала от 1,2 до 12 г. Время измерения составляло не менее 60 000 с. Систематические погрешности включают ошибки отбора проб (3%), пробоподготовки (2%) и аналитических измерений (2%) и в сумме не превышают 8%.

Датирование скорости осадконакопления в озере проводилось с помощью ^{137}Cs , который давно применяется для оценки скоростей отложения наносов в водоемах [Putyrskaya et al., 2020; Semertzidou et al., 2019; Rose et al., 2011]. Пик глобальных выпадений ^{137}Cs приходится на 1963 г. Чернобыльские выпадения, а также авария на Фукусиме не оказали влияния на территорию исследования.

Количественный минеральный анализ отобранных для исследования осадков проведен методом полнопрофильного рентгенодифракционного анализа порошковых препаратов на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE с использованием программы поиска EVA с банком порошковых данных PDF-2. Рентгенограммы образцов записаны в диапазоне углов $203\text{--}85^\circ$ с шагом $0,02^\circ$ при счете в точке 0,6 с.

Для определения содержания органического вещества пробы были прокалены при температуре 600°C в течении четырех часов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с Атласом почв Российской Федерации почвы территорий отбора образцов относятся к отделам текстурно-дифференцированных и глеевых почв и принадлежат типам дерново-подзолистых, дерново-подзолисто-глеевых и темногумусово-глеевых по классификации и диагностике почв РФ (аналогом последних частично являются луговые почвы по «Классификации и диагностике почв СССР») [Национальный..., 2011]. Однако анализ свойств исследованных почвенных разрезов показывает лишь частичное соответствие характеристик реальных профилей с картой почвенного покрова Атласа. На данный момент не существует более детальных карт почвенного покрова территорий, прилегающих к оз. Ханка, поэтому такие несоответствия не удивительны ввиду локальных особенностей микро- и мезорельефа, а также состава растительности и антропогенных факторов. Предлагается отнести разрез П-1 к дерново-подзолистым глееватым почвам в силу явных признаков оглеения во влажном состоянии, каких не обнаружено в остальных случаях. Разрезы П-2–П-6 отнесены к дерново-подзолистым почвам без конкретных указаний подтипов.

Почвенный керн П-1 расположен недалеко от поселка Турий Рог, под лесными насаждениями (см. рис. 1). Позиция в рельефе определяется как водораздельная, ненарушенная, под молодым дубовым лесом в зоне холмисто-увалистого и мелкоопочного рельефа. Отличительной особенностью данного разреза являются сизые и охристые пятна и железисто-марганцевые примазки по всему профилю, на-

чиная от 8 см, что говорит об активно проходящих окислительно-восстановительных процессах. Наличие признаков смыва или выдувания не идентифицируется. Плотность горизонтов почв варьирует от 0,4 в верхних горизонтах до $1,8\text{ г/см}^3$ в средней части керна. Точки отбора проб П-2–П-4 располагаются также на западном берегу озера под молодым лесом на водораздельной поверхности. Почвы имеют более развитые гумусовые горизонты (до 17 см) и хорошо выраженный переход к элювиальному горизонту. Профиль П-4 отличается мощным темно-гумусовым горизонтом со слабой и средней степенью разложенности органических остатков. Также у профилей П-2–П-4 высокая плотность в нижних частях профиля, по сравнению с П-1, и широкая амплитуда колебаний плотности от верхних горизонтов к нижним ($0,3\text{--}2,3\text{ г/см}^3 \pm 0,3\text{--}0,5$), что указывает на более ярко выраженную текстурную дифференциацию профиля.

В третью группу разрезов, расположенных на юго-западе (П-5), юге (П-6) и востоке (П-7) от оз. Ханка, попали почвы, наиболее отличающиеся по мощности гумусового горизонта, выраженности процессов элювиально-иллювиальной дифференциации, оструктуренности горизонтов и гранулометрическому составу. Точки отбора располагаются на озерной террасе. Позиция в рельефе – низменная аккумулятивная равнина. Плотность горизонтов этих почв в среднем составила $1,0 \pm 0,3\text{ г/см}^3$. Для более полной характеристики почвенных образцов был проведен минералогический анализ разрезов П-5, П-6 и П-7. В фазовом составе всех проб в основном выделяются рефлексы с повышенной интенсивностью кварца и группы широко распространенных алюмосиликатов, полевых шпатов типа альбита ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$), анортита ($\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$), с вероятным содержанием примесей К и Са. Во всех пробах с увеличением глубины разреза соотношение интенсивности соответствующих гало изменяется, что, вероятно, связано с изменением природных условий, играющих основную роль в процессе переноса и концентрирования компонентов. Одним из продуктов изменения полевых шпатов является смешанный минерал разряда слюда-сметит ректорит $(\text{Na,Ca})\text{Al}_4(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$, идентифицированный в верхних слоях пробы П-7. В верхних слоях пробы П-6 была идентифицирована фаза анортклаза и дисордерида $((\text{Na,K})[(\text{AlSi}_3)\text{O}_8])$, относящихся к щелочным полевым шпатам и занимающих промежуточное положение между санидином и альбитом, что свидетельствует о насыщенности почвы натрием и преобладанием окиси натрия (Na_2O). При переходе к более глубоким слоям данная фаза полностью переходит в альбит. В отличие от других образцов, во всем профиле почвы П-5 был обнаружен

калиевый полевой шпат, ортоклаз ($K(AlSi_3O_8)$), что свидетельствует о повышенной кислотности данной почвы. Отличительной особенностью разрезов П-6 и П-7 является наличие в верхних слоях нехарактерных фаз гипса ($CaSO_4$) и кальциевого лангбейнита ($K_2Ca_2(SO_4)_3$), что вероятно связано с использованием соляных сульфатных минеральных удобрений на обширных сельскохозяйственных угодьях данной местности. Начиная с горизонта 5–6 см данная фаза не была обнаружена вследствие разложения данных соединений под действием естественных факторов.

Для донных осадков озера Ханка характерно разделение на слои из светло-коричневого песка (0–2 см), темно-серой глины (2–13 см), темной глины (13–14 см), крупнозернистого песка с инородными включениями (14–16 см) и глины с железо-оксидными новообразованиями (16–25 см). Для пробы О-1 (рис. 2А) характерно повышенное содержание илстой фракции в нижних горизонтах. Установлено, что плотность осадка по вертикали увеличивается при переходе к более глубоким горизонтам, что указывает на повышение скорости осадконакопления в последние десятилетия ввиду подъема уровня воды в ходе увеличения среднемноголетнего количества осадков, сопровождающегося расширением заболоченной области, прилегающей к озеру. Доля органической составляющей, установленной в процессе отжига, составила 2–3 и 4% для донных осадков и почвы соответственно. Керна речных наносов (О-5) отличает высокое содержание (5%) органики. Керна был отобран из центральной части русла реки, с глубины 2,3 м (см. рис. 2В). Главным фазовым компонентом осадка является кварц, составляющий основу песков. Выявлены также группы широко распространенных алюмосиликатов, полевых шпатов магматического происхождения – альбит ($Na[AlSi_3O_8]$), анортит ($Ca[Al_2Si_2O_8]$). С увеличением глубины интенсивность соответствующих пиков меняется, что, скорее всего, связано с изменениями природных условий. Наличие в водоеме большого количества разнообразных пресноводных двустворчатых и других моллюсков, а также повышенное содержание бикарбонатов приводит к образованию полиморфов карбоната кальция – кальцита и арагонита. Установлено присутствие необычной для данного района ферри-санидиновой фазы ($KNa[FeSi_3O_8]$) с возможными примесями Al, Ti, Mg. Ее образование может быть связано с водной миграцией техногенного железа, вовлеченного в последующие биогенные процессы.

Распределение искусственного ^{137}Cs в почвах под естественными угодьями на территории исследования достаточно равномерно. Самая высокая удельная активность ^{137}Cs была обнаружена в почвенных кернах П-3 и П-5 в первых 5 см профиля и составила от 42 до 47 Бк/кг соответственно. Средние зна-

чения содержания радиоцезия в 30-сантиметровой толщине почв всех точек варьировали от $11,1 \pm 9,7$ до $5,6 \pm 7,2$ Бк/кг. При этом плотность загрязнения низкая и не превышала 150 Бк/м² для всех исследованных профилей. Это указывает на отсутствие здесь влияния каких-либо радиационных катастроф. После разового попадания искусственного цезия в окружающую среду, его миграция в ландшафте происходит с минеральными частицами, т. к. ^{137}Cs фиксируется межпакетным пространством глинистых минералов [Bolca et al., 2007; Corbett, Walsh, 2015]. Это затрудняет миграцию радионуклида вниз по профилю почв и уменьшает его биодоступность, поэтому ^{137}Cs в почвах преимущественно сконцентрирован в верхнем 5-сантиметровом слое.

Совершенно другая картина распределения в донных осадках. В среднем удельная активность ^{137}Cs в осадках на порядок ниже, чем в почвах вблизи водных объектов, с максимальным значением в точке О-3 $10,0 \pm 1$ Бк/кг на глубине 3 см. Также выделяется четкий пик глобальных выпадений на глубине 9 см для точки О-1 ($9,6 \pm 1$ Бк/кг), что связано с расположением точки (см. рис. 1) в той части акватории озера, куда впадает река Спасовка и где происходит более интенсивное поступление наносов с водосбора. Профильное распределение ^{137}Cs в донных осадках указывает на неравномерное накопление наносов в озере. Вероятно, в южной и центральной части исследованной акватории озера сток наносов происходит медленнее, чем в северо-восточной. Скорость осадконакопления для точки О-1 составляет примерно 1,6 мм/год, тогда как в южной (О-3) и центральной частях (О-2) около 0,8 мм/год [Kuzmenkova et al., 2023]. Профиль О-1 располагается в непосредственной близости от устья реки Спасовка, тогда как точки О-2 и О-3 находятся дальше, и скорость осадконакопления здесь ниже. Для точки О-4, самой дальней от берегов озера, максимальное содержание изотопа цезия отмечено в верхнем горизонте, то есть скорость осадконакопления здесь минимальна.

Удельная активность ^{40}K в почвенных профилях указывает на высокое его содержание в почвах (от 304 ± 60 до 741 ± 156 Бк/кг), особенно в нижних слоях. В кернах П-5 наблюдается повышенное содержание ^{40}K относительно других точек отбора. Вероятно, когда-то здесь проводились сельскохозяйственные мероприятия, включающие внесение минеральных и органических удобрений, которые повлияли на содержание этого радионуклида в почве [Bolca et al., 2007; Ugolini et al., 2020; Alsaffar et al., 2015]. В случае с донными осадками распределение радиоактивного калия вниз по профилю кернов более равномерное и в среднем содержание ^{40}K лежит в интервале от 408 ± 50 до 496 ± 117 Бк/кг.

Равномерное распределение ^{40}K вниз по профилю донных осадков говорит о высокой степени его подвижности в окружающей среде и присутствии преимущественно в растворенной форме.

Источником таких природных радионуклидов как ^{238}U и ^{232}Th являются горные породы. В результате выветривания горных пород эти радионуклиды мигрируют в почвы, сформированные на этих породах. Распределение ^{232}Th и ^{238}U для всех почвенных профилей достаточно равномерное и лежит в среднем в интервале от 46 ± 11 до 94 ± 13 Бк/кг и от 25 ± 6 до 41 ± 11 Бк/кг для тория и урана соответственно. Обедненным по урану оказался почвенный разрез П-4, расположенный недалеко от западного побережья озера. Эта местность характеризуется возвышенным участком рельефа относительно других

прилегающих к озеру территорий из-за Пограничного хребта, а почвы обладают высокой степенью каменистости, начиная с глубины 13 см. Самое высокое содержание этих радионуклидов наблюдается в разрезе П-6 – самой южной из исследованных точек. Обеднение может быть связано как с интенсивной миграцией, так и с эрозией, а также с обеднением почвообразующих пород. Для уточнения условий миграции урана необходимо провести дополнительные исследования.

Картины распределения ^{238}U и ^{232}Th в донных осадках озера и реки получились схожими между собой. Однако амплитуды колебаний у тория вниз по профилю больше до двух раз относительно урана: если у первого она составила от 10 ± 9 до 87 ± 7 Бк/кг, то у второго от 10 ± 1 до 45 ± 4 Бк/кг.

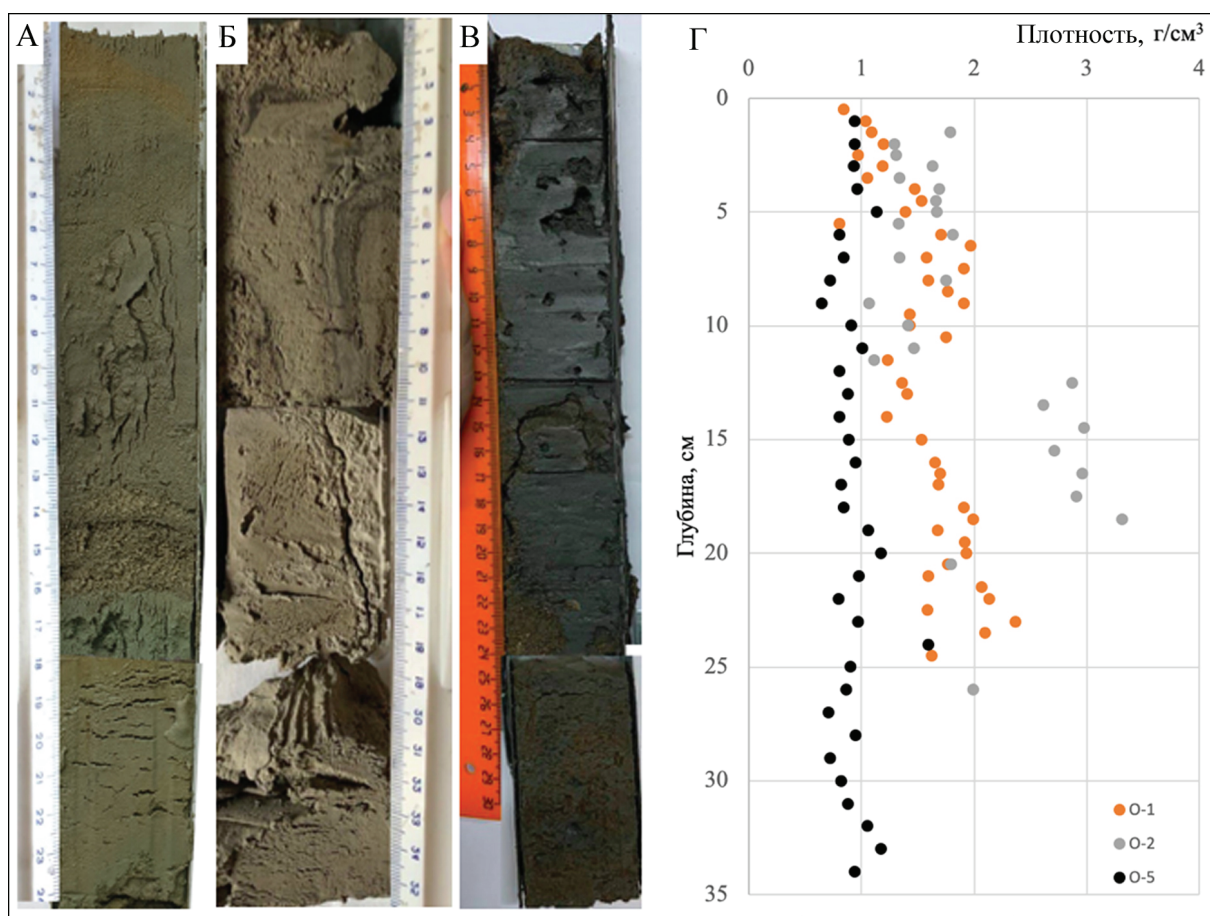


Рис. 2. Керны донных осадков оз. Ханка точек О-1 (А), О-2 (Б) и р. Спасовки О-5 (В) и график плотности их горизонтов (Г)

Fig. 2. Cores of bottom sediments of the Khanka lake O-1 (A), O-2 (Б) and Spasovka river O-5 (В) and a graph of the density of their horizons (Г)

С целью анализа миграционной подвижности изучаемых радионуклидов было проведено сравнение их запасов по профилю почва–река–озеро (рис. 3).

Установлена высокая подвижность ^{40}K и вынос этого радионуклида как вниз по профилю почв, так и со стоком наносов в оз. Ханка, на что указывает

меньшее содержание этого радионуклида в речных донных осадках (от $0,16 \pm 0,05$ до $1,8 \pm 0,04$ кБк/м²) и в почвах (от $0,1 \pm 0,03$ до $10,9 \pm 0,4$ кБк/м²) приближенных к реке территорий, по сравнению с донными осадками озера (см. рис. 3А). При этом распределение запасов калия в речных осадках равномерное

с небольшим повышением содержания в верхнем 5-сантиметровом слое. Несмотря на обнаруженное неоднородное распределение запасов ^{40}K в донных осадках Ханки, озеро является основным местом его аккумуляции (от $10,4 \pm 0,4$ до $17,7 \pm 0,70$ кБк/м² в

верхних 10 см керна и до $19,6 \pm 0,80$ кБк/м² на глубине 20 см). Минимальное содержание ^{40}K обнаружено на глубине 15 см – $6,4 \pm 0,26$ кБк/м². Очевидно, что происходит интенсивный вынос этого радионуклида с сельскохозяйственных угодий в озеро Ханка.

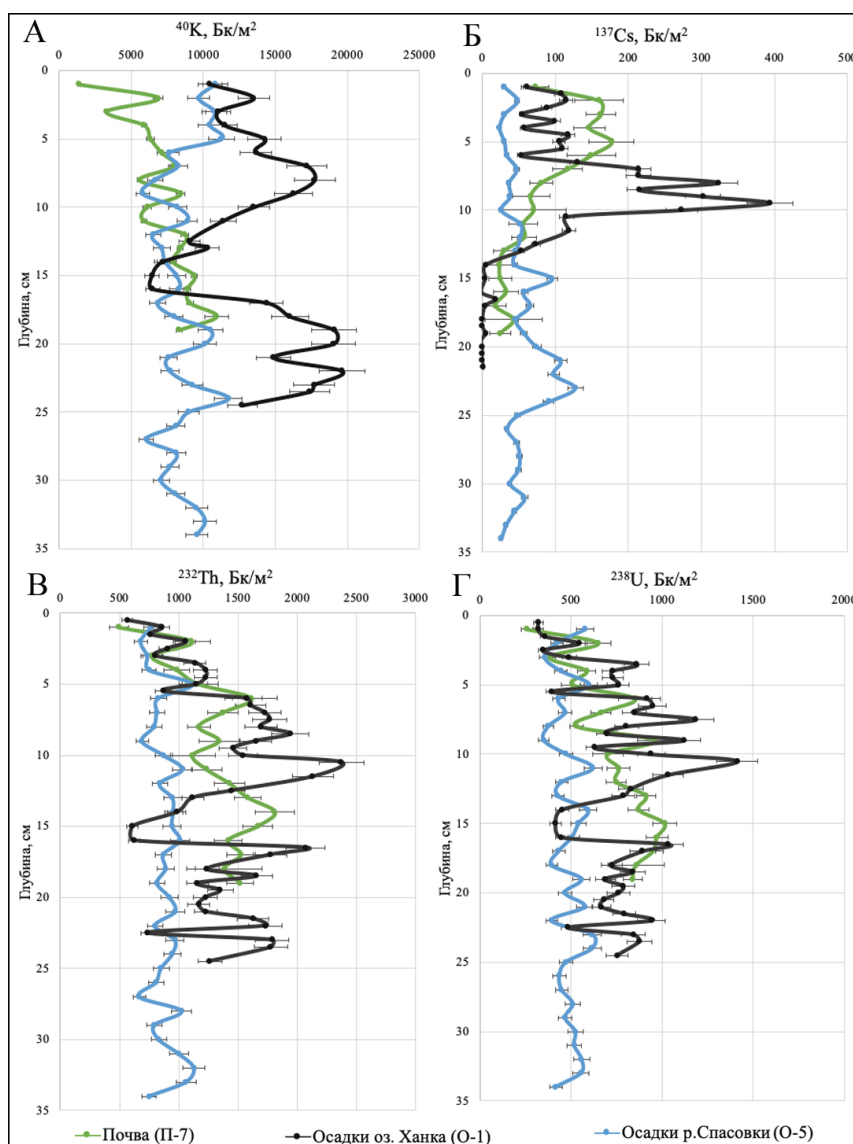


Рис. 3. Внутривертикальное распределение запасов ^{40}K (А), ^{137}Cs (Б), ^{232}Th (В) и ^{238}U (Г) в почве и донных осадках р. Спассовки и оз. Ханка

Fig. 3. Intra-profile distribution of stocks ^{40}K (A), ^{137}Cs (B), ^{232}Th (B) и ^{238}U (Г) in soils and bottom sediments of the Khanka lake and Spasovka river

Для ^{137}Cs установлена слабая степень миграции, на что указывает неравномерное распределение запасов радионуклида в профиле почв и донных осадков озера (см. рис. 3Б). Для почв характерно максимальное накопление радиоцезия в верхних горизонтах около 200 Бк/м² на глубине 3–5 см. Для донных осадков озера эти же значения наблюдаются на глубине 10 см, однако, за пределами этого пика содержание радиоцезия в осадках находится на уровне 300–400 Бк/м². Попадая в воды реки, радио-

цезий выносится с током воды в озеро, о чем говорит равномерное распределение его в донных осадках р. Спассовки. Сравнение их суммарных запасов между собой показало увеличение примерно в два раза в озере ($3,43$ кБк/м²) по сравнению с почвой ($1,51$ кБк/м²). Это указывает на сильный вынос цезия из почвы в озеро в результате эрозионных процессов. Полученные данные ниже, чем результаты китайских исследователей, которые оценивают общие запасы ^{137}Cs в донных осадках озера Ханка как

4,6 кБк/м² [Zhang et al., 2022]. Китайскими коллегами установлено, что более 46% цезия поступило в озеро с речным стоком, что указывает на сильную почвенную эрозию с водосбора в последние десятилетия. Также это связывается с созданием озерной фермы на озере Малая Ханка. В 1955 г. была построена ферма озера Синкай, которая ускорила эрозию почвы, превратив водно-болотные угодья в пахотные земли [Zhang et al., 2022], что могло привести к значительному увеличению скорости осадконакопления в период с 1952 по 1964 г. На более активное использование земли со стороны китайской части озера указывают также рассчитанные скорости осадконакопления. Для территории исследования они составляют в среднем 0,08–0,15 см/год, тогда как на китайской стороне – 0,42–0,63 см/год.

Значимый перенос естественных ²³²Th и ²³⁸U со стоком речных наносов не обнаружен (см. рис. 3В, Г). Это указывает на то, что миграции естественных радионуклидов со стоком наносов не происходит.

ВЫВОДЫ

Распределение радионуклидов по профилям почв и донных осадков указывает на однородные условия миграции естественных радионуклидов, обусловленные их содержанием в почвообразующих породах. Фазовый состав всех почвенных кернов в основном представлен пороодообразующими минералами большинства магматических и метаморфических пород.

Удельная активность ¹³⁷Cs определила территорию как незагрязненную радионуклидами. Здесь отсутствует влияние каких-либо радиационных катастроф, а уровень цезия определяет только глобальные выпадения. Средние значения содержания радиоцезия в 30-сантиметровой тол-

ще почв всех точек варьировали от 11,1±9,7 до 5,6±7,2 Бк/кг. При этом плотность загрязнения низкая и не превышала 150 Бк/м² для всех исследованных профилей.

Установлены фоновые уровни ¹³⁷Cs и естественных радионуклидов для почв региона. ¹³⁷Cs – 18–177 Бк/м²; ²³⁸U и ²³²Th – 500–1800 Бк/м²; ⁴⁰K – 1300–11000 Бк/м² соответственно.

Степень вертикальной миграции ¹³⁷Cs очень низкая вследствие преимущественно тяжелого гранулометрического состава почв и наличия геохимических барьеров. Распределение естественных радионуклидов ²³⁸U и ²³²Th в почвах и донных осадках равномерное, источником являются горные породы, а не речные наносы.

Обнаружено интенсивное вымывание ⁴⁰K с водосбора озера Ханка. Этот радионуклид входит в состав калийных удобрений, на что указывает его меньшее содержание в речных донных осадках (от 0,16±0,05 до 1,8±0,04 кБк/м²) и в почвах (от 0,1±0,03 до 10,9±0,4 кБк/м²) приближенных к реке территорий по сравнению с донными осадками озера (от 10,4±0,4 до 17,7±0,70 кБк/м² в верхних 10 см керна и до 19,6±0,80 кБк/м² на глубине 20 см). Установлено также активное использование в прошлом сульфатных удобрений на сельскохозяйственных территориях вокруг озера.

Установлено наличие аккумуляции цезийсодержащих наносов в акватории озера, следовательно, в бассейне существуют участки пашни или незакрепленные растительностью отложения, способные поставлять наносы в озеро Ханка в результате действия водной и ветровой эрозии. Выявление их пространственного расположения и объемов выноса материала может являться целью дальнейших исследований.

Благодарности. Работа выполнена в рамках гранта РНФ 21-43-00025. Авторы выражают благодарность канд. хим. наук А.М. Егорину и канд. геогр. наук Е.А. Грабенко за помощь в отборе образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Грабенко Е.А., Букин И.О., Кузьменкова Н.В. Модернизация озерного бура для отбора ненарушенных морских и озерных отложений различного состава // Геология, география и глобальная энергия. 2022. Т. 4. № 87. С. 122–130. DOI: 10.54398/20776322_2022_4_122.
- Доклад об экологической ситуации в Приморском крае в 2020 году. Правительство Приморского края. Владивосток: 2021. 268 с.
- Иванова И.Н., Антонина А.В., Кислицына Л.В. Химическое загрязнение почв Приморского края как фактор риска для здоровья населения // Санитарный врач. 2022. № 9. DOI: 10.33920/med-08-2209-07.
- Катайкина О.И., Матвеев В.И. Оценка степени загрязнения поверхностных вод рек южного приморья и озера Ханка по гидрохимическим показателям. Актуальные вопросы пресноводной аквакультуры: сб. науч. тр. Астрахань, 2022. № 93. С. 193–202.
- Клышевская С.В. Экологическое состояние почв Приханкайской низменности. Геосистемы северо-восточной Азии: особенности их пространственно-временных структур, районирование территории и акватории. Владивосток: Тихоокеан. ин-т геогр. ДВО РАН, 2019. С. 228–231.
- Коженкова С.И., Юрченко С.Г. Биогенные элементы в воде озера Ханка // Геосистемы Северо-Восточной Азии. Владивосток, 2022. С. 232–236.
- Национальный атлас почв Российской Федерации / под ред. С.А. Шобы. М.: Астрель; АСТ, 2011. 632 с.

- Павлюткин Б.И., Ханчук А.И. Новые данные о возрасте озера Ханка, Дальний Восток России // Доклады РАН. 2002. Т. 382. № 6. С. 826–828.
- Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 342 с.
- Попова А.Ю., Качур А.Н. Современные проблемы природопользования бассейна озера Ханка (в связи с климатическими и гидрологическими изменениями) // География и геоэкология исследования на Дальнем Востоке. 2019. № 1. С. 96–106.
- Росликова В.И. Современные представления о подводном почвообразовании // Тихоокеанская геология. 2006. Т. 25. № 4. С. 97–103.
- Сойфер В.Н. Радиоэкология северного шельфа Японского моря. Владивосток: Дальнаука, 2002. 254 с.
- Худяков Г.И., Денисов Е.П., Короткий А.М. и др. Юг Дальнего Востока // История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука, 1972. 423 с.
- Alsaffar M.S., Suhaimi Jaafar M., Ahmad Kabir N. et al. Impact of fertilizers on the uptake of ^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K by pot-grown rice plants, *Pollution*, 2016, vol. 2, iss. 1, p. 1–10, DOI: 10.7508/PJ.2016.01.001.
- Baklanov P.Ya., Kachur A.N., Ermoshin V.V. et al. Current Geo-Ecological Problems Within the Lake Khanka Drainage Basin, *Geog. Nat. Resour.*, 2019, no. 4, p. 325–334.
- Bolca M., Sac M.M., Cokuyul B. et al. Radioactivity in soils and various foodstuffs from the Gediz River Basin of Turkey, *Radiat. Meas.*, 2007, vol. 42, iss. 2, p. 263–270, DOI: 10.1016/j.radmeas.2006.12.001.
- Corbett D.R., Walsh J.P. 210 Lead and 137 Cesium: establishing a chronology for the last century, *Handbook of sea-level research*, Wiley, 2015, p. 361–372, DOI: 10.1002/9781118452547.
- Kiku P.F. Environmental and Hygiene Health Problems in Primorye, *Achievements in the Life Sci.*, 2014, vol. 8, no. 1, p. 16–22, DOI: 10.1016/j.als.2014.06.008.
- Kuzmenkova N.V., Rozhkova A.K., Egorin A. et al. Analysis of sedimentation processes in Lake Khanka (Xingkaihu) and Amur Bay using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ tracers, *J. Radio-analyt. Nuclear Chem.*, 2023, no. 332, p. 959–971.
- Mikhailovskaya L.N., Molchanova I.V., Pozolotina V.N. et al. Radioactive contamination of the soil-plant cover at certain locations of Primorsky Krai, Sakhalin Island and Kamchatka Peninsula: Assessment of the Fukushima fallout, *J. of Environ. Radioactiv.*, 2017, vol. 172, p. 1–9, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.02.006.
- Putyrskaya V., Klemt E., Röllin S. et al. Dating of recent sediments from Lago Maggiore and Lago di Lugano (Switzerland/Italy) using ^{137}Cs and ^{210}Pb , *J. Environ. Radioact.*, 2020, vol. 212, 106135, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2019.106135.
- Rose N.L. Sediment accumulation rates in European lakes since AD 1850: trends reference conditions and exceedance, *J. Paleolimnol.*, 2011, vol. 45, iss. 4, p. 447–468, DOI: 10.1007/s10933-010-9424-6.
- Semertzidou P., Piliposian G.T., Chiverrell R.C. et al. Long-term stability of records of fallout radionuclides in the sediments of Brotherswater, *J. Paleolimnol.*, 2019, vol. 61, iss. 2, p. 231–249, DOI: 10.1007/s10933-018-0055-7.
- Ugolini R.C.E., Trotti F. Use of Fertilizers in Agriculture: Individual Effective Dose Estimate, *Environments*, 2020, vol. 7, iss. 1, no. 7, DOI: 10.3390/environments7010007.
- Xiangan J. Lake Xingkai/Khanka. Experience and Lessons Learned brief (Lake Basin Management Initiative), 2005, 2010, p. 447–459.
- Zhang S., Yang G., Zheng J. et al. Global fallout Pu isotopes, ^{137}Cs and ^{237}Np records in the sediments of Lake Xingkai and their response to environmental changes in the catchment, *Catena*, 2022, vol. 215, 106276, DOI: 10.1016/j.catena.2022.106276.

Поступила в редакцию 27.06.2023

После доработки 23.10.2023

Принята к публикации 04.12.2023

NATURAL RADIONUCLIDES AND CESIUM-137 IN SOILS AND BOTTOM SEDIMENTS OF THE KHANKA LAKE

K.V. Savelieva¹, D. Dzheng², A.K. Rozhkova³, D.H. Shlyk⁴, E.A. Tokar⁵, T.A. Vorobieva⁶,
N.V. Kuzmenkova⁷

^{1–3, 6, 7} Lomonosov Moscow State University

^{4, 5} Institute of Chemistry Far Eastern Branch RAS, Laboratory of X-Ray analysis

¹ Soil Science Faculty, Department of Radioecology and Ecotoxicology, Master Student; e-mail: universe2910.67@gmail.com

² Faculty of Chemistry, Department of Radiochemistry, Master Student; e-mail: zhengzhaogang98@gmail.com

³ Faculty of Chemistry, Department of Radiochemistry, Ph.D. in Chemistry; e-mail: aleksandra.rozhkova@chemistry.msu.ru

⁴ Ph.D. in Chemistry; e-mail: daria79@list.ru

⁵ Ph.D. in Chemistry; e-mail: d.edd@mail.ru

⁶ Faculty of Geography, Department of Nature Management, Associate Professor;

Ph.D. in Geography; e-mail: tvorobyova@yandex.ru

⁷ Faculty of Chemistry, Department of Radiochemistry, Leading Scientific Researcher;

Ph.D. in Geography; e-mail: kuzmenkovav@my.msu.ru

The paper describes the radionuclide composition of soils of the territories around the Khanka Lake and the bottom sediments of the lake and the Spasovka River flowing into the Khanka Lake. The questions of distribution and spatial variability of natural (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) and artificial (^{137}Cs) radionuclides are discussed. Recently the economic activities in the lake basin have acquired particular importance, as the territory fell under the state program "Far Eastern hectare". So the article emphasizes the importance of studying geo-ecological problems and pollution of the natural environment, as well as the need to take measures to address them. The paper provides a detailed characteristic of soil composition and properties in the vicinity of the Khanka Lake and identifies the conditions of the radial migration of radionuclides. Plains with excessive moisturing and water-retaining horizon are favorable for peat formation (peat horizon can reach 50 cm), which promotes radionuclide migration to deeper horizons. Clay sod-podzolic and podzolic-brown soils of clayey and loamy granulometric composition are formed on higher elevation territories, which on the contrary prevents the migration of radionuclides down the profile. The average content of organic components in soils was found to be 4%. The mineralogical composition of some samples demonstrates the presence of potassium and sodium feldspars, accompanied by calcium langbeinite gypsum phases in the upper layers, indicating the use of salt sulfate mineral fertilizers. The proportion of organic matter in bottom sediments was 2–3%. Background levels of radionuclides in the vicinity of the lake are 18–177 Bq/m² for ^{137}Cs ; 500–1800 Bq/m² for ^{238}U и ^{232}Th ; 1300–11000 Bq/m² for ^{40}K . There are no signs of the influence of radiation catastrophes on the study area. Intensive leaching of ^{40}K from the lake catchment by river runoff was detected. The lowest content of ^{40}K stocks was found in soils and river bottom sediments (up to 1–10 kBq/m²) and the highest in lake sediments (8–20 kBq/m²).

Keywords: specific activity, migration conditions

Acknowledgments. The research was financially supported by the Russian Science Foundation (project 21-43-00025). The authors are grateful to A.M. Egorin, Ph.D. in Chemistry, and E.A. Grabenko, Ph.D. in Geography, for their assistance in sampling.

REFERENCES

- Alsaffar M.S., Suhaimi Jaafar M., Ahmad Kabir N., Nisar A. Impact of fertilizers on the uptake of ^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K by pot-grown rice plants, *Pollution*, 2016, vol. 2, iss. 1, p. 1–10, DOI: 10.7508/PJ.2016.01.001.
- Baklanov P.Ya., Kachur A.N., Ermoshin V.V. et al. Current Geo-Ecological Problems Within the Lake Khanka Drainage Basin, *Geog. Nat. Resour.*, 2019, no. 4, p. 325–334.
- Bolca M., Sac M.M., Cokuysal B. et al. Radioactivity in soils and various foodstuffs from the Gediz River Basin of Turkey, *Radiat. meas.*, 2007, vol. 42, iss. 2, p. 263–270, DOI: 10.1016/j.radmeas.2006.12.001.
- Corbett D.R., Walsh J.P. *210 Lead and 137 Cesium: establishing a chronology for the last century*, Handbook of sea-level research, 2015, p. 361–372, DOI: 10.1002/9781118452547.
- Doklad ob ekologicheskoi situatsii v Primorskom krae v 2020 godu* [Report on the state of the environment in Primorsky Krai in 2020], Pravitel'stvo Primorskogo kraya, Vladivostok, 2021, 268 p. (In Russian)
- Grabenko E.A., Bukin I.O., Kuz'menkova N.V. Modernizatsiya ozernogo bura dlya otbora nenarushennykh morskikh i ozernykh otlozhenii razlichnogo sostava [Lake drill modernization for sampling the undisturbed marine and lake sediment with different composition], *Geologiya, geografiya i global'naya energiya*, 2022, vol. 4, no. 87, p. 122–130, DOI: 10.54398/20776322_2022_4_122. (In Russian)
- Ivanova I.N., Antonina A.V., Kislytsyna L.V. Khimicheskoe zagryaznenie pochv Primorskogo kraya kak faktor riska dlya zdorov'ya naseleniya [Chemical pollution of soils in Primorsky Krai as a risk factor to population health], *Sanitarnyi vrach*, 2022, no. 9, DOI: 10.33920/med-08-2209-07. (In Russian)
- Kataikina O.I., Matveev V.I. [Evaluation of pollution of surface water of rivers in Southern Primorie and the Khanka Lake using the hydrochemical parameters], *Aktual'nye voprosy presnovodnoi akvakul'tury*, sb. nauch. tr. [Actual issues of fresh-water aquaculture], Astrakhan', 2022, no. 93, p. 193–202. (In Russian)
- Khudyakov G.I., Denisov E.P., Korotkii A.M. et al. *Yug Dal'nego Vostoka, Istoriya razvitiya rel'efa Sibiri i Dal'nego Vostoka* [South of the Far East, History of relief evolution in Siberia and the Far East], Moscow, Nauka Publ., 1972, 423 p. (In Russian)
- Kiku P.F. Environmental and Hygiene Health Problems in Primorye, *Achievements in the Life Sci.*, 2014, vol. 8, no. 1, p. 16–22, DOI: 10.1016/j.als.2014.06.008.
- Klyshevskaya S.V. [Ecological status of soils of the Khanka Lake lowlands], *Geosistemy severo-vostochnoi Azii: osobennosti ikh prostranstvenno-vremennykh struktur, raionirovanie territorii i akvatorii* [Geosystems of North-Eastern Asia: the peculiarities of their spatial temporal structures, zoning of land and waters], 2019, p. 228–231. (In Russian)
- Kozhenkova S.I., Yurchenko S.G. [Biogenic elements in water of the Khanka Lake], *Geosistemy Severo-Vostochnoi Azii* [Geosystems of North-Eastern Asia], Vladivostok, 21–22 aprelya 2022 goda, 2022, p. 232–236. (In Russian)
- Kuzmenkova N.V., Rozhkova A.K., Egorin A. et al. Analysis of sedimentation processes in Lake Khanka (Xingkaihu) and Amur Bay using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ tracers, *J. Radio-analyt. Nuclear Chem.*, 2023, no. 332, p. 959–971.
- Mikhailovskaya L.N., Molchanova I.V., Pozolotina V.N. et al. Radioactive contamination of the soil-plant cover at certain locations of Primorsky Krai, Sakhalin Island and Kamchatka Peninsula, Assessment of the Fukushima fallout, *J. of Environ. Radioactiv.*, 2017, vol. 172, p. 1–9, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.02.006.
- Natsional'nyi atlas pochv Rossiiskoi Federatsii* [National Soil Atlas of the Russian Federation], Shoba S.A. (ed.), Moscow, Astrel' Publ., 2011, 632 p. (In Russian)
- Pavljutkin B.I., Hanchuk A.I. Novye dannye o vozraste ozera Hanka, *Dal'nij Vostok Rossii* [New data about the

- age of the Khanka Lake], *Doklady akademii nauk*, 2002, iss. 382, no. 6, p. 826–828. (In Russian)
- Perel'man A.I. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry], Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975, 342 p.
- Popova A.U., Kachur A.N. Sovremennye problemy prirodopol'zovaniya bassejna ozera hanka (v svjazi s klimaticheskimi i gidrologicheskimi izmenenijami) [Actual problems of nature management in the Khanka Lake basin (in the context of climate and hydrology changes)], *Geograf. i geoekolog. issledovaniya na Dalnem Vostoke*, 2019, no. 1, p. 96–106.
- Putyrskaya V., Klemm E., Röhlén S. et al. Dating of recent sediments from Lago Maggiore and Lago di Lugano (Switzerland/Italy) using ^{137}Cs and ^{210}Pb , *J. Environ. Radioact.*, 2020, vol. 212, 106135, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2019.106135.
- Rose N.L. Sediment accumulation rates in European lakes since AD 1850: trends reference conditions and exceedance, *J. Paleolimnol.*, 2011, vol. 45, iss. 4, p. 447–468, DOI: 10.1007/s10933-010-9424-6.
- Roslikova V.I. Sovremennye predstavleniya o podvodnom pochvoobrazovanii [Modern ideas of subaquatic soil formation], *Tihookeanskaja geologija*, 2006, iss. 25, no. 4, p. 97–103. (In Russian)
- Semertzidou P., Piliposian G.T., Chiverrell R.C., Appleby P.G. Long-term stability of records of fallout radionuclides in the sediments of Brotherswater, *J. Paleolimnol.*, 2019, vol. 61, iss. 2, p. 231–249, DOI: 10.1007/s10933-018-0055-7.
- Soifer V.N. *Radioekologiya severnogo shel'fa Yaponskogo morya* [Radioecology of the northern shelf of the Japan Sea], Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2002, 254 p. (In Russian)
- Ugolini R.C.E., Trotti F. Use of Fertilizers in Agriculture, Individual Effective Dose Estimate, *Environments*, 2020, vol. 7, iss. 1, no. 7, DOI: 10.3390/environments7010007.
- Xiangcan J. *Lake Xingkai/Khanka. Experience and Lessons Learned brief* (Lake Basin Management Initiative), 2005, 2010, p. 447–459.
- Zhang S., Yang G., Zheng J. et al. Global fallout Pu isotopes, ^{137}Cs and ^{237}Np records in the sediments of Lake Xingkai and their response to environmental changes in the catchment, *Catena*, 2022, vol. 215: 106276, DOI: 10.1016/j.catena.2022.106276.

Received 27.06.2023

Revised 23.10.2023

Accepted 04.12.2023

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 911.3: 314.7

НОВЫЕ СЕЛЬСКИЕ ЖИТЕЛИ И ФОРМЫ ИХ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ В ВОСКРЕСЕНСКОМ ОКРУГЕ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

О.Д. Крутов¹, Н.К. Греля², А.А. Веприцкий³, Я.К. Куксин⁴, Г.А. Назаренко⁵, О.Е. Прусихин⁶,
П.А. Широкова⁷, Ю.Л. Крузе⁸, А.И. Алексеев⁹

^{1–7,9} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра экономической и социальной географии России

⁸ Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, факультет архитектуры и дизайна,
кафедра культурологии

¹ Магистрант; e-mail: bigoleg911@yandex.ru

² Аспирант; e-mail: ngrelya.mkrgo@mail.ru

³ Магистрант; e-mail: evgeni777.78@mail.ru

⁴ Студент; e-mail: yaza.kuksin@gmail.com

⁵ Студент; e-mail: nga-02@mail.ru

⁶ Магистрант; e-mail: olegprus2000@mail.ru

⁷ Магистр урбанистики; e-mail: polina.a.shirokova@gmail.com

⁸ Доцент, канд. юр. наук; e-mail: julia.kruze@tm-service.oao

⁹ Проф., д-р геогр. наук; e-mail: alival@mail.ru

В данной статье рассматривается влияние новых сельских жителей (выходцев из Нижнего Новгорода и Москвы) на полупериферийный округ Нечерноземья, трансформация его хозяйства и социума в связи с замещением населения. Также рассматриваются вопросы, связанные с территориальной неоднородностью влияния новых сельских жителей. Полигон исследования – Воскресенский округ Нижегородской области – находится в 145 км к северу от Нижнего Новгорода. Наличие уникальных природных и символических ресурсов (озера Светлояр и реки Ветлуги) привлекает сюда мигрантов из крупных городов. Методы исследования: глубинные и экспертные интервью, фокус-группы, включенное наблюдение и стратегические сессии с местными жителями. В результате анализа полученных данных была проведена типология новых сельских жителей, каждый тип по-разному воздействует на окружающее пространство. Далее выявлены ключевые трансформации образа жизни, связанные с ними, – новые нетрадиционные виды сельского хозяйства, формирование досуга городского типа, развитие сельского туризма силами приезжих, полное замещение населения в наиболее привлекательных для горожан населенных пунктах, появление объединений приезжих, как территориальных, так и сообществ по интересам. Также выявлены ключевые социальные конфликты в среде приезжих и между приезжими и коренными жителями, которые ограничивают возможности развития территории.

Ключевые слова: дезурбанизация, резидентальная стратификация, постсоветские трансформации, сельская местность

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.6

ВВЕДЕНИЕ

В постсоветской России в течение долгого периода преобладали миграции, направленные из сельской местности и малых городов в крупные города и миллионники [Между домом..., 2016]; их подавляющее влияние на систему расселения сохраняется и сейчас. Но параллельно действует и противоположная тенденция: переезд части горожан, пусть и несравнимо меньшей по объему, в сельскую местность. Согласно последним исследованиям геогра-

фов, пандемия COVID-19 «оказала значительное влияние на процессы обратной миграции и дезурбанизации, и “жизнь после города”, пожалуй, впервые приобрела зримые очертания» [Покровский и др., 2020]. Этот поток людей крайне неоднороден: он состоит из разнообразных участников этих сельско-городских перемещений, включая типичных «дауншифтеров», городских романтиков, предпринимателей, экологических мигрантов и т.д., в этой статье мы будем называть их новыми сельскими жителя-

ми – по меткому самоопределению одного из бывших горожан, опрошенных нами в Воскресенском округе Нижегородской области. В большинстве случаев новые сельские жители после переезда оказываются «на перепутье», образуя полужакрытое сообщество, отделенное от коренного населения иным мировоззрением («нас отличает образ жизни, любовь к глухим заборам и совершенный пиетет к институтам, что местные воспринимают с неодобрением»).

Одновременно принося с собой городские компетенции и привычки «вести дела», активные новые сельские жители становятся импульсом к развитию сельских территорий, участвуя в развитии сельской инфраструктуры и формировании местных сообществ, развивая нетипичными способами сельскохозяйственное производство и порой полностью замещая коренное население в отдельных населенных пунктах («тут, кроме нас, только два дома зимуют...»). Таким образом, эффекты от нахождения бывших горожан в сельской местности разнообразны и еще более диверсифицированы в зависимости от внутренней неоднородности группы новых сельских жителей.

Целью проведенного исследования стало обобщение информации о мотивациях и сфере деятельности, географии переезда и расселения новых сельских жителей на территории Воскресенского округа Нижегородской области, оценка характера и значимости их воздействия на нечерноземный полупериферийный округ.

Основным методом полевого исследования стали 35 глубинных интервью с представителями новых сельских жителей, местного сообщества и администрации Воскресенского округа в январе, феврале и июне 2023 г. Информационную базу исследования составили открытые статистические данные из БДМПО, а также информация, предоставленная администрацией Воскресенского округа. В качестве исследовательской стратегии использовалась модель «длинного стола» и включенного наблюдения в семьях новых сельских жителей, предложенная Т. Шаниным, адаптированная под вынужденную необходимость кратковременного проживания в отдельных селах.

Исследователи отмечают появление в 1970-х гг. новой стадии развития городских систем – дезурбанизации, связанной с обратной миграцией, переездом горожан в сельскую местность на постоянное место жительства [Berry, 1976]. Этот процесс не стоит путать с субурбанизацией, ростом пригородной зоны, поскольку, во-первых, он направлен в удаленные сельские районы, а во-вторых, сопровождается отрывом от городского образа жизни и переходом на сельскую модель взаимодействия

с пространством и распределения времени [Нефедова и др., 2015].

В СССР этот процесс был слабо представлен, однако отмечались некоторые точечные его проявления [Алексеев и др., 1979]. В России данный феномен был зафиксирован впервые в начале 1990-х гг., когда ухудшение социально-экономической ситуации вынудило часть горожан переехать в сельскую местность. Вместе с потоком возвратных мигрантов из республик бывшего Советского Союза это затормозило на некоторое время стягивание населения в города. В 2000-х гг. отток из глубинки вновь усилился, показав незавершенность урбанизации в России. Переселение в пригороды пока не достигло больших масштабов, в том числе из-за боязни горожан остаться без квартиры. Предпочтительной остается модель жизни на два дома: владение жильем в городе и сезонное пребывание на даче. Трудовые и рекреационные поездки определяют высокую степень пульсации населения в течение года, недели и суток [Нефедова и др., 2015].

В зависимости от удаленности и мотивов перемещения выделяют три типа дезурбанизации. Первый – «экс-урбанизация», которая направлена в ближайшую к городу зону, сопровождается сохранением тесных контактов с городом и нежеланием терять возможность пользования городскими благами. Второй – «подмена урбанизации», когда к переезду из города вынуждает ухудшение условий жизни, например повышение стоимости жилья, отсутствие работы и др. Третий – «антиурбанизация», ключевой характеристикой которой является сознательный отказ от городского комфорта. Именно этот тип дезурбанизации ассоциируется с дауншифтингом, представляющим собой альтернативный обществу потребления стиль жизни [Mitchell, 2004].

Термин «дауншифтинг» впервые ввел Дж. Селенти, руководитель Института по изучению трендов, расположенного в Нью-Йорке [Лисова, 2008]. Широко он стал использоваться в 1990-е гг. после публикации статьи С. Бан Бреатнах «Жизнь на пониженной передаче», описавшей принципы *simple living* – замедленного темпа жизни [Ильин, 2016].

В современной научной литературе тема дауншифтинга, в отличие от противоположного процесса – переезда из села в город, изучается не столь активно [Виноградская, 2019]. Наиболее подробно изучены причины, по которым горожане решаются на обратную миграцию. Д. Черир считал, что дауншифтинг вызван страхом перед экологическими проблемами и попыткой сбежать от них в безопасное место, которым может стать существующая деревня или новые форматы проживания, такие как экопоселения [Задорин и др., 2014]. Д. Элджин видел мотивом кардинальной смены привычного

образа жизни отказ от материализма и переориентацию на духовные искания [Elgin, 1981]. О. Виноградская выделила следующие предпосылки дауншифтинга: воля случая, вынужденное решение под влиянием обстоятельств, прагматический поступок, например переезд для организации коммерческой деятельности, личные убеждения, среди которых отдельно выделяется поиск себя и своего предназначения через одиночество [Виноградская, 2019]. Важность самоактуализации подчеркивала и Ю. Демидова, отмечая, что в сельской местности бывшие горожане находят занятие «по душе», исходя из своих интересов, и счастье для них не достигается за счет карьерного роста, как в городской модели жизни, а продиктовано свободой выбора [Демидова, 2018]. По мнению В. Мерзляковой, частой причиной предпочтения села в качестве постоянного места жительства выступает стремление избавиться от психологического давления, вызванного быстрым темпом городской жизни, и начать самостоятельно распоряжаться собственным временем [Мерзлякова, 2008]. Л. Козырева называла одной из целей переезда в село эскапизм – желание жить в удаленной местности, в замкнутом и обособленном сообществе [Козырева, 2014].

Отличие горожан, осознанно сделавших выбор в пользу сельской местности, от коренных жителей деревни отражает еще одно предложенное исследователями понятие – новые деревенские или новые сельские жители [Пивовар, Алексеев, 2018]. Переселенцам, как правило, трудно войти в местное сообщество, они образуют своеобразную диаспору и общаются преимущественно друг с другом [Нефедова и др., 2015]. Бывшие горожане сознательно выбирают сельскую местность для своей деятельности, которая может принимать как традиционные формы, так и предпринимательство в сфере рекреации, культуры и ремесла [Пивовар, Алексеев, 2018]. Однако попытки открыть собственное дело зачастую опираются на городские, нежели на местные связи [Нефедова и др., 2015]. Нередко именно городские жители привносят в сельскую местность новые смыслы и сохраняют существующие, с большим трепетом относятся к локальной идентичности того места, куда они переехали жить. Несмотря на попытки новых сельских жителей воспроизвести деревенские традиции, большинство местных встречает их с непониманием – сказывается несоответствие реалий сельской жизни и образа жизни на селе у горожан [Пивовар, Алексеев, 2018]. Данная особенность сельской модернизации при привлечении внешнего человеческого капитала соотносится с концепцией клеточной глобализации Покровского, так как новое и старое органично уживаются в сельской местности во многом за счет неравномер-

ного влияния новых сельских жителей [Покровский, 2016].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Уникальность Воскресенского округа. Воскресенский округ при значительной удаленности от Нижнего Новгорода концентрирует большое количество новых жителей, нетипичное для столь удаленного района. Его роль как центра притяжения новых сельских жителей обусловлена рядом особенностей:

1) демогеографическое и транспортно-географическое положение округа: относительная близость к крупному городу обуславливает как активное дачное освоение округа (округ играет роль «дальней» дачной зоны), так и привлекательность для новых сельских жителей;

2) привлекательность природного ландшафта: озеро Светлояр, пойма р. Ветлуги, лесные ландшафты притягивают людей, ищущих спокойное место для жизни или отдыха;

3) культурные особенности: озеро Светлояр занимает ключевое место в легенде о Китеже – святом городе, покоящемся на дне озера со времен Батыева нашествия. Важное значение играет и наследие старообрядцев, издревле поселившихся в этих местах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Типология новых сельских жителей. Новые сельские жители – крайне неоднородная группа людей, разные представители которой по-разному взаимодействуют с окружающей средой. Различия в поведении и сфере деятельности во многом определены теми причинами, которые сподвигли их к переезду из города в село. В результате исследования было выделено пять групп новых сельских жителей по основной мотивации переезда. Основой типологии стала пирамида потребностей Маслоу (рис. 1, табл. 1): мотивация к переезду респондентов распределялась в соответствии с реализуемой ими базовой потребностью.

Для *первой группы* ключевой мотивацией является невозможность выжить, прокормить семью в городе. Наибольшее количество таких мигрантов попали в округ в 1990-е гг. Это достаточно разнородная группа, так как их первоначальная мотивация сменилась на мотивации более высоких уровней. Селились новые сельские жители относительно бессистемно: либо рядом с родственниками, либо в отдаленных деревнях со свободными домами. Тяжелые условия жизни и вовлеченность в сельское хозяйство сблизили их с местными жителями, но городской бэкграунд остался источником конфликтов: «Корову доят на несколько часов позже, чем это принято, думают по-другому».



Рис. 1. Группы новых сельских жителей Воскресенского округа. *Источник:* составлено авторами

Fig. 1. Groups of new rural residents of the Voskresensky district. *Source:* compiled by the authors

Главный мотив для переезда у *второй группы* – безопасность. Безопасность понимается очень широко: это и независимость от общегородской инфраструктуры, и желание обособиться от соседей по квартире, желание жить без стрессов и конфликтов. Идеологию этой группы наилучшим образом отражает поговорка «Мой дом – моя крепость». К этой группе относится большая часть переехавших в округ жителей Нижнего Новгорода. Представителей этой группы отличает разнообразие сфер занятости, развитие своего собственного дела и невысокая вовлеченность в проблемы местного сообщества. Для жизни они предпочитают небольшие населенные пункты, ключевым фактором является близость к реке или озеру, а барьерами – отсутствие свободных земель и газификации.

Представители *третьей группы* мечтают о признании, самоактуализации. Они наиболее ориентированы на взаимодействие с сельским сообществом и средой, значительную часть времени уделяют общественной, религиозной, эколого-просветительской деятельности. По основной специальности, как правило, они работают в бюджетных структурах, организуют вокруг себя заинтересованную часть местных и новых сельских жителей других типов. В результате формируются новые сообщества, как институционализированные (природный парк), так и неформальные (вокруг турбазы «Ветлуга»). Эти люди нередко подвергаются критике: «*Он хочет переделать людей под себя*».

Новые сельские жители из *четвертой группы* заинтересованы в творчестве и познании мира че-

рез него. Это свободные художники, музыканты и представители других творческих профессий, которые воспринимают окружающий мир и социум лишь как условия творчества. Они обычно ведут более замкнутый образ жизни, общаются преимущественно с такими же творческими людьми, а не с местным сообществом. Чаще они выбирают для жизни живописные места в долинах рек. Кроме того, их привлекает символический капитал Светлояра. Несмотря на то что в краткосрочной перспективе эффект от этой группы на сельскую местность невелик, в долгосрочной перспективе сформированный ими символический капитал может стать ресурсом развития округа.

Также выделяется *группа 0*, где мотивация переехать не связана с территорией переезда, а определена иными косвенными причинами: распределением на работу, уходом за родителями, женитьбой и т. д.

По мере усложнения мотиваций к переезду у новых сельских жителей усложняются и формы деятельности, которую они приносят в развитие округа: первые две группы чаще заняты в бюджетной сфере и сельском хозяйстве. Вторая группа чаще занимается высокодоходным сельским хозяйством (сыры, клубника), а также работает дистанционно. Третья группа занимается интеллектуальным трудом: образованием, управлением, созданием новых сообществ. Четвертая группа занимается творческой деятельностью. По мере роста потребностей растет и количество требований к территории. Задействуются все более специфичные ресурсы: для первых двух групп ключевым

ресурсом является свободная земля, но первой группе достаточно огорода, а вторая нередко требует больших площадей; запрос третьей группы – человеческий и символический капитал, на основе

которого возможно дальнейшее развитие территории, а у четвертой – символический капитал в широком смысле этого слова, необходимый для вдохновения.

Таблица 1

Характеристики различных групп новых сельских жителей

	Группа 1 «Кризисные мигранты»	Группа 2 «Собственники»	Группа 3 «Активисты»	Группа 4 «Творцы»
Причины переезда	Необходимость выживать в кризисных условиях	Желание жить свободно и обособлено, иметь собственный дом и землю	Потребность в уважении сообщества, активной социальной деятельности	Самоактуализация и самопознание
География	Хаотичная	Долина Ветлуги, малые населенные пункты с хорошей транспортной доступностью	Владимирское, Нестиары, долина р. Ветлуги	Владимирское, долина р. Ветлуги
Условия переезда	Возможность вести ЛПХ, дешевизна жизни	Свободная земля, институты для развития собственного дела	Крупные населенные пункты с сообществом и возможностью реализоваться	Небольшие населенные пункты, объекты культурного и природного наследия
Барьеры	Стоимость земли и домов, отсутствие рабочих мест	Плохое качество инфраструктуры и институтов	Отторжение местного сообщества	Бедность символического капитала
Представители	Беженцы, малоимущие	Городской средний класс старше 40 лет	Активисты, в т. ч. религиозные	Члены творческих городских сообществ

История новых сельских жителей в Воскресенском округе. В истории освоения округа новыми сельскими жителями можно условно выделить четыре этапа (рис. 2). Первый этап (1991–1999) отличается глубоким кризисом как в городах, так и в сельской местности. В результате молодые люди до 30 лет (рис. 3), оставшиеся без перспектив и возможностей к существованию, нередко принимали импульсивные решения переехать. Количество таких «кризисных» мигрантов в округе невелико, в том числе и потому, что далеко не все осели на территории округа, а двинулись дальше. В этот период средний возраст нового сельского жителя не превышает 26 лет, а география неоднородна: Нижний Новгород даже не является лидером (рис. 4). На втором этапе (2000–2009) происходит накопление капиталов в городах. Выезд из города теряет свою привлекательность. Новых сельских жителей очень немного. Это обычно люди среднего возраста (старше 45 лет), которые уже «наработались». Эту группу можно охарактеризовать как предвестников субурбанизации: они в меньшей степени разрывают связи с городом, чем «кризисные» мигранты. Переезжают на небольшие расстояния только жители Нижнего Новгорода, добившиеся успехов в городе (менеджеры, художники).

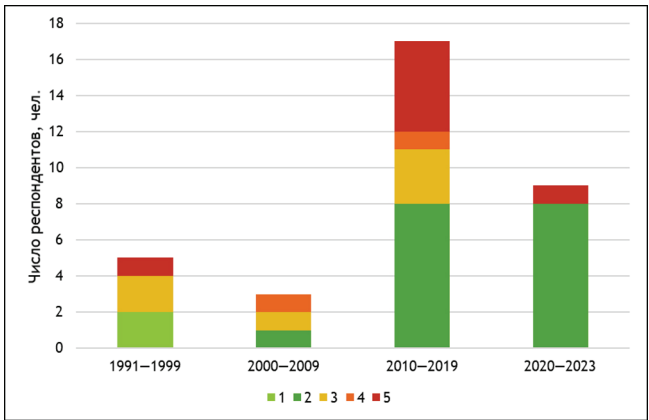


Рис. 2. Распределение новых сельских жителей по основной мотивации переезда: 1 – «кризисные» мигранты; 2 – собственники; 3 – активисты; 4 – творцы; 5 – иные мотивации. Источник: составлено авторами

Fig. 2. Distribution of new rural residents by the main motivation for moving home: 1 – crisis migrants; 2 – owners; 3 – activists; 4 – creators; 5 – other motivations. Source: compiled by the authors

После кризисов 2009 и 2014 гг. формируется третий этап, который можно охарактеризовать как раннюю субурбанизацию. Количество новых сельских жителей резко возрастает, появляются населенные пункты, где их воздействие вместе с дачниками ста-

новится критическим. В этот период дачи и дома в округе начинают покупать москвичи, а средний возраст релоканта снижается до 43 лет.

Совершенно новый этап начался в пандемию COVID: развитие дистанционных форм занятости, повышение качества дорог, строительство второго Борского моста привлекли в сельскую местность горожан от 30 до 40 лет с детьми, совмещающих городскую дистанционную занятость с работой на селе. При этом в год переезжает в 1,5 раза больше мигрантов, чем в предыдущий этап.

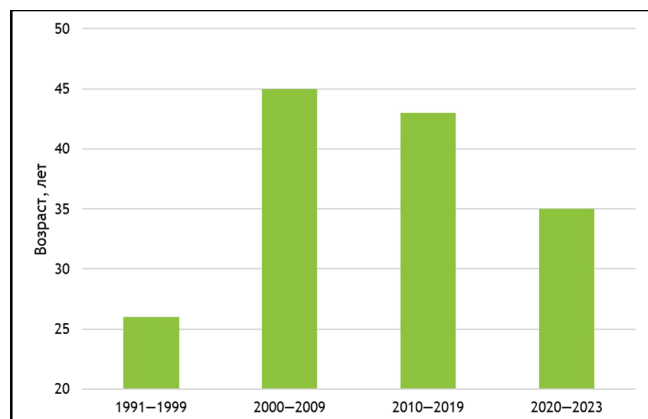


Рис. 3. Средний возраст новых сельских жителей в момент переезда. *Источник:* составлено авторами

Fig. 3. Average age of new rural residents at the time of moving home. *Source:* compiled by the authors

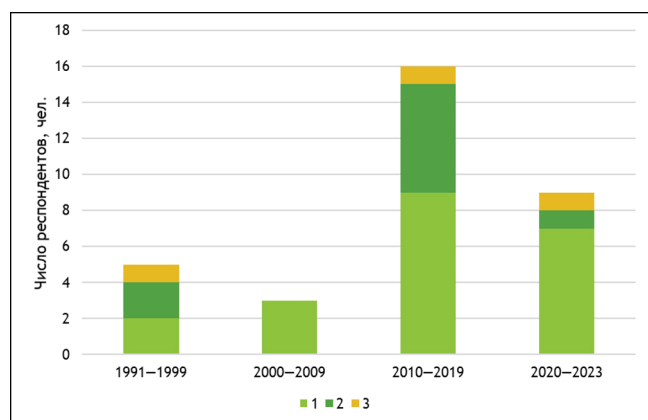


Рис. 4. Распределение новых сельских жителей по городам выезда: 1 – Нижний Новгород; 2 – Москва; 3 – иные. *Источник:* составлено авторами

Fig. 4. Distribution of new rural residents by cities of departure: 1 – Nizhny Novgorod; 2 – Moscow; 3 – other cities. *Source:* compiled by the authors

Новые сельские жители уже сейчас активно влияют на экономику округа, сельское хозяйство, туризм, социальную организацию СНП и даже меняют систему расселения.

Новые сельские жители и система расселения Воскресенского округа. Новые сельские жители оказали значительное влияние на сельское расселение округа. Система расселения Воскресенского округа – кустовая. Кусты деревень распространены на плакорах в местах с наилучшими почвами и вдоль реки, где можно было вести разнообразное хозяйство. Миграции населения, подчиненные центр-периферийным закономерностям, одинаково выражены как в плакорных населенных пунктах, так и в речных. Наиболее массовые группы новых сельских жителей тяготеют к реке Ветлуге и озеру Светлояр как к природным аттракторам и местам, накопившим наибольший символический капитал. В результате формируются значительные градиенты расселения при отдалении от Ветлуги: «У реки купить дом невозможно, а на соседней улице их уже продают за бесценок». Помимо прямого воздействия, новые сельские жители воздействуют на систему расселения и косвенно, создавая рабочие места и среду, привлекательную для местных жителей, формируют более стабильные социально-экономические условия в населенных пунктах, в которых они ведут свою деятельность. В Воскресенском это наиболее ярко выражено в деятельности туристических баз. Эффект туристической базы, а точнее влияние деятельности новых сельских жителей на социально-экономическое положение населенных пунктов, становится фактором изменения расселенческой картины. Население села Троицкого даже увеличилось из-за развития туристической базы «Серая лошадь».

В процессе исследования удалось выяснить, что новые сельские жители являются фактором привлечения себе подобных. Примером является село Трифакино, еще с 1980-х гг. (раньше всех остальных НП округа) осваиваемое новыми жителями (благодаря институциональным особенностям местного колхоза), наличие которых привлекало еще больше новых людей, как среди их знакомых, так и внешних по отношению к ним, для которых показательным становился опыт других новых сельских жителей. Благодаря такому процессу в Трифакино произошло полное замещение местного населения новым. Произошло это, с одной стороны, из-за сокращения сети социальной инфраструктуры, а с другой – из-за удачного ландшафтного положения на высоком берегу реки Ветлуги. Важно также и возникновение особого сообщества вокруг местной туристической базы, способствующее переезду людей, связанных с ним. Система расселения округа стратифицируется в силу неравномерного расселения «колонистов». Отмирание традиционных деревень происходит по всей территории округа, но вблизи природных аттракторов население замещается, и формируется новая деревня с сообществами нового типа.

Роль новых сельских жителей в современном аграрном облике Воскресенского округа. Первые десятилетия после распада Советского Союза решающую роль в сельском хозяйстве Воскресенского округа играли сельскохозяйственные производственные кооперативы – прямые наследники государственных коллективных хозяйств. К середине 2000-х гг. произошло значительное сокращение масштабов сельскохозяйственного производства в округе, прежде всего из-за низкой конкурентоспособности большинства сельскохозяйственных организаций, обусловленной рядом причин: обилие старых и ветхих фондов, устаревшие технологии выращивания и кормления животных, а также отсутствие значительных оборотных средств на обновление техники и внедрение новых зоотехнических и агрономических приемов работы. Другой проблемой сельскохозяйственных предприятий до сих пор является наличие в собственности значительных площадей залежных земель, сильно запущенных и уже заросших молодым лесом и кустарником.

Вместе с тем сельское хозяйство округа стало приобретать новый облик в середине 2010-х гг., благодаря возникновению хозяйств, основанных новыми сельскими жителями. Эти хозяйства можно условно разделить на два типа: семейные производства, представленные малыми формами хозяйствования, и мелкие сельскохозяйственные предприятия. Развиваются новые, нетипичные для Нечерноземья отрасли растениеводства (выращивание клубники в открытом грунте) и грибоводства (промышленная культивация шампиньонов). Такой выбор специализации обусловлен как отсутствием крупных конкурентов-производителей, так и относительной дешевизной земли. Также новые сельские жители, сформировавшие капитал за пределами сельского хозяйства, способны создать новые современные основные фонды, что не только делает их более конкурентоспособными, но и позволяет усложнить производственные цепочки: продавать не многолетние травы и молоко, а твердые сыры.

В первой четверти XX в. создатель теории трудового крестьянского хозяйства А.В. Чаянов писал: «Крестьянское хозяйство [в своей деятельности] руководствуется преимущественно не стяжательскими мотивами», т. е. в основе существования такого семейного производства лежит не стремление к обогащению и накоплению капитала, а желание поддержать существующий образ жизни [Чаянов, 1989]. На данном этапе семейные фермы также являются в большей степени способом жизни, чем бизнесом.

Резидентальная стратификация и социальная организация новых сельских жителей. Организация социальной жизни новых сельских

жителей также имеет свою специфику. Значимыми факторами здесь выступают резидентальная стратификация¹ и стигматизация нерезидентальных групп – новых сельских жителей и дачников. Представители последних в беседе эмоционально обозначали неприятие и закрытость коренных местных жителей по отношению к себе, даже по прошествии более 20 лет с момента переезда: *«Места здесь такие, что осторожно смотрят, кто ты такой. Вот мы живем с 1996 года, и нас за местных не принимают. А есть люди, которые очень агрессивно относятся до сих пор. Люди, которых я даже не знаю, оказывается: вон, он такой-то такой-то сказал то-то и то-то, а я его даже не встречал ни разу...»* (священнослужитель и его жена, 50 лет). *«Лет десять ты все это собираешь, остальные лет десять ты на этом живешь. Я думал там года три, пять... Нет. Лет десять. И если позволить себе какую-то ерунду и местные увидят, то еще лет десять, заново»* (священнослужитель, 50 лет).

Стигматизация по резидентальному признаку проявляется в отсутствии коммуникации и взаимопомощи, неучастии в проектах и праздниках горожан (в т. ч. нежелание работать «на городских» в сельском хозяйстве), распространении сплетен (умножении числа субъектов стигматизации), в отдельных случаях – в угрозах и артикулируемой агрессии: *«Ты скажи, чтобы мы его здесь не видели. Мы тебя предупредили»* (со слов местных жителей). Одна из причин этих имплицитных конфликтов – различия в образе жизни и видении будущего села, следствие – ограниченность круга общения новых сельских жителей, прежде всего, другими такими же, а также коллегами по работе / досуговой активности и ближайшими соседями: *«Наша лучшая подружка – в прошлом научный работник, на пенсии, очень интеллигентная... Она общается только с ближайшей соседкой через огород, местной, ну и с тоже приехавшей. Ну, теперь и с нами. Она говорит: я даже в магазин не люблю ходить! Ее тут обижали так...»* (новая сельская жительница, попадья, 50 лет).

¹ В основе резидентальной (от лат. resident – проживающий) дифференциации лежит разделение социальных групп по срокам проживания в стране (регионе, городе и т. д.). Здесь место человека в социальной структуре, его принадлежность той или иной резидентальной группе определяется количеством лет, которые он сам (первичная резидентность) или поколения его предков (вторичная резидентность) прожили на территории данного сообщества. Таким образом, срок проживания выступает критерием конституирования социальных тождеств и различий, разделяя «коренных» и «пришлых», старожилов и новоприбывших, потомков первопоселенцев и потомков недавних иммигрантов, т. е. резидентные и нерезидентные группы [Вахштайн, 2003].

Отметим, однако, что в обоих резидентных стратах встречаются «исключения» из описанных характеристик, но они весьма редки и не способны принципиально изменить ситуацию. Описанные взаимоотношения между пришлым и коренным населением фиксируются повсеместно и приводят к стратификации, формируя локальные сообщества «городских» в населенных пунктах с их наибольшей концентрацией. Хотя круги общения новых сельских жителей при этом не лимитируются границами села, наиболее плотные и сильные связи, приводящие к формированию полноценных локальных сообществ, возникают в двух случаях: вокруг личности и вокруг организации и ее деятельности.

Так, в селе Нестиары (окраина округа, отсутствие туристов, наибольшие темпы депопуляции) сообщество формировалось вокруг личности священнослужителя, отправленного туда епархией и начавшего активную богослужебную и гражданскую деятельность. Последняя направлена на вовлечение в церковную и общественную жизнь детей и молодежи. Для помощи в осуществлении этих проектов, общения со священнослужителем и духовного роста за несколько лет в село переехало четыре городских семьи. Они включились в работу с детьми и подростками и способствовали более активной коммуникации, в т. ч. с коренными жителями села: *«Он очень много делает для детей, привлекает все больше не какими-то поучениями, как наши батюшки. Он нас не ругает, и мы тянемся к нему»* (местная жительница, 40 лет). Специфика локального сообщества села – значимость религиозной составляющей в повседневной жизни, ядро из молодых людей, моноцентричность структуры сообщества.

Локальное сообщество села Трифакино (полупериферия округа, аттракторы – историко-культурный объект и база отдыха, депопуляция коренных жителей) также завязано на личность, но значительно более обширно и сложно устроено: *«Здесь сложился целый клан. Целая прослойка людей, которые преданы этому миру, преданы какой-то такой вольности и свободе, которые уже в обычном социуме не выживают, ибо здесь получили некоторую прививку других отношений»* (дачница, 60 лет). Данное сообщество сложилось вокруг базы отдыха, состоит исключительно из новых сельских жителей (и частично дачников) и взаимодействует с коренными жителями от случая к случаю, помогая «местным бабушкам» и не подчиняясь сельским порядкам: *«Они как всегда в противофазе с местными, но все же не ссорятся, им бойкота не объявляют»* (дачница, 60 лет). Интенсивность конфликта снижается и в силу того, что в селе Трифакино местных практи-

чески не осталось, а соседние населенные пункты также постепенно замещают население. Частично данное сообщество пересекается с другой социальной группой – паломниками и прихожанами местного храма, объединяемыми на основе связей со священнослужителем. Сообщество имеет сложную внутреннюю иерархию: *«Микросоциум имеет слои. Первый слой – переехавшие. <...> Второй слой – поколение их детей, детей друзей и бывших отдыхающих. Они «пацут», но интересы свои, тусовка своя, все свое, молодежное. <...> Есть прослойка старых близких друзей. У (этой) третьей прослойки общие интересы с первой. Единственное, в чем интересы расходятся, – в том, что они продолжают жить и работать в городе, а мы уже переехали. Всех их мы знаем»* (новый сельский житель из первого слоя, 60 лет). Дети продолжают дело родителей, сообщество расширяется (весь «микросоциум» – порядка 70 человек) до сих пор при сохранении ядра из хозяев базы и их ближайшего окружения. Сообщество активно участвует в развитии села и работе базы отдыха, имеет совместный досуг, *«реализуя те свои таланты, которые не смогли бы раскрыть в городе»* (новый сельский житель из первого слоя, 60 лет). Одно из проявлений последнего – театр, реализующий творческий потенциал новых сельских жителей, и разнообразный сельский досуг.

В то же время в округе существует несколько организаций и профессиональных сообществ, занимающихся охраной природы, сохранением и восстановлением историко-культурного наследия, развитием туризма, активизмом. Их костяк (~10 человек) составляют поддерживающие тесный контакт друг с другом новые сельские жители, объединившие усилия вокруг общей идеи и видения будущего округа. Внутри этого сообщества существуют как вертикальные, так и горизонтальные связи, однако при общении с местными жителями нередко отсутствует взаимопонимание: *«Местное население совсем не заинтересовано в развитии туризма здесь, даже если это принесет им доход»* (член организации, новый сельский житель, 55 лет). Разное видение будущего округа у приезжих активистов и коренных жителей, недостаток общения и дискуссий приводит к более медленному продвижению проектов организаций, пассивному участию в мероприятиях / их бойкотированию со стороны коренных жителей и усугублению резидентальной стратификации: *«Многие непонимания в острой фазе совершенно, когда сидят рядом два человека, которые любят Владимирское и Светлояр, и считают друг про друга, что тут все неправильно, и лучше бы тебя не было в этом селе... Это в основном местные и приезжие»* (член организации, новый сельский житель, 30 лет).

Помимо профессиональной деятельности часть данного сообщества продвигает политику иммиграционного туризма – привлечения большего числа «городских» в сельскую местность, так как «новых таких активных людей еще человек 20 сюда привези – и будут кардинальные изменения» (член организации, новый сельский житель, 50 лет). Один из реализованных проектов – производственная практика для студентов одного из крупнейших аграрных вузов страны в Воскресенский округ, целью которой было показать местных фермеров и подготовить не работников сельскохозяйственных организаций, а сельских предпринимателей. Как результат – четыре студента из 15 приняли решение о переезде в округ.

Социальные конфликты в Воскресенском округе. Высокая привлекательность округа для новых сельских жителей, формирование здесь новых сообществ не может не привести к возникновению социальных конфликтов. Причем возникают как конфликты с коренными местными жителями, так и между различными сообществами новых сельских жителей.

Причин возникновения конфликтов между новыми жителями сел множество, но глобально можно выделить два основных фактора их зарождения: 1) распоряжение символическими и природными ресурсами территории и 2) различия в видении будущего села и округа в целом.

В первом случае речь идет преимущественно о Светлояре. Вера в сакральность, загадочность и сверхъестественные свойства формирует туристический поток на Светлояр, который приводит к развитию сферы обслуживания. Однако основными выгодоприобретателями оказываются новые сельские жители: они создают этот туристический поток, популяризируя и рекламируя это место, они обслуживают туристов, они пользуются символическим и природным капиталом озера и получают заработок. Местные жители же считают себя обделенными, а к развитию туризма относятся негативно. Рост потока уже оказывает негативное влияние на местных жителей с. Владимирское: они вынуждены отказаться от традиции празднования дня села в день празднования Владимирской иконы Божией Матери, так как именно в этот день множество паломников приезжают на озеро за «благодатью». Возникает недопонимание и на фоне недостаточного уважения к сакральности Светлояра (*«Загорают в плавках там, где мы крестным ходом ходим»*), – одна из местных жительниц с. Владимирское). Данные разночтения приводят к недопониманию между сообществами коренных местных и новых сельских жителей: пока одни сетуют на пассивность

местных в деле охраны Светлояра, другие просто не верят в то, что состоящие преимущественно из приезжих органы могут инициировать какие-либо позитивные изменения.

Вторым источником конфликтов является вопрос о видении будущего округа. Глубинная причина возникновения таких противоречий лежит в различных социально-демографических процессах, происходящих в селе и городе. Из города в село приезжают люди с более высоким уровнем потребностей, наиболее активные из них становятся сельскими активистами и выступают с инициативами, в то время как в сельской местности идет обратный процесс: сельчане, мечтающие о большем, покидают село, остаются те, кого устраивает их образ жизни. В результате формируется небольшое сообщество активистов из числа новых сельских жителей, которые пытаются перестроить сельскую местность под себя, реализовать свои потребности в просвещении, творчестве, общении. Большинство из числа коренных местных не понимают этих потребностей. Связующее звено между ними – активные коренные жители – крайне невелико, а потому контакты между приезжими и местными остаются редкими.

Не менее значимы конфликты в среде новых сельских жителей. Почвой для них чаще всего выступает вопрос о направлении развития округа, что связано с противоположностью взглядов активистов на эту проблему. Здесь надо учитывать, что новые сельские жители – это неоднородная группа, они неравномерно расселены по округу и формируют ряд сообществ разного уровня закрытости (табл. 2). Центрами сообществ обычно являются организации: туристические базы «Ветлуга» и «Серая лошадь», церковные приходы и бюджетные организации. Организации создают возможность для периодических взаимодействий, а заведующие ими активные новые сельские жители являются ядром кристаллизации для разнородного сообщества новых сельских.

Точно определить «агентов» и «контрагентов» в конфликтах этих сообществ нельзя, их позиции по отношению к различным акторам, действующим в округе, различны, выделить четкие контуры конфликтов сложно. В то же время, проведение фокус-группы с представителями этих сообществ показало существование проблемы коммуникации между сообществами и согласования их инициатив между собой.

Стоит также отметить, что сообщества имеют свои зоны влияния (рис. 5). На рисунке можно заметить два основных центра концентрации интересов сообществ: р. п. Воскресенское и с. Владимирское. Воскресенское в данном случае играет роль узла,

где пересекаются интересы нескольких сообществ, что связано с его административным статусом. Владимирское служит местом концентрации раз-

личных сообществ в силу стабильного притока новых сельских жителей, вызванного расположением здесь оз. Светлояр².

Таблица 2

Сообщества новых сельских жителей в Воскресенском округе

Сообщество	Центр концентрации	Особенности, объединяющие черты
Трифакинское	Клуб художников на т/б «Трифакино»	Сообщество творческих людей (преимущественно поэтов и художников) из числа нижегородской интеллигенции
Троицкое	Конный клуб «Серая лошадь» с. Троицкое, с. Благовещенское	Сообщество новых и коренных жителей с. Троицкое, занятых в работе конного клуба; активность распространяется преимущественно на окрестные села
Богородско-Воскресенское	Православный приход с. Богородское, природный парк «Воскресенское Поветлужье», АНО «ПОРТ» и Администрация Воскресенского МО, р. п. Воскресенское	Одно из наиболее активных сообществ, состоит преимущественно из муниципальных служащих, сотрудников бюджетных учреждений, наиболее включено в работу системы местного самоуправления
Нестиарское	Православный приход с. Нестиары	Религиозное сообщество, собранное вокруг прихода, активность преимущественно внутри села
Владимирские сообщества	Оз. Светлояр, МТК «Град Китеж», с. Владимирское	Группа разрозненных сообществ «новых сельских», проживающих в с. Владимирское и окрестностях. Концентрируются вокруг Светлояра как сакрального места

Источник: составлено авторами.

Ключевой причиной конфликтов в округе можно считать недостаток договороспособности акторов (как новых сельских, так и коренных местных жителей) и проблемы с коммуникацией между ними. Именно налаживание коммуникаций поможет нивелировать конфликты или снизить их интенсивность.

ВЫВОДЫ

Новые сельские жители оказывают ключевое воздействие на современное развитие полупериферийного нечерноземного округа сразу по нескольким причинам.

Во-первых, с опытом жизни в городе, они имеют больший объем потребностей, который планируют реализовать на территории проживания. Нынешнее положение дел их не устраивает, а потому они стремятся к преобразованию среды. Большая часть новых сельских жителей ограничивается облагораживанием своего участка, решением проблемы отопления, водоснабжения, благоустройства. А наиболее активные в рамках своей экономической и культурной деятельности участвуют в трансформации сел и даже округа в целом.

² Стоит, однако, отметить, что не все новые сельские жители Владимирского входят в какие-либо сообщества, а также фактор различной связи их с уже сформированными сообществами.

Во-вторых, накопленные в городе капиталы и навыки, свобода от традиционных устоев, более широкие горизонты планирования и уровень образования, умение работать с рисками и привлекать заемные средства и гранты делают активных новых сельских жителей не просто более продвинутыми экономическими акторами, но и проводниками инноваций в сельской местности. Именно по этой причине их занятость концентрируется в несвойственных традиционной сельской местности секторах: агротуризм, сельский туризм, сфера услуг, а также в нетрадиционных направлениях сельского хозяйства: клубника, грибы, высококачественные сыры.

Разные группы новых сельских жителей предъявляют к территории иные требования, чем местные: наибольшее значение играет привлекательность ландшафта, символический капитал территории и избыток свободных площадей для экономической деятельности. Факторы, формировавшие систему расселения, уходят в прошлое, а население стягивается к наиболее привлекательным объектам: реке Ветлуге, озерам Светлояр и Нестиары. Таким образом, происходит постепенная поляризация системы расселения: отмирание плакорных деревень и перерождение и даже рост деревень вблизи Ветлуги и Светлояра.

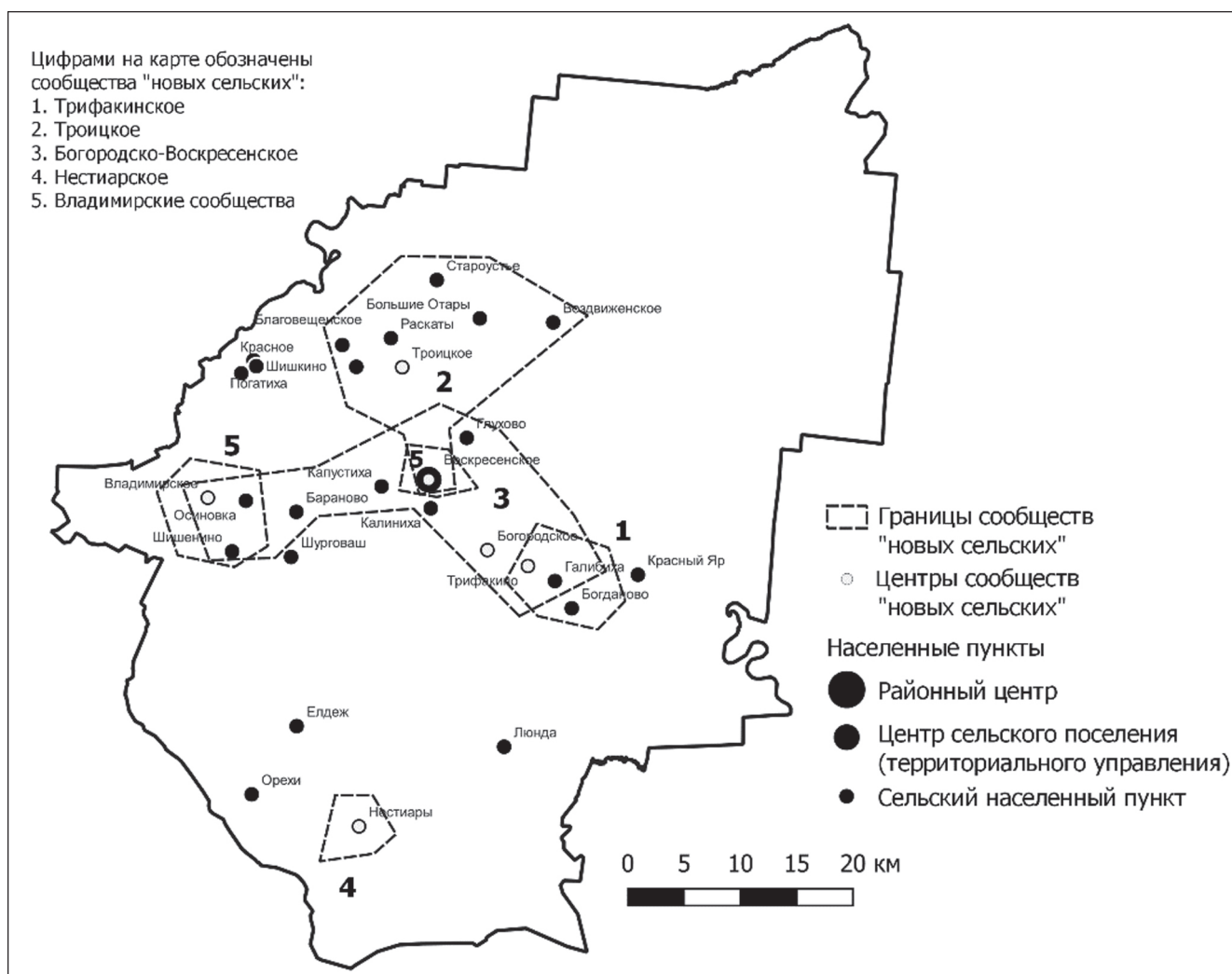


Рис. 5. Пространственное распространение локальных сообществ новых сельских жителей.

Источник: оставлено авторами

Fig. 5. Spatial distribution of local communities of new rural residents. Compiled by the authors

Трансформация самих сельских населенных пунктов округа также происходит достаточно интенсивно. Можно выделить три основных варианта этих трансформаций:

1. Полное замещение. Свойственно малым населенным пунктам в долине Ветлуги, которые активно депопулируют и наполняются совершенно новыми жителями. В них формируются квазигородские сообщества приезжих.

2. Конфликтное сосуществование. Взаимодействие местных и приезжих сведено к минимуму и сопряжено в основном с конфликтами по поводу использования ресурсов территории. Распространено во Владимирском и живых селах Поветлужья.

3. Полная деградация населенных пунктов с минимальным влиянием новых сельских жителей. Чаще всего малые деревни вдали от долины Ветлуги отмирают полностью, а территории зарастают лесом. Новые сельские жители оказываются на этих территориях редко. Чаще всего их интересом

являются освободившиеся дешевые земельные ресурсы, которые выгодны для предпринимательства. В данном случае сельское сообщество постепенно полностью отмирает и замещается одним или несколькими фермерскими хуторами.

Но возможен также и пока не встречающийся вариант сотрудничества и взаимобмена. Нежелание выходить за рамки собственных групп общения и интересов этих групп, нежелание искать компромисс свойственно как местным жителям, так и приезжим. В приоритете у большинства – жить как удобно. Практики соучаствующего проектирования, вовлечения активных местных (школьников, работников сферы культуры) не распространены и носят эпизодический характер, нежелание искать компромиссы вкупе с недостаточностью ресурсов ограничивают развитие территории.

Эффект от деятельности новых сельских жителей ограничен: практически не происходит передачи знаний и навыков местным жителям, вовлече-

ние их в деятельность невелико, а упор делается на привлечение в округ новых мигрантов из городов. Многие новые сельские жители общаются исключительно в своей среде, формируя своеобразную диаспору. Более того, часто в отношении к местным проявляется колониальный дискурс: они неправильны и примитивны, и их необходимо переделывать, «чтобы нам было комфортно». В то же время наблюдается двойное отношение к деятельности новых сельских жителей со стороны селян: низкий уровень доверия и травматичность самого процесса передачи собственности, а также низкая интенсивность социальных контактов между приезжими и местными приводит к тому, что деятельный человек из города априори воспринимается

как вредный и опасный: устраиваться к нему на работу считается чем-то неприличным. Наименее подвержены подобному поведению школьники, но мало кто из молодых остается в сельской местности после школы, что ведет к сохранению непонимания между местными и приезжими. Если же сравнивать, например, новых сельских жителей Воскресенского округа и муниципалитетов Калининградской области, для которых тоже характерны активные миграции из городов в сельскую местность, то, несмотря на большую социальную активность новых сельских жителей Воскресенского округа, их способность налаживать связи с местными пока недостаточна для интенсивного развития территории.

Благодарности. Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, проект 24-17-00107 «Малые города и сельские населенные пункты в системе расселения регионов России (1989–2021)».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.И., Данилова И.А., Зубаревич Н.В., Никулин Е.И. Современные переселения город – село в Нечерноземной зоне РСФСР (опыт изучения на примере Вологодской области) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1979. № 1. С. 55–61.
- Вахитайн В.С. К проблеме темпоральных механизмов социальной организации пространства. Анализ резидентальной дифференциации // Социологическое обозрение. 2003. № 3. С. 71 – 83.
- Виноградская О.Я. Отчего горожане едут в деревню: феноменология и практика // Крестьяноведение. 2019. Т. 4. № 3. С. 140–155.
- Демидова Ю.А. Феномен дауншифтинга в России на примере внегородской среды Ближнего Севера (по материалам экспедиций Костромской области Мантуровского района сельского поселения Леонтьевское) // Социологический ежегодник. 2018. С. 165–174.
- Задорин И., Мальцева Д., Хомякова А. и др. Альтернативные сельские поселения в России: стихийная внутренняя эмиграция или осознанный трансфер в будущее // Лабиринт. 2014. № 2. С. 64–77.
- Ильин В.И. Дауншифтинг как восходящая социальная мобильность // Socio Time/Социальное время. 2015. № 1. С. 78–89.
- Козырева Л.В. Феномен эскапизма: социально-философский анализ: автореф. дис. ... канд. филол. наук. Уфа, 2014.
- Лисова Е.В. Дауншифтинг: стратификационные эффекты // Экономическая социология. 2008. Т. 9. № 2. С. 56–65.
- Между домом... и домом. Возвратная пространственная мобильность населения России / под ред. Т.Г. Нефедовой, К.В. Аверкиевой, А.Г. Махровой. М.: Новый хронограф, 2016. 504 с.
- Мерзлякова В.Н. Альтернативные модели успешности в современной культуре: дауншифтинг // Вестник общественного мнения. 2008. № 4(96). С. 33–42.
- Нефедова Т.Г., Покровский Н.Е., Трейвиш А.И. Урбанизация, дезурбанизация и сельско-городские сообщества в условиях роста горизонтальной мобильности // Социологические исследования. 2015. № 12. С. 60–69.
- Пивовар Г.А., Алексеев А.И. Сельско-городские взаимосвязи на границе с Московской агломерацией // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 6. С. 100–103.
- 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.
- Чаянов А.В. Крестьянское хозяйство: избр. тр. М.: Экономика, 1989. 492 с.
- Berry B. The counterurbanization process: urban America since 1970, *Urban Affairs Annual Reviews*, 1976, no. 11, p. 17.
- Elgin D. Voluntary simplicity: Toward a way of life that is outwardly simple, inwardly rich, New York, 1981.
- Mitchell C. Making sense of counterurbanization, *Journal of rural studies*, 2004, no. 5, p. 27.

Поступила в редакцию 11.10.2023

После доработки 15.11.2023

Принята к публикации 04.12.2023

NEW RURAL RESIDENTS AND FORMS OF THEIR TERRITORIAL ORGANIZATION IN THE VOSKRESENSKY DISTRICT OF THE NIZHNY NOVGOROD REGION

O.D. Krutov¹, N.K. Grelya², A.A. Veprickij³, Ya.K. Kuksin⁴, G.A. Nazarenko⁵, O.E. Prusihin⁶,
P.A. Shirokova⁷, Yu.L. Kruze⁸, A.I. Alekseev⁹

^{1-7,9} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Economic and Social Geography of Russia

⁸ Nizhny Novgorod State University of architecture and engineering, Faculty of Architecture and Design,
Department of Cultural Studies

¹ Master student; e-mail: bigoleg911@yandex.ru

² Postgraduate student; e-mail: ngrelya.mkrko@mail.ru

³ Master student; e-mail: evgeni777.78@mail.ru

⁴ Student; e-mail: yaza.kuksin@gmail.com

⁵ Student; e-mail: nga-02@mail.ru

⁶ Master student; e-mail: olegprus2000@mail.ru

⁷ Master in Urban Studies; e-mail: polina.a.shirokova@gmail.com

⁸ Associate Professor, Ph.D. in Law; e-mail: julia.kruze@tm-service.ooo

⁹ Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: alival@mail.ru

The article examines the influence of “new rural residents” – immigrants from Nizhny Novgorod and Moscow, on a semi-peripheral district of the Non-Chernozem Region, as well as the transformation of its economy and society in connection with population replacement. Issues related to the territorial heterogeneity of the “new rural” influence are also considered. The research site, i.e. the Voskresensky district of the Nizhny Novgorod region is located 145 kilometers north of the city of Nizhny Novgorod. The presence of unique natural and symbolic resources, such as the Svetloyar Lake and the Vetluga River, attracts migrants from the large cities here. Research methods included in-depth and expert interviews, focus groups, participant observation and strategic sessions with local residents. The analysis of obtained data resulted in a typology of “new rural” residents, each type producing a different impact on the surrounding space. Key transformations of the lifestyle associated with the “new rural” are identified, namely new non-traditional types of agriculture, formation of “urban type” leisure, development of rural tourism by new-comers, complete replacement of the population in the most attractive settlements for city residents, as well as the emergence of associations of new-comers both territorial, and communities of “interests”. Key social conflicts were also identified among the new-comers and between them and indigenous residents, which limit the possibilities for development of the territory.

Keywords: deurbanization, residential stratification, post-Soviet transformations, rural areas

Acknowledgments. The study was financially supported by the Russian Science Foundation, project 24-17-00107 “Small towns and rural settlements in the settlement system of Russian regions” (1989–2021).

REFERENCES

- Alekseev A.I., Danilova I.A., Zubarevich N.V., Nikulin E.I. Sovremennye pereseleniya gorod – selo v Nechernozemnoj zone RSFSR (opyt izucheniya na primere Vologodskoj oblasti) [Modern rural-urban migrations in Non-Chernozem zone of the RSFSR], *Vestn. Mosk. un-ta, ser. 5, Geogr.*, no. 1, 1979, p. 55–61. (In Russian)
- Berry B. The counterurbanization process: urban America since 1970, *Urban Affairs Annual Reviews*, 1976, no. 11, p. 17.
- Chayanov A.V. *Krest'yanskoe hozyajstvo: Izbrannye Trudy* [Peasant household: selected works], L.I. Abalkin (ed.), Moscow, Ekonomika Publ., 1989, 492 p. (In Russian)
- Demidova Yu.A. Fenomen daunshiftinga v Rossii na primere vnegorodskoj sredy Blizhnego Severa (po materialam ekspeditsij Kostromskoj oblasti Manturovskogo rajona sel'skogo poseleniya Leont'evskoe) [Phenomenon of downshifting in Russia: a case study of out-of-town surroundings in Near North (based on materials from expedition in Leont'evskoe Rural Settlement, Manturovo District, Kostroma Region)], *Sociologicheskij ezhegodnik*, 2018, p. 165–174. (In Russian)
- Elgin D. *Voluntary simplicity: Toward a way of life that is outwardly simple, inwardly rich*, New York, Morrow Publ., 1981.
- Il'in V.I. Daunshifting kak voskhodyashchaya social'naya mobil'nost' [Downshifting as an ascending social mobility], *Socio Time/Social'noe vremya*, 2015, no. 1, p. 78–89. (In Russian)
- Kozyreva L.V. *Fenomen eskapizma: social'no-filosofskij analiz* [Phenomenon of escapism: a socio-philosophic analysis], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Philosophy, Ufa, 2014, 19 p. (In Russian)
- Lisova E.V. Daunshifting: stratifikacionnye efekty [Downshifting: stratification effects], *Ekonomicheskaya sociologiya*, vol. 9, no. 2, 2008, p. 56–65. (In Russian)
- Mezhdru domom... i domom. Vozvratnaya prostranstvennaya mobil'nost' naseleniya Rossii* [Between home... and home. Return spatial mobility of the Russian population]

- lation], T.G. Nefedova, K.V. Averkieva, A.G. Mahrova (eds.), Moscow, Novyj hronograf Publ., 2016, 504 p. (In Russian)
- Merzlyakova V.N. Al'ternativnye modeli uspehnosti v sovremennoj kul'ture: daunshifting [Alternative models of success in modern culture: downshifting], *Vestnik obshchestvennogo mneniya*, 2008, no. 4(96), p. 33–42. (In Russian)
- Mitchell C. Making sense of counterurbanization, *Journal of rural studies*, no. 5, 2004, p. 27.
- Nefedova T.G., Pokrovskij N.E., Trejvish A.I. Urbanizaciya, dezurbanizaciya i sel'sko-gorodskie soobshchestva v usloviyah rosta gorizontal'noj mobil'nosti [Urbanization, deurbanization and rural-urban communities in conditions of horizontal mobility growth], *Sociologicheskie issledovaniya*, no. 12, 2015, p. 60–69. (In Russian)
- Pivovarov G.A., Alekseev A.I. Sel'sko-gorodskie vzaimosvyazi na granice s Moskovskoj aglomeraciej [Rural-urban interconnections on the border of the Moscow agglomeration], *Vestn. Mosk. un-ta, ser. 5, Geogr.*, no. 6, 2018, p. 100–103. (In Russian)
- Pokrovskij N.E., Makshanchikova A.Yu., Nikishin E.A. Obratnaya migraciya v usloviyah pandemicheskogo krizisa: vnegorodskie prostranstva Rossii kak resurs adaptacii [Return migration during the pandemic crisis: out-of-town territories of Russia as a resource for adaptation], *Sociologicheskie issledovaniya*, no. 12, 2020, p. 54–64. (In Russian)
- Vahshtajn V.S. K probleme temporal'nyh mekhanizmov social'noj organizacii prostranstva. Analiz rezidental'noj differenciacii [To problem of temporal mechanisms of social organization of space. Analysis of residential differentiation], *Sociologicheskoe obozrenie*, no. 3, 2003, p. 71–83. (In Russian)
- Vinogradskaya O.Ya. Otchego gorozhane edut v derevnyu: fenomenologiya i praktika [Why city dwellers go to the country: phenomenology and practice], *Krest'yanovedenie*, vol. 4, no. 3, 2019, p. 140–155. (In Russian)
- Zadorin I., Mal'ceva D., Homyakova A., Shubina L. Al'ternativnye sel'skie poseleniya v Rossii: stihijnaya vnutrennyaya emigraciya ili osoznannyj transfer v budushchee [Alternative rural settlements in Russia: a spontaneous internal emigration or deliberate transfer to the future], *Labirint*, no. 2, 2014, p. 64–77. (In Russian)

Received 11.10.2023

Revised 15.11.2023

Accepted 04.12.2023

МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ В КАЗАХСТАНСКОЙ ЧАСТИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ MIKE 21

А.Г. Елтай¹, Н.И. Ивкина²

^{1,2} РГП «Казгидромет», Научно-исследовательский центр, управление гидрометеорологических исследований Каспийского моря

¹ Казахский национальный университет имени аль-Фараби, факультет географии и природопользования, кафедра метеорологии и гидрологии

¹ Вед. науч. сотр., докторант; e-mail: eltai_a@meteo.kz

² Начальник управления, канд. геогр. наук; e-mail: n_ivkina@mail.ru

В работе приведены результаты адаптации гидродинамического модуля MIKE 21 Flow Model FM программного комплекса MIKE Zero к региону Каспийского моря с применением данных реанализа полей ветра и давления как за отдельные годы, так и за многолетний период 2000–2020 гг. Проведена оценка качества результатов моделирования с применением статистических методов. Коэффициент корреляции между наблюдаемыми и смоделированными уровнями воды за период 2000–2020 гг. составил 0,97 для Форт-Шевченко и 0,95 для Актау. Калибровка модели дала возможность получить оптимальные значения параметров модели. Так, коэффициент турбулентной вязкости Смагоринского равен 0,5, коэффициент шероховатости Маннинга – 0,031. Проведенные оценки, как для многолетнего периода, так и для отдельных случаев, показали, что критерии качества моделирования находятся в допустимых пределах. Результаты верификации модели по данным 2000–2020 гг. и ее тестирования для штормового нагона 5–7 марта 2022 г. показали, что в будущем программный комплекс MIKE Zero может применяться для выпуска оперативного прогноза уровня моря.

Ключевые слова: гидродинамика, гидродинамическая модель MIKE21 Flow Model FM

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.7

ВВЕДЕНИЕ

Каспийское море – крупнейший бессточный водоем мира. Исследуемый район, северо-восточная часть, особенно ее прибрежная зона, характеризуется тем, что, в отличие от остальной части моря, здесь происходили и происходят наиболее существенные изменения гидролого-морфологических процессов. В этом районе, в среднем, в месяц отмечается 3–4 нагона и 4–5 сгонов во все сезоны года, поэтому 80–85% времени года береговая линия практически все время мигрирует [Гидрометеорология и гидрохимия морей..., 1992]. Одной из основных особенностей гидролого-морфологических процессов у побережья Каспийского моря является то, что они происходят в условиях значительных изменений фонового уровня моря [Ивкина, 2013]. Повышение уровня моря у побережья представляет серьезную угрозу для населения, предприятий, животного мира и является одной из актуальных тем для исследования [Kulp, Strauss, 2019; Hermans, 2022; Нестеров, 2016]. Кроме того, прибрежная зона имеет большое социально-экономическое значение, так как перспективы развития Западного Казахстана во многом определяются разведанными и прогнозными запасами углеводородного сырья в подсолевых

отложениях Прикаспийской впадины, включая дно Каспийского моря, и в ее северных и восточных частях [Ахмадиев, Брылов, 2020]. Немаловажное значение колебания уровня моря представляют для водотранспортной инфраструктуры. В казахстанской глубоководной части Каспийского моря на данный момент функционируют порты Баутино, Актау и Курык, построенные в 1960, 1963 и 2014 гг. соответственно. Порт Баутино расположен в Тупкараганском заливе и позиционируется как база поддержки морских операций в рамках освоения казахстанского сектора Каспийского моря. Порт Актау обеспечивает перевозку грузов, нефти и нефтепродуктов в направлении Исламской Республики Иран, Турции, Российской Федерации, Азербайджанской Республики, Туркменистана [Порт Актау, 2022]. Порт Курык расположен в естественной бухте, в заливе и круглогодично принимает автомобильные и железнодорожные паромы [Порт Курык, 2022].

Между тем число пунктов на казахстанском побережье, в которых проводятся наблюдения за уровнем моря, не только крайне ограничено, но ни на одном из них не установлено автоматических регистраторов уровня воды, которые обеспечивали бы удовлетворительную дискретность измерений во времени.

Наблюдения на работающих гидрометеорологических станциях выполняются только четыре раза в сутки. В подобных условиях велика вероятность того, что окажутся незафиксированными такие важнейшие характеристики уровня моря, как его экстремальные значения во время нагонных явлений.

В условиях недостатка данных наблюдений роль математического моделирования режима моря существенно возрастает, поскольку позволяет без значительных материальных затрат проводить численные эксперименты по прогнозу гидрологического состояния вод. В связи с этим целью данной работы является применение программного комплекса MIKE Zero для расчета уровневой поверхности казахстанской части Каспийского моря, для этого были выполнены задачи по трансформации батиметрической и метеорологической информации в форматы модели, проведены калибровка и верификация модели, а также дана оценка качества и эффективности результатов моделирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследований был использован программный комплекс MIKE Zero, который обладает огромными возможностями обработки данных для пространственно-временного численного моделирования, программный комплекс разработан в DHI [DHI, 2022] и адаптирован к условиям Каспийского моря специалистами РГП «Казгидромет» [Елтай и др., 2022].

Программный комплекс MIKE Zero включает несколько модулей: транспортный, MIKE ECO lab/разливы нефти, гидродинамический, транспорт наносов, спектральную модель волнения и др. [Luan, Tung, 2014]. Необходимо отметить, что гидродинамическое моделирование эффективно используется во многих методах прогноза колебания уровня моря [Любичкий и др., 2020; Symonds et al., 2017; Gurumoorthi, Venkatachalapathy, 2017; Nguyen et al., 2020; Hanapiah et al., 2020; MIKE 21..., 2017; Герштанский, 1978; Ивкина, Строева, 2006; Ивкина, 2007; Ivkina, Stroyeva, 2007; Йенсен и др., 2002; Филиппов, 1997].

При помощи численного моделирования можно провести расчет для любой точки на акватории моря. Для расчета уровня Каспийского моря использовался гидродинамический модуль MIKE 21 Flow Model FM программного комплекса MIKE Zero, основанный на решении трехмерных осреднений по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса, состоящих из уравнений неразрывности (1) и импульса (2, 3) [MIKE 21..., 2019]. Локальное уравнение неразрывности записывается как:

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} = S. \quad (1)$$

Уравнение импульса в проекциях на оси x (2) и y (3):

$$\begin{aligned} \frac{\delta u}{\delta t} + \frac{\delta u^2}{\delta x} + \frac{\delta vu}{\delta y} + \frac{\delta wu}{\delta z} = \\ = fv - g \frac{\delta \eta}{\delta x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\delta p_a}{\delta x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\delta \rho}{\delta x} dz - \\ - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\delta S_{xx}}{\delta x} + \frac{\delta S_{xy}}{\delta y} \right) + \\ + F_u + \frac{\delta}{\delta z} \left(v_t \frac{\delta u}{\delta z} \right) + u_s S, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta v}{\delta t} + \frac{\delta v^2}{\delta y} + \frac{\delta uv}{\delta x} + \frac{\delta wv}{\delta z} = \\ = -fu - g \frac{\delta \eta}{\delta y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\delta p_a}{\delta y} - \\ - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\delta \rho}{\delta y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\delta S_{yx}}{\delta x} + \frac{\delta S_{yy}}{\delta y} \right) + \\ + F_v + \frac{\delta}{\delta z} \left(v_t \frac{\delta v}{\delta z} \right) + v_s S, \end{aligned} \quad (3)$$

где u, v, w – x -, y -, z -компоненты вектора скорости, x, y, z – декартовы координаты, S – расход притока воды из источников, t – время, η – отклонение свободной поверхности от невозмущенного уровня, d – глубина при невозмущенном состоянии жидкости, $h = \eta + d$ – полная глубина воды, $f = 2\Omega \sin \Phi$ – параметр Кориолиса (Ω – угловая скорость вращения Земли, Φ – географическая широта), g – гравитация, ρ – плотность воды, $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$ – компоненты тензора радиационных напряжений, v_t – вертикальная турбулентная (вихревая) вязкость, p_a – атмосферное давление.

Калибровочными параметрами гидродинамической модели являются:

- придонное напряжение или шероховатость дна, определяемые на основании квадратичного закона трения (выраженное через коэффициент Шези или число Маннинга);
- ветровое напряжение или трение ветра, определяемые на основании квадратичного закона скорости;
- турбулентность, рассчитываемая на основании концентрации вихревой вязкости (выражается через коэффициент Смагоринского).

На практике качество моделирования зависит во многом от точности используемых батиметрических данных, заданных начальных и граничных условий.

Основные калибровочные параметры модели – коэффициент шероховатости дна и коэффициент турбулентной вязкости – в программном комплек-

се могут быть заданы как пространственные, так и временные функции. Шероховатость дна учитывается посредством коэффициента шероховатости Маннинга, который изменяется в пределах от 0,01 до 0,2. Коэффициент турбулентной вязкости может изменяться во времени от 0,25 до 1, согласно особой формулировке теории турбулентности Смагоринского [Smagorinsky et al., 1965].

Расчетная область. Построение качественной расчетной сетки является важным шагом для получения достоверных и надежных результатов моделирования. В качестве основы для создания расчетной сетки всей акватории Каспийского моря принята ранее созданная батиметрическая модель [Ивкина и др., 1997; Ivkina, Stroyeva, 2007] с шагом сетки 10 км (рис. 1).

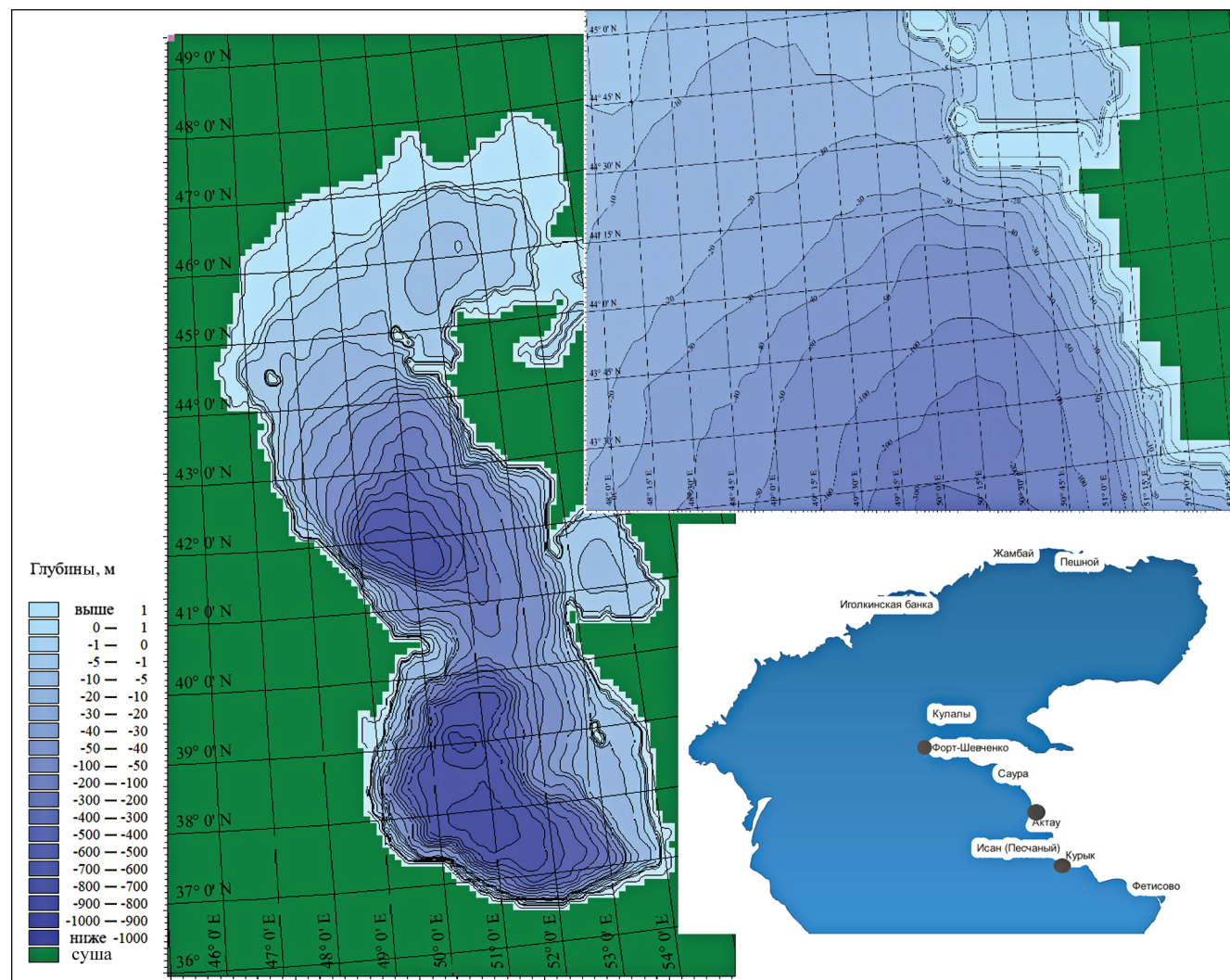


Рис. 1. Батиметрическая модель Каспийского моря с шагом сетки 10×10 км

Fig. 1. Bathymetric model with a grid step of 10×10 km

Для построения модельной батиметрической карты Каспийского моря были определены размер сетки модели, ее протяженность, ширина и ориентация. При изображении рельефа горизонталями особое внимание уделялось изгибам, которые должны характеризовать определенную форму рельефа и соответствовать его поперечному профилю. Чтобы иметь возможность соединить отдельные топографические карты, счет горизонталей велся от одной уровенной поверхности ($-28,00$ м). Ме-

тодом интерполяции были скорректированы карты Каспийского моря масштаба $1 : 500\,000$. Эти и более крупного масштаба карты северной части Каспийского моря и Гурьевского фарватера оцифрованы, после чего создан файл с глубинами и высотными отметками в равноугольной цилиндрической проекции Меркатора. Поскольку физической поверхности Земли свойственна сложная форма; ее нельзя представить ни одной из известных и математически изученных геометрических структур, поэтому

каждая точка на карте имеет не только географические координаты (долготу и широту), но и должна быть ориентирована относительно истинного севера. Для Каспийского моря эта ориентация составила $2,6^\circ$. Для уточнения батиметрической модели привлекались данные промеров глубин и аэрофотоснимки [Ивкина и др., 1997; Ivkina, Stroyeva, 2007].

Метеорологические данные. Ветровые характеристики являются основными входными данными при моделировании уровней воды. В настоящее время данные реанализа метеорологических величин являются наиболее доступными базами данных [Лопатухин, Яицкая, 2019]. В исследовании применены данные реанализа ERA5 (hourly data on single levels) полей ветра на высоте 10 м (меридиональный и зональный) и атмосферного давления с разрешением $0,25^\circ$ [Hersbach et al., 2018] за периоды 1980, 1990, 2000–2020, 2021 гг., так как данные находятся в свободном доступе, а также реанализ включает поля метеорологических параметров с дискретностью 1 час.

Сравнение данных наблюдательной сети с данными реанализа ERA5 показало, что за период с 1979 по 2021 г. скорость ветра имеет корреляционную связь, которая составила от 0,63 до 0,86, абсолютная ошибка (MAE) менее 2 м/с, RMSE от 1,64 до 2,12 (рис. 2).

Начальные условия. Данные наблюдений за уровнем моря были получены по береговым станциям РГП «Казгидромет»: МГ Форт-Шевченко, МГ Актау (табл. 1). Форт-Шевченко расположен в Баутинской бухте, Актау – на восточном берегу Каспийского моря в юго-западной части полуострова Мангышлак [Ежегодные данные..., 2021].

Основные параметры модели и схема расчета уровенной поверхности представлены на рис. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование уровенной поверхности осуществлялось за 20-летний период (2000–2020) и за отдельные годы (1980, 1990, 2000, 2010, 2020, 2021). Для примера на рис. 4 представлены графики наблюдаемых и смоделированных уровней моря за 2020 г. по морским станциям Форт-Шевченко и Актау.

Калибровка модели осуществлялась за 1980, 1990, 2000, 2010, 2020, 2021 гг. посредством расчета изменения уровня моря при изменении калибровочных параметров модели. В результате определено, что оптимальное значение коэффициента турбулентной вязкости Смагоринского, учитывающего вихревое движение, равно 0,5, оптимальное значение коэффициента шероховатости Маннинга составило $0,031 \text{ м}^{-1/3} \text{ с}$.

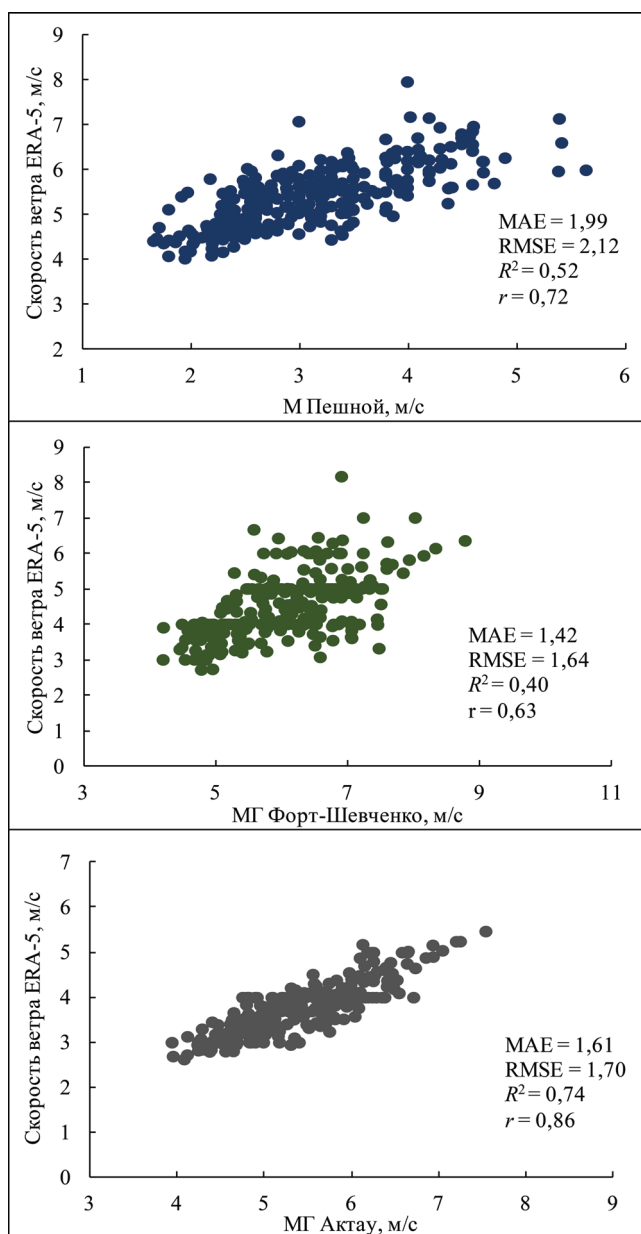


Рис. 2. Графики связи скорости ветра по данным реанализа с измеренными на морских станциях

Fig. 2. Graphs of the relationship of wind speed according to reanalysis data with measured at sea stations

Результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с измеренными значениями уровня моря.

Верификация модели проводилась для многолетнего периода (2000–2020), за указанный период коэффициент корреляции между наблюдаемыми и смоделированными уровнями воды для Форт-Шевченко составил 0,97, для Актау – 0,95.

Качество расчетов уровня моря оценивалось с применением общепринятых статистических критериев [Попов, 1979], таких как коэффициент корреляции, среднее квадратическое отклонение, средняя квадратическая ошибка, коэффициент де-

терминации, а также коэффициент эффективности или Нэша-Сатклифа, который широко используется для оценки производительности модели при гидрологическом моделировании. Он варьирует от минус бесконечности до 1, причем большее значение указывает на лучшее соответствие [Nash, Sutcliffe, 1970]:

$$E = 1 - \frac{\sum (x_i - y_i)^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}.$$

(4)

Индекс согласия находится в пределах от 0 до 1, причем большое значение указывает на лучшее соответствие [Willmott et al., 1985]:

$$d = 1 - \frac{\sum (x_i - y_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}) + (x_i - \bar{x})^2}.$$

(5)

Сравнение смоделированных и фактических данных осуществлялось через каждые 6 часов, в сроки наблюдений на морских станциях и постах (00, 6, 12, 18 ч).

Таблица 1

Точки прогнозов для акваторий Каспийского моря

Пункт	Период наблюдений	Широта	Долгота	Глубина, м
МГ Форт-Шевченко	1993–2022	44°32′	50°14′	–14,50
МГ Актау	1961–2022	43°36′	51°13′	–17,85

Примечание: МГ – морская гидрологическая станция.

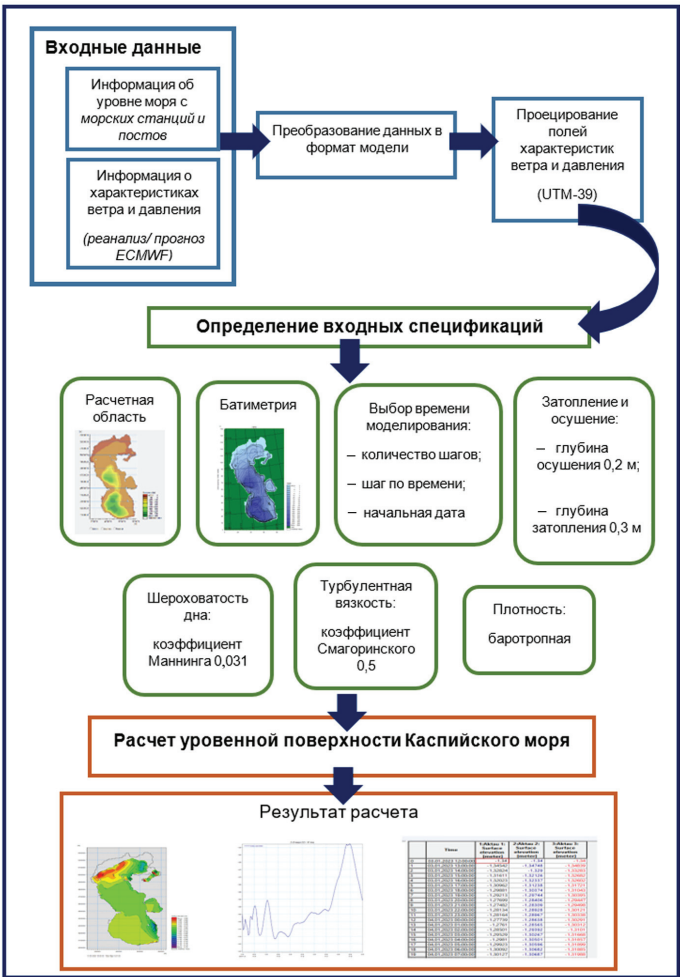


Рис. 3. Схема моделирования уровня моря с применением программного комплекса MIKE Zero

Fig. 3. Sea level modeling scheme using the MIKE Zero software package

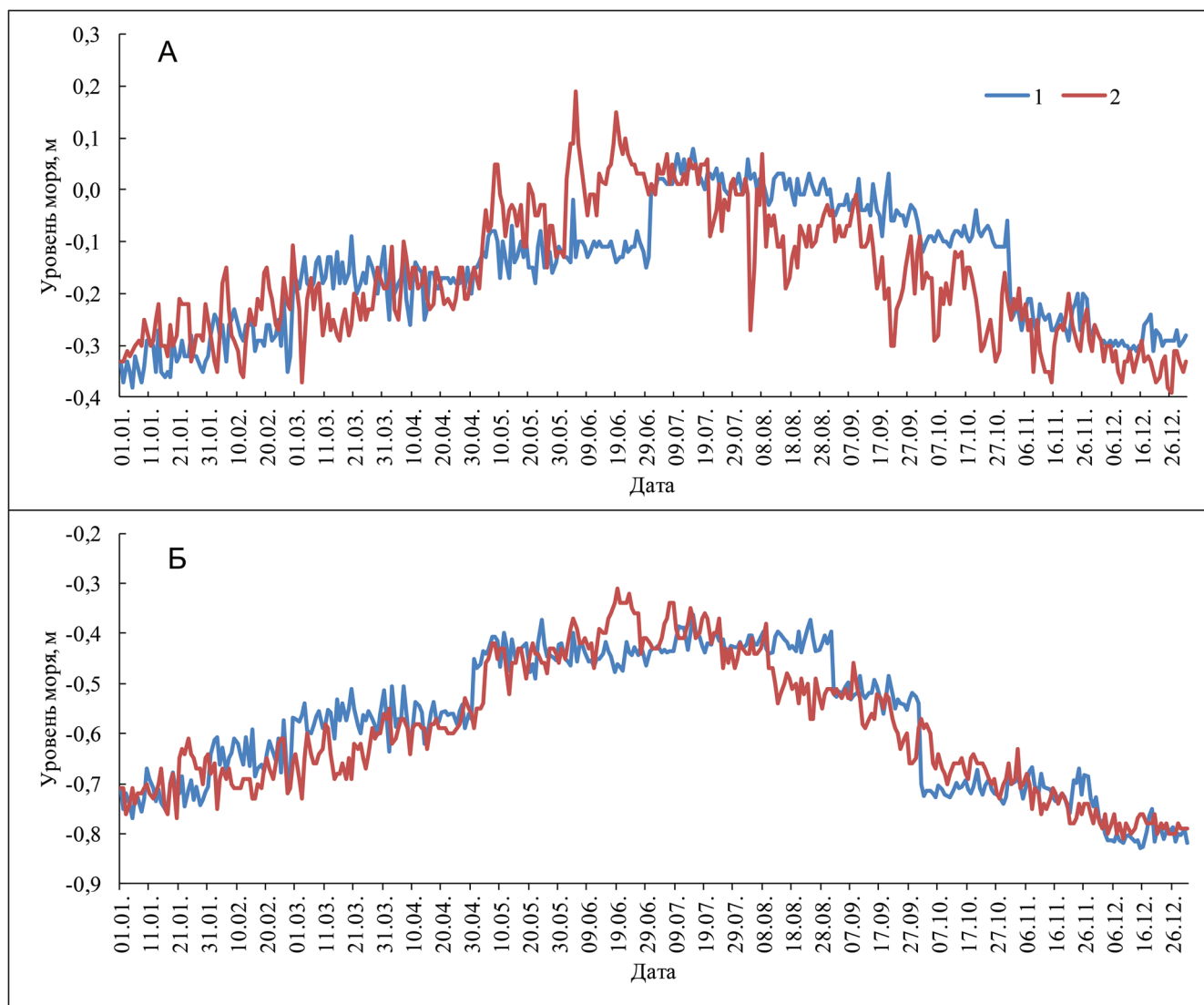


Рис. 4. График хода рассчитанного (1) и измеренного (2) уровня моря в 2020 г.: А – МГ Форт-Шевченко; Б – Актау

Fig. 4. Graph of the calculated (1) and measured (2) sea level for 2020: А – Fort Shevchenko; Б – Aktau

Как следует из таблицы 2, для Актау коэффициент корреляции, который при линейной зависимости служит как мера тесноты связи и как показатель, характеризующий степень приближения корреляционной зависимости, находился в пределах 0,66–0,95, абсолютная ошибка – 3–8 см, среднее квадратичное отклонение – в пределах 0,1–0,50, а S/σ , являющееся показателем точности метода, – 0,14–0,89. Значения индекса согласия довольно близки к 1, поэтому можно считать, что смоделированные значения имеют достаточно высокое согласие с наблюдаемыми данными. Для Форт-Шевченко (табл. 2) коэффициент корреляции находился в пределах 0,56–0,97, абсолютная ошибка – 5–8 см, среднее квадратичное отклонение – в диапазоне 0,07–0,41, а $S/\sigma = 0,22–0,96$. Значения коэффициента детерминации были от 0,31 до 0,95. Индекс согласия достаточно высок – от 0,80 до 0,99.

В целом данные критерии качества, в соответствии с Наставлением по службе морских гидрологических прогнозов [Наставление..., 2011], характеризуют надежность результатов. В дальнейшем представленная модель может использоваться для разработки методики оперативного прогноза уровня моря.

Следующим этапом была проверка работы модели на конкретном штормовом нагоне, который наблюдался на северо-восточном побережье в период шторма 5–7 марта 2022 г. на восточном побережье Северного Каспия в районе залива Мертвый Култук. Данный нагон был вызван ветром западного направления. По данным метеорологической станции Бейнеу средняя скорость ветра юго-западного направления составляла 16 м/с с порывами до 18–23 м/с. По данным морской станции Форт-Шевченко в это время преобладал ветер западной

четверти со скоростью ветра до 20 м/с, что вызвало нагонное повышение уровня в районе Форт-Шевченко на 17 см.

Учитывая, что в районе расположения месторождения «Култук» нет наблюдательных пунктов, было произведено моделирование уровенной поверхности с использованием программного комплекса MIKE Zero. В качестве входных данных использовалась информация по Форт-Шевченко и

прогностические характеристики ветра и давления с ЕЦСПП [ЕСMWF, 2022].

Результаты моделирования показали, что в некоторых районах, примыкающих к заливу Мертвый Култук, уровень моря в период с 5 по 7 марта поднимался на 71 см, что вызвало затопление части побережья. На рис. 5 показано смоделированное положение водной поверхности до нагона и в пик нагона.

Таблица 2

Оценка точности и эффективности расчетов уровня воды Каспийского моря

Статистические параметры	2000–2020	2021	2020	2010	2000	1990	1980
<i>Актау</i>							
Коэффициент корреляции	0,95	0,94	0,90	0,80	0,72	0,91	0,66
Коэффициент детерминации	0,91	0,86	0,82	0,64	0,51	0,82	0,43
Среднее квадратичное отклонение σ , м	0,50	0,12	0,13	0,13	0,12	0,10	0,11
Средняя квадратическая ошибка S , м	0,07	0,04	0,06	0,09	0,08	0,06	0,10
Средняя абсолютная ошибка Δ , м	0,05	0,03	0,05	0,07	0,07	0,05	0,08
Коэффициент эффективности	0,79	0,85	0,78	0,65	0,48	0,81	0,38
Стандартное отклонение	0,07	0,04	0,06	0,09	0,08	0,06	0,10
Индекс согласия	0,94	0,96	0,95	0,89	0,83	0,95	0,80
S/σ	0,14	0,34	0,44	0,65	0,85	0,43	0,89
$0,674\sigma$	0,34	0,08	0,09	0,09	0,08	0,09	0,08
<i>Форт-Шевченко</i>							
Коэффициент корреляции	0,97	0,81	0,67	0,87	0,56		
Коэффициент детерминации	0,95	0,66	0,44	0,75	0,31		
Среднее квадратичное отклонение σ , м	0,41	0,13	0,13	0,13	0,07		
Средняя квадратическая ошибка S , м	0,09	0,08	0,10	0,07	0,07		
Средняя абсолютная ошибка Δ , м	0,07	0,06	0,08	0,05	0,05		
Коэффициент эффективности	0,22	0,63	0,21	0,71	0,98		
Индекс согласия	0,80	0,90	0,80	0,93	0,99		
S/σ	0,22	0,63	0,78	0,50	0,96		
$0,674\sigma$	0,28	0,09	0,09	0,09	0,05		

Таким образом, при помощи данной модели мог быть спрогнозирован опасный нагон, который зафиксировали и космические снимки спутника Sentinel-3 OLCI 3 и 7 марта 2022 г. [Sentinel..., 2022].

ВЫВОДЫ

В связи с активным освоением открытой акватории Каспийского моря для ведения работ по разработке нефтяных месторождений, развитием морских портов на казахстанской части побережья Каспийского моря вопрос оперативного расчета изменения уровня моря, его краткосрочный, а также долгосрочный прогноз на будущее является актуальной темой для исследования.

В связи с этим проведено тестирование применимости гидродинамического модуля MIKE 21 Flow Model FM программного комплекса MIKE Zero в казахстанской части Каспийского моря. В результате калибровки модели получены оптимальные значения параметров модели: коэффициент турбулентной вязкости Смагоринского равен 0,5, коэффициент шероховатости Маннинга – 0,031 м^{-1/3} с.

Оценка точности смоделированных данных с применением статистических критериев показала, что критерии находятся в допустимых пределах и, следовательно, использование метода является целесообразным. Результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с измеренными значениями уровня моря. В дальнейшем программный

комплекс может использоваться для разработки методики оперативного прогноза уровня моря.

Стоит отметить, что программный комплекс MIKE Zero включает ряд дополнительных инструментов для анализа и визуализации результатов, таких как *Time series comparator*, позволяющий сравнивать временные ряды по статистическим критериям (средняя ошибка, средняя абсолютная ошибка, средняя квадратическая ошибка, коэффициент детерминации, коэффициент эффективности, коэффициент корреляции и др.); *MIKE to Google*

Earth с возможностью создания KML-файла и отображения его в Google Earth и др.

Внедрение данной системы в оперативную практику позволит усовершенствовать существующую систему прогнозирования, своевременно предупреждать гражданское население об опасных морских наводнениях и разработать стратегию действий в случае затопления. Особенно это актуально для северо-восточного района Каспийского моря, малоохваченного данными натурных наблюдений.

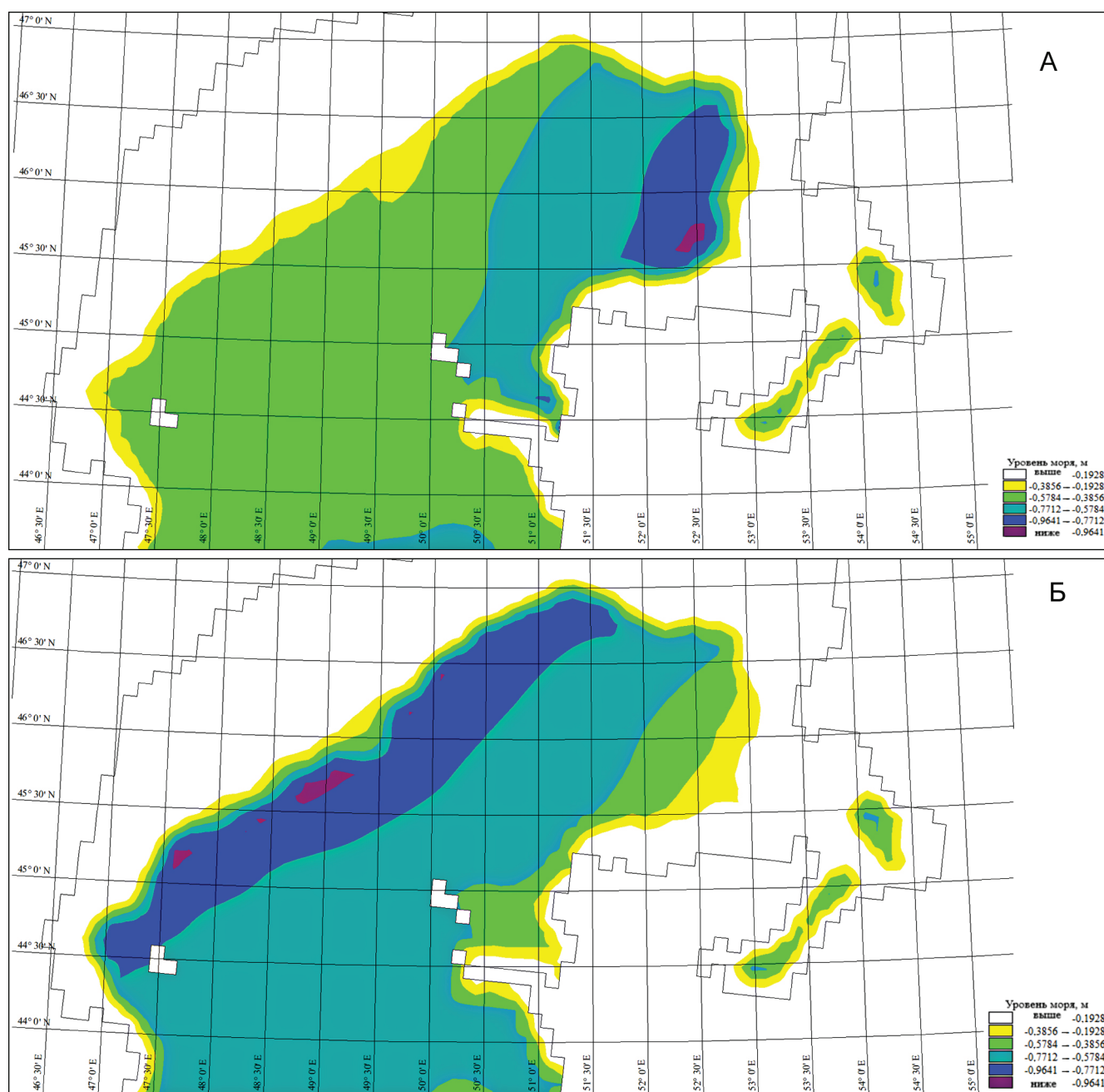


Рис. 5. Карта положения уровенной поверхности до нагона (А) и в период пика нагона (Б)

Fig. 5. Level surface position map before the surge (A) and during the peak of the surge (B)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ахмадиев А.К., Брылов Д.С. Каспий: особенности недропользования и вопросы геополитики // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. Т. 6(16). Вып. 4. С. 36–48.
- Герштанский Н.Д. Исследование и расчет сгонно-нагонных колебаний уровня воды Северного Каспия: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ростов н/Д. 1978. 24 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. VI. Каспийское море. Вып. 1. 1992. 359 с.
- Ежегодные данные о режиме Каспийского моря (казахстанское побережье), 2020 г. Нур-Султан: Аликамкор, 2021. 61 с.
- Елтай А.Г., Ивкина Н.И., Васенина Е.И., Наурызбаева Ж.К., Шишкина Г.М. Прогнозирование гидродинамических процессов с использованием модели MIKE ZERO (на примере порта Актау): материалы IV Международной научной конференции памяти чл.-кор. РАН Д.Г. Матишова «Развитие водных транспортных магистралей в условиях глобального изменения климата на территории российской федерации (Евразии). Опасные явления», Ростов-на-Дону, 5–9 сентября 2022 г. 2022. С. 88–90.
- Ивкина Н.И. Сгонно-нагонные явления в устьевой зоне казахстанского сектора Каспийского моря // Труды государственного океанографического института (ГОИН Росгидромета). 2013. Вып. 214. С. 278–290.
- Ивкина Н.И. Прогнозирование опасных сгонно-нагонных явлений для районов нефтедобычи на Каспийском море // Метеоспектр. Вопросы специализированного гидрометеорологического обеспечения. М.: АНО «Метеоагентство Росгидромета». 2007. Вып. 4. С. 191–195.
- Ивкина Н.И., Строева Т.П. Исследование и оперативное прогнозирование непериодических колебаний уровня воды Каспийского моря в Казахстане: материалы 4-й Международной конференции ЮНЕСКО, программа 481 «Колебание уровня воды Каспийского моря». Актау. 2006. С. 59–65.
- Ивкина Н.И., Строева Т.П., Васенина Е.И. и др. К вопросу о создании батиметрической модели Каспийского моря // Гидрометеорология и экология. 1997. № 2. С. 103–109.
- Йенсен Х.Р., Ивкина Н.И., Строева Т.П. Некоторые результаты тестирования системы предупреждения штормовых нагонов на Каспийском море // Гидрометеорология и экология, 2002, Вып. 1. С. 93–100.
- Лопатухин Л.И., Яицкая Н.А. Данные реанализа полей ветра над Каспийским морем для расчета режима ветрового волнения // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 6. С. 598–604.
- Любицкий Ю.В., Кравчук Л.П., Забродина О.И. и др. Результаты испытаний метода краткосрочного (с заблаговременностью 72 часа) прогноза изменений уровня моря на побережье Охотского моря, северной части Японского моря, восточном побережье полуострова Камчатка // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2020. № 47. С. 60–78.
- Нестеров Е.С. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. М.: Трида ЛТД, 2016. 378 с.
- Попов Е.Г. Гидрологические прогнозы. М.: Гидрометеиздат, 1979. 256 с.
- Филиппов Ю.Г. Численное исследование колебаний уровня и течений северной части Каспийского моря при различных значениях его фонового уровня // Водные ресурсы. 1997. Т. 24. Вып. 4. С. 424–429.
- Gurumoorthi K., Venkatachalapathy R. Hydrodynamic modeling along the southern tip of India: A special emphasis on Kanyakumari coast, *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2017, p. 1–16.
- Hanapiah M., Saad S., Ahmad Z. Hydrodynamic Modelling In Inshore Reef Area Within Kuantan Coastal Region, *Journal Clean WAS*, 2020, vol. 4(1), p. 01–07.
- Hermans T.H.J. Understanding Sea-Level Change Using Global and Regional Models, 2022, DOI: 10.4233/uuid:ad44006f-b50d-49b9-bf64-ee5cb7a55980.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present. DOI: 10.24381/cds.adbb2d47. (CDS), 2018, DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.
- Ivkina N.I., Stroyeva T.P. Automated Method of the Storm Surges Fore-casting for the Kazakhstan's part of the Caspian Sea, *Proceeding of JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges*, 2–6 October 2007, Seoul, Korea, p. 34.
- Kulp S.A., Strauss B.H. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding, *Nat Commun.*, 2019, vol. 10, 4844, DOI: 10.1038/s41467-019-12808-z.
- Luan N., Tung T. A study on hydrodynamics and morphodynamics of the Nha Trang bay, Khanh Hoa province, *Proceeding of the 19th IAHR-APD Congress*, 2014, Hanoi, Vietnam, 7 p.
- MIKE 21 Flow Model and MIKE 21 Flood Screening Tool, Hydrodynamic Module, Scientific documentation, DHI, 2019.
- MIKE 21 Flow Model Hydrodynamic Module, User Guide, DHI, 2017.
- Nash J.E., Sutcliffe J. River flow forecasting through conceptual models, pt I, A discussions of principles, *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 10, p. 282–290.
- Nguyen P., Gourbesville P., Audra P. et al. Methodology for Wastewater Discharge Modeling – Application to Danang Bay, Vietnam, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 505 012047.
- Smagorinsky J., Manabe S., Holloway J.E. Numerical Results from a Nine-level General Circulation Model of the Atmosphere, *Monthly Weather Review*, 1965, vol. 93, p. 727–768.
- Symonds A.M., Vijverberg T., Post S. et al. Comparison between MIKE 21 FM, DELFT3D and DELFT3D FM flow models of western port bay, Australia, *Coastal Engineering Proceedings*, 2017, vol. 1(35), currents. 11, DOI: 10.9753/icce.v35.currents.11.
- Willmott C.J., Ackleson S.G., Davis R.E. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models, *Journal of Geophysical Research*, 1985, vol. 90, p. 8995–9005.
- Электронные ресурсы
Наставление по службе прогнозов. 2011. URL: <https://method.meteorf.ru/norma/document/nast2011.pdf> (дата обращения 05.04.2022).

Порт Актау. URL: www.portaktau.kz/ru (дата обращения 31.01.2022).
 Порт Курык. URL: portkuryk.kz/ru/port (дата обращения 02.02.2022).
 DHI. URL: www.dhigroup.com (дата обращения 02.02.2022).

ECMWF, URL: www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/set-iii (дата обращения 05.04.2022).
 Sentinel Hub EO Browser, URL: apps.sentinel-hub.com/eo-browser (дата обращения 10.04.2022).

Поступила в редакцию 19.11.2022

После доработки 10.04.2023

Принята к публикации 04.12.2023

SEA LEVEL MODELING IN THE KAZAKHSTAN PART OF THE CASPIAN SEA USING THE MIKE 21 MODEL

A.G. Yeltay¹, N.I. Ivkina²

^{1,2}RSE “Kazhydromet”, Research Center, Department of Hydrometeorological Research of the Caspian Sea

¹Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Geography and Environmental Management,
 Department of Meteorology and Hydrology

¹Leading Scientific Researcher, doctoral student; e-mail: eltai_a@meteo.kz

²Head of the Department, Ph.D. in Geography; e-mail: n_ivkina@mail.ru

The article presents the results of adaptation of the MIKE21 Flow Model FM hydrodynamic module of the MIKE Zero software package to the Caspian Sea region using reanalysis data of wind and pressure fields, both for individual years and for a long-term period (2000–2020). The quality of modeling results was assessed using the statistical methods. The correlation coefficient between observed and simulated water levels for the period of 2000–2020 was 0,97 for Fort Shevchenko and 0,95 for Aktau. Model calibration allowed obtaining optimal values of model parameters, such as the Smagorinsky turbulent viscosity coefficient of 0,5 and the Manning roughness coefficient of 0,031. The evaluation for the multi-year period and the individual cases demonstrated that the modeling quality criteria were within acceptable limits. The results of the model verification based on the data for 2000–2020 and its testing for the storm surge on March 5–7, 2022, indicated that in the future the MIKE Zero software package could be used for operational sea level forecasting.

Keywords: hydrodynamics, MIKE21 Flow Model FM hydrodynamic model

REFERENCES

- Akhmadiev A.K., Brylov D.S. Kaspij: osobennosti nedropol'zovaniya i voprosy geopolitiki [The Caspian Sea: aspects of subsoil use and geopolitical issues], *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, 2020, vol. 6(16), no. 4, p. 36–48. (In Russian)
- Ezhegodnye dannye o rezhime Kaspijskogo morya (kazakhstanskoe poberezh'e), 2020 g. [Early data on the regime of the Caspian Sea (the Kazakhstan coast)], Nur-Sultan, Alikamkor Publ., 2021, 61 p. (In Russian)
- Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei, t. VI, Kaspiiskoe more [Hydrometeorology and hydrochemistry of seas, vol. VI, The Caspian Sea], vyp. 1, 1992, 359 p. (In Russian)
- Gurumoorathi K., Venkatachalapathy R. Hydrodynamic modeling along the southern tip of India: A special emphasis on Kanyakumari coast, *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2017, p. 1–16.
- Hanapiiah M., Saad S., Ahmad Z. Hydrodynamic Modelling In Inshore Reef Area Within Kuantan Coastal Region, *Journal Clean WAS*, 2020, 4(1), 01–07.
- Hermans T.H.J. Understanding Sea-Level Change Using Global and Regional Models, DOI: 10.4233/uuid:ad44006f-b50d-49b9-bf64-ee5cb7a55980, 2022.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S), *Climate Data Store* (CDS), 2018, DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.
- Ivkina N.I. Sgonno-nagonnye yavleniya v ust'evoi zone kazakhstanskogo sektora Kaspijskogo morya [Surges in the river mouth zone of the Kazakhstan sector of the Caspian Sea], *Trudy gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta (GOIN Rosgidrometa)*, 2013, no. 214, p. 278–290. (In Russian)
- Ivkina N.I., Stroeveva T.P., Vasenina E.I., Nesterkina G.I. K voprosu o sozdanii batimetricheskoi modeli Kaspijskogo morya [On the construction of a digital bathymetric model of the Caspian Sea], *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 1997, no. 2, p. 103–109. (In Russian)
- Ivkina N.I., Stroyeva T.P. Automated Method of the Storm Surges Fore-casting for the Kazakhstan's part of the Caspian Sea, *Proceeding of JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges*, 2–6 October 2007, Seoul, Korea, p. 34.
- Kudryaeva K.I., Seryakov E.I., Skriptunova L.I. Morskije gidrologicheskie prognozy [Marine hydrological forecasts], Gidrometeoizdat Publ., 1974, 312 p. (In Russian)

- Kulp S.A., Strauss B.H. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding, *Nat Commun.*, 2019, 10, 4844, DOI: 10.1038/s41467-019-12808-z.
- Lopatukhin L.I., Yaitskaya N.A. Data of Wind Field Reanalysis over the Caspian Sea for Calculating the Regime of Wind Waves, *Water Resources*, 2019, vol. 46, no. 6, p. 926–933.
- Luan N., Tung T. A study on hydrodynamics and morphodynamics of the Nha Trang bay, Khanh Hoa province, *Proceeding of the 19th IAHR-APD Congress 2014*, Hanoi, Vietnam, 7 p.
- Lyubitskii Yu.V., Kravchuk L.P., Zabrodina O.I. et al. Rezul'taty ispytaniy metoda kratkosrochnogo (s zablagovremennost'yu 72 chasa) prognoza izmenenii urovnya morya na poberezh'e Okhotskogo morya, severnoi chasti Yaponskogo morya, vostochnom poberezh'e poluostrova Kamchatka [Results of testing a method of short-term (72 hours ahead) forecast of the sea level variation for the coast of the Sea of Okhotsk, northern part of the Sea of Japan and the eastern coast of the Kamchatka Peninsula], *Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, 2020, no. 47, p. 60–78. (In Russian)
- MIKE 21 Flow Model and MIKE 21 Flood Screening Tool, Hydrodynamic Module, Scientific documentation, DHI, 2019.
- MIKE21 Flow Model Hydrodynamic Module, User Guide, DHI, 2017.
- Nash J.E., Sutcliffe J. River flow forecasting through conceptual models, pt I, A discussions of principles, *Journal of Hydrology*, 1970, 10, p. 282–290.
- Nesterev E.S. *Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovanie i prognoz* [Water balance and sea level oscillation of the Caspian Sea. Modeling and forecast], Moscow, Triada ltd Publ., 2016, 378 p. (In Russian)
- Nguyen P., Gourbesville P., Audra P. et al. Methodology for Wastewater Discharge Modeling – Application to Danang Bay, Vietnam, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 505 012047.
- Popov E.G. *Gidrologicheskie prognozy* [Hydrological forecasts], Gidrometeoizdat, 1979, 256 p. (In Russian)
- Smagorinsky J., Manabe S., Holloway J.E. Numerical Results from a Nine-level General Circulation Model of the Atmosphere, *Monthly Weather Review*, 1965, vol. 93, p. 727–768.
- Symonds A.M., Vijverberg T., Post S. et al. Comparison between MIKE 21 FM, DELFT3D and DELFT3D FM flow models of western port bay, Australia, *Coastal Engineering Proceedings*, 2017, 1(35), currents. 11, DOI: 10.9753/icce.v35.currents.11.
- Willmott C.J., Ackleson S.G., Davis R.E. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models, *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90, 8995–9005.
- Web sources*
- Nastavlenie po sluzhbe prognozov, 2011, URL: <https://method.meteor.ru/norma/document/nast2011.pdf> (access date 05.04.2022). (In Russian)
- Port Aktau, URL: www.portaktau.kz/ru (access date 31.01.2022). (In Russian)
- Port Kuryk, URL: portkuryk.kz/ru (access date 02.02.2022). (In Russian)
- DHI, URL: www.dhigroup.com (access date 02.02.2022).
- ECMWF, URL: www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/set-iii (access date 05.04.2022).
- Sentinel Hub EO Browser, URL: apps.sentinel-hub.com/eo-browser (access date 10.04.2022).

Received 19.11.2022

Revised 10.04.2023

Accepted 04.12.2023

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 551.462

ФЛЮИДОГЕННЫЙ РЕЛЬЕФ НА ШЕЛЬФАХ МОРЕЙ АРКТИКИ

А.В. Кохан¹, Е.А. Еременко², Е.А. Мороз³, А.В. Ермаков⁴, С.Ю. Соколов⁵^{1-3,5} Геологический институт РАН, лаборатория геоморфологии и тектоники дна океанов⁴ Геологический институт РАН, лаборатория тепломассопереноса² Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, кафедра геоморфологии и палеогеографии¹ Мл. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: kkkkk1987@mail.ru² Доц., канд. геогр. наук; e-mail: eremenkoeaig@gmail.com³ Ст. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: morozzea@gmail.com⁴ Науч. сотр.; e-mail: a.v.ermakov@gmail.com⁵ Гл. науч. сотр., д-р геол.-минерал. наук; e-mail: sysokolov@yandex.ru

Обобщены и систематизированы опубликованные в России и за рубежом сведения о распространении и геолого-геоморфологическом строении флюидогенного рельефа на шельфах Арктики, в частности покмарок, пингоподобных форм, поднятий и кратеров. Составлена мелкомасштабная карта распространения флюидогенного рельефа. Установлены географические закономерности распространения разных типов флюидогенных форм в морях Арктики, а также главные факторы и условия, определяющие их локализацию, морфологию и современную активность. Показано, что флюидогенные формы являются комплексными образованиями с многосоставным источником флюидов. Распространение их и сопутствующих газопроявлений в донных осадках и водной толще определяется сложным сочетанием ряда факторов, среди которых значимая роль отводится распространению и мощности толщ субаквальных многолетнемерзлых пород, подстилающих их толщ подмерзлотных и приповерхностных глубоководных газогидратов. На плотность флюидогенных форм на дне оказывают влияние условия залегания нефтегазоносных структур и пород с коллекторскими свойствами, а также приток пресных вод суши вдоль подошвы многолетней мерзлоты на шельфе, степень засоленности донных отложений и температура придонных вод. Кроме того, флюидогенному морфолитогенезу способствует наличие структурных каналов для притока флюидов к поверхности в виде разломов и газовых труб в разрезе отложений с возможным вкладом струйного эффекта дегазации в новообразование мерзлых пород, сопровождающееся пучением дна. Морфологические различия в строении флюидогенных форм связываются, помимо обозначенных выше факторов, еще и с историей геологического развития шельфа, в частности со временем затопления дна в ходе голоценовой трансгрессии и воздействием ледниковых покровов.

Ключевые слова: дегазация, покмарки, пингоподобные формы, газопроявления, акустические аномалии, морфолитогенез, флюиды

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.8

ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие методов морских геолого-геофизических исследований в последние десятилетия, приведшее к увеличению детальности получаемых данных, площади пространственного охвата и разрешения по глубине, способствовало получению сведений о ранее неизвестных формах рельефа и рельефообразующих процессах на дне Мирового океана. В частности, в пределах шельфовых зон были обнаружены районы разгрузки флюидов, связанные с деградацией газогидратов [Астахов и др., 2014; Waage et al., 2019; 2020], та-

янием субаквальных многолетнемерзлых пород [Paull et al., 2007; 2022], истечением грунтовых вод [Gwiazda et al., 2019; Paull et al., 2022], грязевым вулканизмом и притоком глубинных углеводородов [Иванов, 1999]. При этом дегазация нередко сопровождается формированием специфических положительных и отрицательных форм рельефа. К первым относятся пингоподобные формы (от англ. pingo-like features) [Shearer et al., 1971; Paull et al., 2007], купола газового пучения (domes), газогидратные и грязевые вулканы и диапиры [Milkov, 2000], ко вторым – покмарки (от англ. rockmark), или газовые

воронки [Chand et al., 2009, 2012; Rise et al., 2015]. Механизм образования этих форм слабо изучен и в настоящее время связывается с поступлением из недр флюидов различного генезиса, развитием процессов пучения донных отложений (положительные формы) [Бондарев и др., 2002; Paull et al., 2007], выбросом флюидов и донных грунтов с образованием кратеров (отрицательные формы) [Waage et al., 2020] и образованием специфических отложений (сопочных брекчий, газо- и газогидратонасыщенных осадков, биохемотрогенных отложений и проч.) [Миронюк, 2020; Astrom et al., 2020]. Образуются на дне, флюидогенный рельеф (предложен в качестве самостоятельного генетического типа С.Г. Миронюком [Миронюк, 2020]) подвергается воздействию донных течений, местами – экзарации, на склонах флюидогенных форм развиваются склоновые процессы [Кохан и др., 2023]. На активность процессов дегазации в районах распространения флюидогенного рельефа указывают фиксируемые визуально и геофизическими методами газопроявления в водной толще и донных осадках. Дегазация приводит к изменению мутности воды (за счет подъема флюидами тонкодисперсных осадков со дна), появлению областей выноса / аккумуляции взвеси и дифференциации скоростей осадконакопления на дне акваторий. Кроме того, под действием потока флюидов происходят вещественные и текстурные изменения в донных отложениях, а на поверхности дна возникают оазисы жизни, где фиксируется увеличение видового разнообразия бентоса и микробиальных сообществ, что отражается в составе продуктов морского седиментогенеза [Astrom et al., 2020]. Таким образом, процесс дегазации является причиной возникновения особого типа морфолитогенеза на дне – флюидогенного, который, в свою очередь, оказывает воздействие на донные осадки, рельеф и водную толщу.

Флюидогенные формы описаны в разных частях акватории Мирового океана (в том числе, в Арктике), а также в ряде озер (например, на дне Байкала [Van Rensbergen et al., 2002] и Онежского озера [Алешин и др., 2019]). Они идентифицируются на дне с помощью комплекса геолого-геофизических методов. В первую очередь это однолучевое и многолучевое эхолотирование, гидролокация и сейсмоакустическое профилирование. Так, с использованием методов однолучевого эхолотирования, гидролокации и акустического профилирования в рамках региональных геолого-съёмочных работ флюидогенный рельеф был обнаружен в море Бофорта [Shearer et al., 1971]. В Печорском море в дополнение к перечисленным методам при изучении флюидогенных форм проводилось механизированное бурение донных осадков с судна [Бондарев

и др., 2002]. Более поздние работы выполнялись уже с применением многолучевого эхолотирования [Blasco et al., 2013; Paull et al., 2007, 2022; Кохан и др., 2023; Thorsnes et al., 2023]. Этот метод позволяет получить более детальные сведения о площадном распространении и морфологии флюидогенных форм. Кроме того, отдельными исследователями в дополнение к перечисленным выше методам выполнялись сейсмические исследования высокого разрешения [Waage et al., 2019, 2020], пробоотбор, видеосъемка [Baranov et al., 2020] и многолучевое эхолотирование с необитаемых подводных аппаратов [Paull et al., 2022]. При проведении детальных съёмочных работ в рамках исследования флюидогенного рельефа (описание морфологии, характера слагающих отложений, глубинного строения дна в районах дегазации) необходимо комплексирование методов (прежде всего, многолучевого эхолотирования и сейсмопрофилирования на разных частотах) с как можно более высокой детальностью (разрешением).

Некоторые закономерности распространения дегазации и отчасти связанных с ней форм в Российской Арктике подчеркнуты в опубликованных работах отечественных исследователей (например: [Миронюк, Росляков, 2019; Миронюк и др., 2019а, 2019б; Chuvilin et al., 2020]). В то же время нередко упор делается на рассмотрение процесса эмиссии газов в целом, в том числе и с прибрежных скважин (например: [Chuvilin et al., 2020]), а формируемый в результате дегазации рельеф детально не рассматривается. В то же время флюидогенный рельеф является одним из признаков нефтегазоносности на шельфе, поэтому систематизация представлений о его распространении и факторах, влияющих на морфологическое разнообразие, представляется актуальной научной задачей. Целью настоящей работы является обзор и систематизация опубликованных, а также новых авторских данных о флюидогенных процессах и формах рельефа, зафиксированных сопутствующих газопроявлениях на шельфах морей Арктики (отечественных и зарубежных), а также анализ имеющихся сведений для выявления основных факторов, влияющих на распространение и активность флюидогенного морфолитогенеза. Выполненный обзор полностью базируется на опубликованных сведениях, а также некоторых новых данных, полученных непосредственно авторами и публикуемых впервые (материалы были собраны в рамках научно-исследовательских работ Геологического института РАН на НИС «Академик Николай Страхов»). Некоторые из использованных публикаций включают результаты инженерных изысканий, выполнявшихся различными организациями для нефтегазодобывающих компаний [Колюбакин

и др., 2016; МIRONЮК и др., 2019а, 2019б, 2020], государственными агентствами по госпрограммам геологического картирования [Blasco et al., 2013; Thorsnes et al., 2023].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Распространение и строение флюидогенных форм. По имеющимся на данный момент сведениям о локализации на шельфах Арктики флюидогенные формы являются одним из основных видов морфоскульптур, осложняющих поверхность дна. На некоторых участках детальной батиметрической съемки шельфа плотность покмарок и/или пингоподобных форм достигает нескольких штук (реже – десятков) на квадратный километр. В Баренцевом и Карском морях флюидогенные формы зафиксированы и описаны отечественными и зарубежными исследователями в разных частях шельфовой зоны (рис. 1), в море Лаптевых изученность ниже и затрагивает в основном прибрежную часть шельфа, в Восточно-Сибирском и Чукотском морях сведения о флюидогенных формах единичны. В канадском секторе Арктики флюидогенные формы (в частности, пингоподобные поднятия) детально изучены лишь в море Бофорта (рис. 2А), где они и были впервые в мире обнаружены в 1969 г. [Shearer et al., 1971]. Исследование флюидогенного рельефа и слагающих его отложений проводились в течение последних 50 лет разными геолого-геофизическими методами, что стало причиной неоднородности полученных данных по глубинности, разрешению и другим параметрам. В то же время накопленные сведения обширны и позволяют выявить основные закономерности геолого-геоморфологического строения флюидогенных форм на шельфах Арктики.

Баренцево море. Баренцевоморский шельф отличается наиболее высокой геолого-геофизической и геоморфологической изученностью среди морей Арктики, описанный здесь флюидогенный рельеф морфологически разнообразен и представлен покмарками (в том числе кратерообразными впадинами до 400 м в поперечнике), пингоподобными формами (ППФ), а также обширными линейными и изометричными поднятиями дна до 500 м в поперечнике.

Покмарки. Во внутренней юго-западной части шельфа покмарки встречаются повсеместно за исключением Кольского склона непосредственно у Кольского полуострова. Плотность их изменяется в широких пределах: от 1–2 шт./км² в пределах Северо-Баренцево-Карской и Приновоземельской областей (Северо-Восточное плато, плато Литке, Адмиралтейский вал) до 300–350 шт./км² (занимают 70–75% площади дна) в границах Мурманской банки. В Кольском желобе плотность покмарок

составляет порядка 80–100 шт./км² (рис. 2Е). Диаметр покмарок изменяется от 10–15 до 100–110 м, глубина – от первых метров до 8–10 м [МIRONЮК, Росляков, 2019]. На отдельных участках в центральной части моря на возвышенностях, образованных соляными диапирами, плотность покмарок и их размер отличаются повышенными значениями (при глубине до 5–10 м диаметр достигает 300 м). На отдельных участках на склонах Центральной котловины отмечена приуроченность цепочек покмарок к реликтовым бороздам айсбергового выпавивания. Под воздействием придонных течений на склонах Гусиной и Северо-Канинской банок покмарки трансформировались в вытянутые по направлению течений котловины [МIRONЮК, Росляков, 2019]. В ходе работ ГИН РАН на полигонах в Центральной котловине, к югу и северу от банки Тидли, на плато Литке, в Южном Приновоземельском и Кольском желобах [Соколов и др., 2023; Мороз и др., 2023] были обнаружены многочисленные покмарки как сплошного распространения, так и единичные формы диаметром от 15–30 до 150–200 м и глубиной от первых метров до 10–15 м. Широкое распространение покмарок в российском секторе акватории моря было также отмечено в ходе съемочных работ вдоль трасс волоконно-оптической линии связи и трубопровода на Штокмановское нефте-газоконденсатное месторождение, а также на лицензионных участках на нефтегазоносных структурах [МIRONЮК, Росляков, 2019].

Анализ батиметрических и геофизических данных, полученных по программам детального картирования дна юго-восточной части норвежского сектора Баренцева моря, показал широкое распространение здесь разломов, покмарок и флюидоподводящих каналов в форме газовых труб в разрезах. При этом размеры покмарок здесь более скромные – диаметр составляет от 5–10 до 40–50 м (встречаются и удлиненные формы), глубина – от 1–2 до 4–5 м, при этом плотность местами существенно выше – от 100–200 до 700–900 шт./км² [Rise et al., 2015]. Покмарки формируют линейные скопления, сосредоточенные вдоль разломов и реликтовых борозд айсбергового выпавивания, а местами вложенные в более крупные формы диаметром до 300–500 м и глубиной до 10–20 м с крутыми (до 15–25°) склонами [Chand et al., 2009, 2012; Tasianan et al., 2018]. Гигантские покмарки (глубиной до 20–30 и до 300–400 м в поперечнике) были также обнаружены в районе соляного диапира банки Тидли (рис. 2Д). В их осевых частях видеосъемкой с телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА) зафиксированы группы впадин диаметром до 2–3 м, глубиной до 0,5 м, которые, по-видимому, являются сипами (очагами дегазации) [Salt..., 2023].

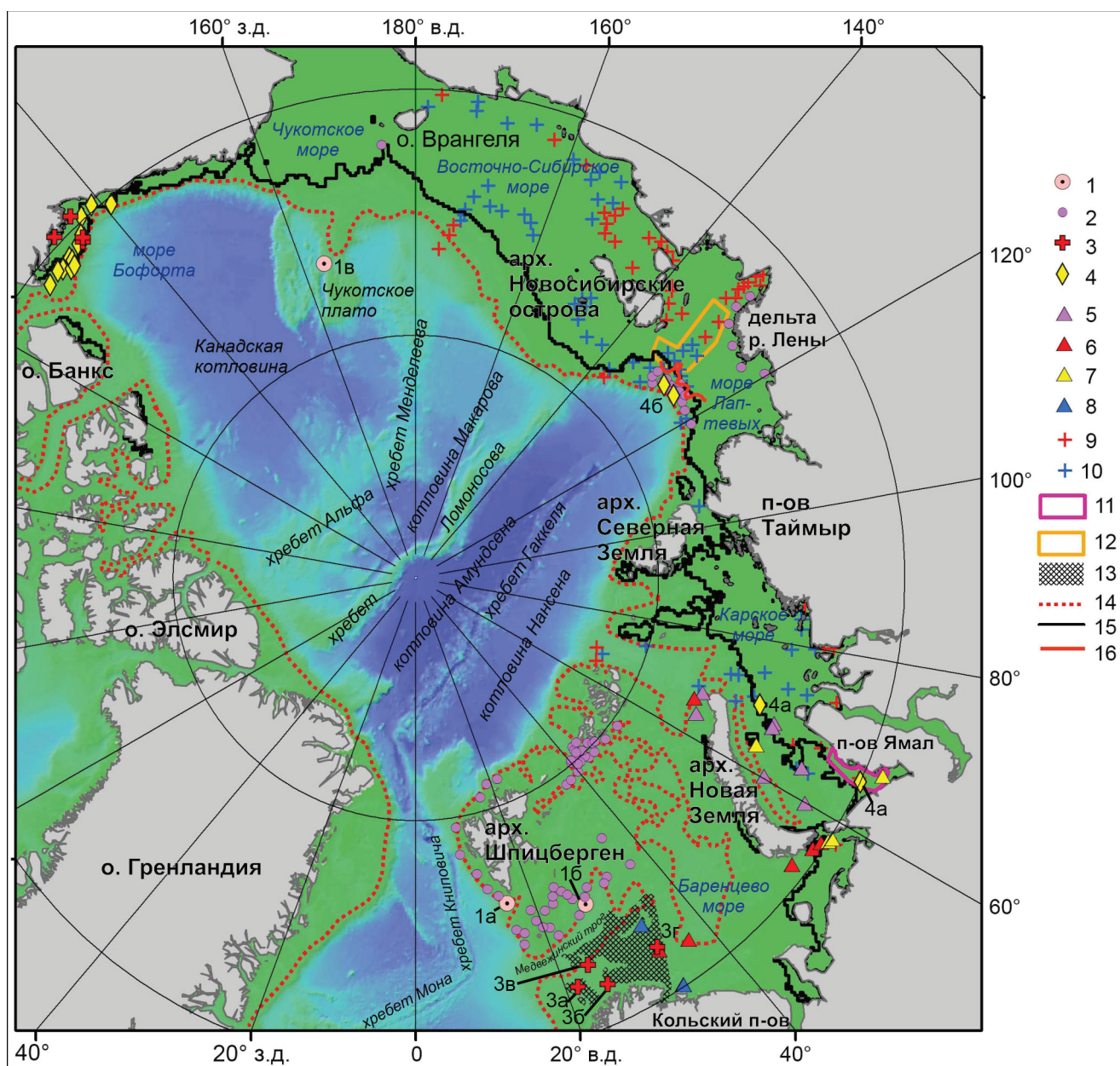


Рис. 1. Участки распространения флюидогенных форм и сопутствующих газопроявлений на шельфах морей Арктики:

1 – гигантские кратеры и поднятия прибрежной части шельфа: 1а – по [Waage et al., 2019]; 1б – по [Waage et al., 2020]; 1в – по [Астахов и др., 2014]; 2 – участки распространения газопоявлений в донных осадках и водной толще; 3 – ареалы покмарок: 3а – по [Chand et al., 2009]; 3б – по [Chand et al., 2012]; 3в – по [Tasianias et al., 2018]; 3г – по [Salt..., 2022]; 4 – ареалы пингоподобных форм: 4а – по [Semenov et al., 2020; Serov et al., 2015]; 4б – по [Baranov et al., 2020; Shakhova et al., 2015]; 5–8 – флюидогенные формы и газопоявления по результатам работ на НИС «Академик Николай Страхов» при участии авторов: 5 – ареалы газопоявлений в водной толще и в разрезе донных осадков; 6 – ареалы покмарок и сопутствующих газопоявлений в водной толще и в разрезе осадков; 7 – ареалы покмарок, пингоподобных форм и газопоявлений в водной толще и в разрезе осадков; 8 – ареалы покмарок без сопутствующих газопоявлений; 9–10 – станции отбора керна и измерения температуры донных отложений по [Bukhanov et al., 2023]: 9 – с положительной температурой донных осадков; 10 – с отрицательной температурой донных осадков; 11–12 – районы работ, флюидогенный рельеф и газопоявления на которых описаны в статьях: 11 – [Portnov et al., 2013]; 12 – [Rekant et al., 2015]; 13 – район картирования покмарок в работе [Rise et al., 2015]; 14 – граница зоны стабильности глубоководных газогидратов (изобаты 300–450 м) по данным [Bogoyavlensky et al., 2018]; 15 – граница распространения субаквальных многолетнемерзлых пород по данным модели [Overduin et al., 2019]; 16 – северная граница распространения субаквальных многолетнемерзлых пород на шельфе по результатам анализа скоростей отраженных волн на разрезах, полученных методом общей глубинной точки, в море Лаптевых [Bogoyavlensky et al., 2023]

Пингоподобные формы (ППФ). В акватории морей российского сектора Арктики ППФ были впервые обследованы в ходе работ ГУП «Арктические морские инженерно-геологические экспедиции» (АМИГЭ) в 1988 г. на полигоне в юго-восточной части Баренцева моря (Печорское море) (обнаружено 50 ППФ до 150 м в поперечнике и высотой 20–25 м) [Бондарев и др., 2002]. В 1995–1996 гг. на данном участке было выполнено бурение (до глубины 25–100 м), сейсмопрофилирование и гидролокация на площади 5×5 км с целью изучения внутреннего строения ППФ. Установлено, что ППФ сложены позднеплейстоценовыми казанцевскими пластично-мерзлыми сильнольдистыми глинами, суглинками и ледогрунтами с объемной льдистостью до 50–90%. При этом на глубинах более 50 м от поверхности дна льдистость осадков снижается до 30% и менее [Бондарев и др., 2002]. Скважиной, пробуренной на валобразном поднятии (нередко ППФ насажены именно на такие валы), на глубине 47 м от поверхности дна была вскрыта зона аномально высокого пластового давления в газонасыщенной талой толще, представленной предположительно зырянскими аллювиальными песками. В результате мощного выброса газогрунтового-водяной смеси бурение было прекращено, в течение 10 дней наблюдался газовый фонтан в водной толще, и образовалась воронка глубиной до 3 м и шириной до 15 м, сохранившаяся в рельефе дна до сих пор [Тулапин и др., 2021].

Спустя почти 20 лет (в 2018–2019 гг.) геолого-геофизические работы на этом полигоне и в его окрестностях (общая площадь съемки – 150 км²) были продолжены в ходе рейсов НИС «Академик Николай Страхов». С применением многолучевого эхолотирования и непрерывного сейсмопрофилирования установлено наличие порядка 850 ППФ высотой от 1,5–3 до 20–25 м, в диаметре (или по длинной оси для вытянутых форм) – от 20–30 до 300–430 м. Плотность ППФ на дне изменяется здесь от 20–25 до 35–45 шт./км². Нередко ППФ при-

урочены к линейным валобразным поднятиям дна высотой до 8–10 м и шириной до 700 м. В границах полигона установлены многочисленные газопоявления в донных осадках и водной толще, при этом покмарки на дне встречались крайне редко (см. рис. 2Б) [Кохан и др., 2023]. Обследование соседних участков дна (в 7 км к юго-востоку), выполненное в 2020 г. НИС «Академик Николай Страхов» и в 2022 г. НИС «Академик Борис Петров», также установило широкое распространение ППФ на дне. При этом размеры обнаруженных форм несколько более скромные: высота – от 1–2 до 12–14 м, диаметр (или длинная ось для вытянутых форм) от 30–40 до 120–135 м, крутизна склонов – в среднем 10–15°. В водной толще зафиксированы 162 акустические аномалии факельного типа, ассоциируемые с подъемом флюидов.

Прочие формы. С процессом дегазации в западной части Баренцевоморского шельфа связывается образование и более крупных форм, таких как кратерообразные впадины и поднятия дна. Так, в прибровочной части шельфа к югу от архипелага Шпицберген на глубинах 340–370 м обнаружены семь поднятий диаметром от 200–300 до 500 м и высотой 7–10 м [Waage et al., 2019]. На северном борту северо-восточной части Медвежинского трога на глубинах 320–370 м зафиксировано более сотни кратерообразных впадин диаметром от 300 до 1000 м и глубиной до 30–35 м (см. рис. 2Г). На бортах и вдоль бровок впадин располагаются поднятия округлой или удлиненной формы длиной/шириной в сотни метров и высотой до 20 м [Waage et al., 2020]. В водной толще практически над всеми поднятиями и кратерообразными впадинами наблюдаются акустические аномалии факельного типа, связанные с подъемом флюидов.

Карское море. Сведения о флюидогенном рельефе Карского шельфа пока немногочисленны в опубликованной литературе, что связано с более низкой в целом геолого-геофизической изученностью

Fig. 1. Areas of distribution of fluidogenic forms and accompanying gas manifestations on the shelves of the Arctic seas: 1 – giant craters and domal rises of the shelf edge: 1a – after [Waage et al., 2019]; 1б – after [Astakhov et al., 2014]; 2 – areas of gas manifestations in bottom sediments and water column; 3 – areas of pockmarks: 3a – according to [Chand et al., 2009]; 3б – according to [Chand et al., 2012]; 3в – according to [Tasianas et al., 2018]; 3г – according to [Salt..., 2022]; 4 – areas of pingo-like features: 4a – according to [Semenov et al., 2020; Serov et al., 2015]; 4б – according to [Baranov et al., 2020; Shakhova et al., 2015]; 5–8 – fluidogenic forms and gas manifestations based on the results of investigations on the R/V “Akademik Nikolai Strakhov” with participation of the authors: 5 – areas of gas manifestations in water column and the section of bottom sediments; 6 – areas of pockmarks and associated gas manifestations in water column and the section of sediments; 7 – areas of pockmarks, pingo-like features and gas manifestations in water column and the sediment section; 8 – areas of pockmarks without accompanying gas manifestations; 9–10 – stations for core sampling and measurements of the temperature of bottom sediments according to [Bukhanov et al., 2023]; 9 – with positive; 10 – with negative temperatures of bottom sediments; 11–12 – areas of surveys with the fluidogenic bottom forms and gas shows described in the articles: 11 – [Portnov et al., 2013]; 12 – [Rekant et al., 2015]; 13 – area of pockmarks mapping in [Rise et al., 2015]; 14 – boundary of the stability zone of deep-sea gas hydrates (isobaths 300–450 m) according to [Bogoyavlensky et al., 2018]; 15 – boundary of distribution of subaqueous permafrost rocks according to the model data [Overduin et al., 2019]; 16 – northern limit of subaquatic permafrost on the Laptev Sea shelf based on the results of analysis of reflected wave velocities on sections obtained by the common depth point method [Bogoyavlensky et al., 2023]

региона. Так, детальными съемками покрыт преимущественно южный сектор дна, отличающийся сравнительной мелководностью.

Покмарки. В сравнении с Баренцевоморским шельфом покмарки на обследованной части дна Карского моря распространены более ограничено и

не образуют крупных скоплений. Так, в юго-западной части шельфа они встречаются в районе нефтегазоносной структуры Университетской [Миронюк, Росляков, 2019], где представляют собой блюдцеобразные понижения дна диаметром до 30–50 м и глубиной до 3–4 м, расположенные над газовыми

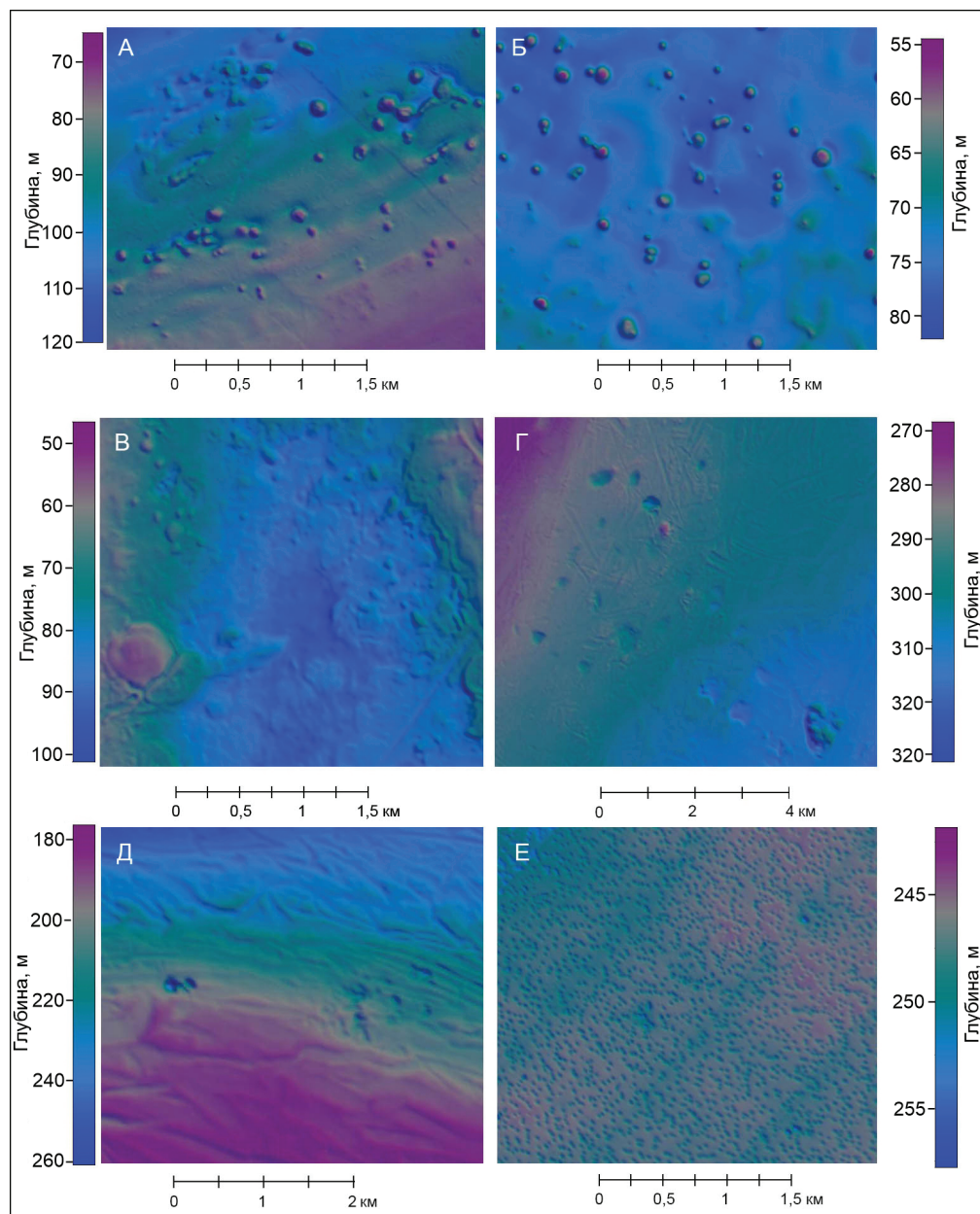


Рис. 2. Морфология флюидогенного рельефа, распространенного на шельфах Арктики:

А – пингоподобные формы внешней части шельфа моря Бофорта [Paull et al., 2022]; Б – пингоподобные формы юго-восточной части Баренцева моря [Кохан и др., 2023]; В – пингоподобные формы восточной части Карского шельфа в районе нефтегазоносной структуры «Университетская» [Кохан и др., 2023]; Г – кратеры (гигантские покмарки) и поднятия дна на склоне Медвежинского желоба в западной части Баренцева моря [Waage et al., 2020]; Д – гигантские покмарки на соляном диапире банки Тидли (Баренцево море) [Salt..., 2022]; Е – покмарки на дне Кольского желоба Баренцева моря [Сokolov et al., 2023]

Fig. 2. Morphology of fluidogenic relief common within the Arctic shelves:

А – pingo-like features of the outer part of the Beaufort Sea shelf [Paull et al., 2022]; Б – pingo-like features of the southeastern part of the Barents Sea [Kokhan et al., 2023]; В – pingo-like features of the eastern part of the Kara Sea shelf in the area of the Universitetskaya oil and gas bearing structure [Kokhan et al., 2023]; Г – craters (giant pockmarks) and bottom rises on the slope of the Medvezhinsky Trench in the western part of the Barents Sea [Waage et al., 2020]; Д – giant pockmarks on the salt diapir of the Tidley Bank (Barents Sea) [Salt..., 2022]; Е – pockmarks on the bottom of the Kola Trench of the Barents Sea [Sokolov et al., 2023]

трубами на сейсмических разрезах. Единичные покмарки, зафиксированные на этом же полигоне в ходе рейсов НИС «Академик Николай Страхов» и НИС «Академик Борис Петров» в 2020–2022 гг., также отличаются небольшими размерами (до 60–70 м в поперечнике, глубиной до 2–3 м) [Кохан и др., 2023].

Пингоподобные формы. Результаты исследований последнего десятилетия позволяют заключить, что ППФ являются более распространенными формами на дне Карского моря в сравнении с покмарками. Так, по результатам региональных съемочных работ по сети профилей общей длиной около 1300 км в южной части Карского моря (глубины от 5–10 до 45–50 м) установлены границы ареалов газонасыщенных донных осадков и газопроявления в водной толще, а также зафиксированы несколько ППФ [Portnov et al., 2013]. Встречены они и на севере центральной части Карского моря [Serov et al., 2015]. Морфологически ППФ представляют собой изометричные поднятия дна высотой до 5–8 м и диаметром от 100–120 до 700–800 м, расположенные в диапазоне глубин от 30 до 40–45 м. В пределах мелководья центральной части Байдарацкой губы (15–30 м) и на Ямало-Гыданском мелководье [Миронюк и др., 2019а] ППФ имеют близкие морфометрические параметры – до первых сотен метров в поперечнике, высота – от 8–10 до 20–25 м (см. рис. 2В) [Кохан и др., 2023]. При этом газопроявления в водной толще над ППФ не выражены вовсе, в то время как в разрезе донных осадков отчетливо фиксируются многочисленные признаки флюидогенной активности (акустические аномалии типа «яркое пятно» и вертикальные осветления типа газовых труб). По результатам акустического профилирования ППФ предположительно сложены мерзлыми / газонасыщенными зырянскими песками, а в окружающих их компенсационных впадинах залегают талые морские голоценовые илы, глины, суглинки и пески [Кохан и др., 2023]. ППФ на границе Русановской террасы и Ямальского мелководья сложены до глубины порядка 10 м глинистым илом [Миронюк и др., 2019а], в южной части Карского моря [Serov et al., 2015] до глубины 1,1 м – илами и текучими глинами с прослоями пылеватых песков и супесей.

Вблизи Новоземельского желоба, где глубины составляют от 50 до 120 м, около 60 ППФ зафиксированы на структуре Университетская в ходе работ на НИС «Академик Николай Страхов». Это округлые в плане куполовидные постройки в среднем до 100 м в диаметре, высотой до 6–7 м. Единичные ППФ имеют гораздо более внушительные размеры и куполовидный поперечный профиль, высота их достигает 20–25 м, диаметр – 450–500 м. Отличительной чертой крупных ППФ является наличие на

их вершинной поверхности воронкообразного понижения глубиной до 3 м и диаметром до 50–80 м [Кохан и др., 2023]. На отдельных участках в интервале глубин 5,5–10,0 м от поверхности дна выявлены реликтовые льдистые мерзлые грунты. Их распространение носит островной характер. Участки субаквальной криолитозоны предположительно находятся в настоящее время в стадии деградации [Миронюк и др., 2019а]. ППФ на данном участке сложены акустически практически непроницаемой толщей с поверхности дна (по-видимому, мерзлой и/или сильно газонасыщенной, в отсутствие материалов бурения точно установить это невозможно). На соседствующих с ППФ участках дна залегают частично проницаемые слоистые глинистые и глинисто-песчаные осадки, в толще которых установлены акустические аномалии типа «яркое пятно», связанные с газонасыщенностью [Кохан и др., 2023].

Море Лаптевых. Сведения о флюидогенном рельефе на шельфе моря Лаптевых в опубликованной литературе единичны, однако высокая активность процессов дегазации подтверждается многочисленными газопроявлениями, зафиксированными в воде и осадочной толще в разных частях акватории. Так, в прибрежной части шельфа на глубинах 65–70 м и более зафиксированные газопроявления приурочены к террасовидным субгоризонтальным поверхностям, разбитым современными тектоническими нарушениями. Вертикальные акустические аномалии факельного типа обнаружены в толще воды и на отдельных участках доходили до поверхности моря, ширина их достигала 100–150 м. На одной из обследованных площадей было установлено 46 таких вертикальных аномалий диаметром от 10–15 до 300–350 м, в том числе 15 – диаметром более 100 м. Обследование дна на участках газопроявлений с помощью ТНПА не выявило каких-либо сопутствующих крупных форм рельефа типа ППФ или покмарок. Истечение газа наблюдалось из небольших отверстий диаметром в первые сантиметры в преимущественно песчаной поверхности дна [Babanov et al., 2020; Shakhova et al., 2015]. По результатам геофизических работ АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (МАГЭ) методом общей глубинной точки (ОГТ) на глубинах более 50–60 м также установлены многочисленные очаги газонасыщения осадков в верхней части разреза (до глубин 200–300 м от поверхности дна), нередко приуроченные к тектоническим разломам [Bogoyavlensky et al., 2023].

В центральной части шельфа моря Лаптевых на участках с глубинами порядка 55–65 м были обнаружены отдельные округлые в плане поднятия куполовидной формы диаметром в среднем 15–20 м и высотой около 0,5–2,0 м, на отдельных участках

наблюдались поля сходных по размерам впадин, интерпретируемых как покмарки [Колюбакин и др., 2016]. В ходе инженерно-гидрографических работ с участием одного из авторов настоящей статьи на участках в центральной части моря Лаптевых (глубина 50–70 м) в зоне повышенной тектонической трещиноватости наблюдались многочисленные щитовидные округлые в плане поднятия диаметром от 50–100 до 250–300 м и высотой до 3,5–4,0 м. Вершинные поверхности поднятий осложнены воронками глубиной до 2 м и диаметром до 25–40 м, над отдельными поднятиями наблюдались газопроявления в водной толще. Повсеместно участки развития этих форм сопровождалась полями покмарок.

По результатам работ в *восточной части шельфа* в секторе палеодолины р. Лены и на ее склонах зафиксированы многочисленные ассоциируемые с газонасыщенностью акустические аномалии в разрезе донных осадков на глубину до 30–35 м [Rekant et al., 2015]. Результаты геофизических исследований позволили установить широкое распространение на дне многолетнемерзлых пород, залегающих на глубинах от 0–1 до 20–25 м (от поверхности дна). Наиболее обширные участки распространения газопроявлений в толще донных осадков зафиксированы в днище палеодолины Лены, при этом кровля газонасыщенных осадков нередко залегает вблизи поверхности дна. Предполагается, что в осевых частях погребенных термокарстовых западин и в днище палеодолины р. Лены могут существовать сквозные талики, в последнем случае – крупный, тектонически обусловленный сквозной талик, связанный с высоким тепловым потоком в границах одного из рифтов системы рифтовых впадин моря Лаптевых. Дополнительным подтверждением этого служат высокие концентрации метана в воде на участке палеодолины [Shakhova et al., 2015]. О проявлениях процессов дегазации в рельефе морского дна авторами работы [Rekant et al., 2015] не сообщалось. В южной и восточной частях моря Лаптевых об активной дегазации свидетельствует сравнительно высокое содержание метана в образцах воды, льда, осадков, а также в воздухе [Shakhova et al., 2013].

В *прибрежной части шельфа* моря Лаптевых с глубинами до 10 м многочисленные газопроявления были зафиксированы в пределах аванделът рек Лена и Оленек. Дегазация сопровождается здесь формированием полей небольших сипов с практически полным проективным покрытием обследованной площади (зарегистрировано около 27 тыс. отдельных газопроявлений различной интенсивности на протяжении порядка 2000 км галсов съемки) [Shakhova et al., 2013].

Восточно-Сибирское море. Опубликованные сведения о флюидогенных формах рельефа на дне

Восточно-Сибирского моря на данный момент отсутствуют, что отчасти связано с существенно более низкой геолого-геофизической изученностью региона. Региональные сейсмические исследования, выполненные АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» методом ОГТ по серии профилей на участках с глубинами более 50 м позволили установить гораздо более малочисленные, нежели в море Лаптевых, очаги газонасыщения в верхней части разреза (до 200–300 м от поверхности дна) [Bogoyavlensky et al., 2023], при этом тектонических разломов зафиксировано не было. В то же время в рельефе дна были обнаружены многочисленные углубления до 1,5–2 км в поперечнике (по профилям) и глубиной до 10–20 м. Почти под всеми этими углублениями потенциально газонасыщенные объекты и тектонические нарушения отсутствуют. Имеющихся данных для однозначной генетической интерпретации этих форм пока недостаточно, и потенциально они могут представлять собой реликтовые борозды ледового выпаживания или флюидогенные кратеры.

Чукотское море. Сведения о дегазации на шельфе Чукотского моря отрывочны. В 2014 г. в ходе работ экспедиции SWERUS в районе трога Геральда на глубинах 50–95 м в водной толще зафиксировано 89 вертикальных акустических аномалий «факельного типа», ассоциируемых с подъемом флюидов. Эти газопроявления приурочены преимущественно к бортам трога, имеющим тектоническую природу [Weidner et al., 2019]. В южной части погруженного краевого Чукотского плато с отметками глубин порядка 500–580 м были обнаружены конусовидные кратеры (150–850 м в диаметре и глубиной до 40–50 м) [Астахов и др., 2014]. Кратеры приурочены к локальным разломным зонам, нередко выстраиваются в цепочки. Изучение керна (мощностью до 2 м) донных осадков в днищах кратеров показало, что эти формы образовались в период 15–30 тыс. лет назад под действием притока флюидов по разломным зонам в сочетании с хемогенными и склоновыми процессами. На состав осадков влияли и грязевулканические процессы с возможными кратковременными выбросами материала и образованием прослоев соответствующих брекчий [Астахов и др., 2014]. Отдельные кратеры окружают куполовидное поднятие дна высотой около 20 м и до 3 км в поперечнике. Область развития этих предположительно флюидогенных форм приурочена к более крупному поднятию дна относительной высотой порядка 40–50 м и до 10 км в диаметре. Признаков присутствия газа в отложениях или в водной толще на участке развития кратеров отмечено не было. Следов газогидратов не было обнаружено.

Море Бофорта. Флюидогенный рельеф на шельфе моря Бофорта был обнаружен в конце 1960-х гг. и представлен покмарками и пингоподобными формами.

Покмарки зафиксированы в прибрежной части шельфа на глубинах до 10 м (диаметр их составляет до 15 м, глубина – до 3–4 м), вдоль одной из разломных зон во внутренней и вдоль прибровочной внешней части шельфа (до 20–30 м в диаметре и до 2–3 м в глубину). Повторные съемки на участках развития покмарок показали новообразование некоторых форм, а также наличие над ними газопроявлений в водной толще [Blasco et al., 2013].

Пингоподобные формы были впервые обнаружены на шельфе в 1969 г. в ходе гидролокационного обследования и съемок дна однолучевым эхолотом по сетке региональных съемочных профилей [Shearer et al., 1971]. Было выдвинуто предположение, что ППФ имеют субаэральное криогенное происхождение и сохранились на дне в ходе голоценовой трансгрессии как реликтовые сухопутные бугры пучения. Позднее методами многолучевого эхолотирования и сейсмоакустического профилирования в регионе моря Бофорта было закартировано более 1000 ППФ и выделены две разновидности этих форм, приуроченных к внешней (небольшие формы) и внутренней (крупные формы) частям шельфа [Blasco et al., 2013; Paull et al., 2022]. Во внешней части шельфа с глубинами от 75 до 200 м располагается зона развития ППФ шириной от 1,5 до 5 км субпараллельная бровке шельфа. Она отличается сильно пересеченным рельефом с высокой плотностью ППФ (диаметром от 70 до 180 м, высотой от 5 до 25 м) и впадин (до 200 м в поперечнике, глубиной в первые метры) (см. рис. 2А). ППФ, распространенные во внутренней части шельфа (глубины менее 75 м), крупнее (до 1,5–2 км в поперечнике и высотой 40–50 м) и окружены компенсационными впадинами глубиной до 10–12 м, заполненными слоистыми морскими осадками мощностью до 30–70 м. ППФ сгруппированы в кластеры и сосредоточены вдоль разломных зон (к примеру, в трогe Маккензи) и на участках с предполагаемой пониженной мощностью субаквальных ММП [Blasco et al., 2013]. По результатам мониторинга дна с применением необитаемых подводных аппаратов установлено, что при прекращении притока флюидов в течение нескольких лет некоторые ППФ трансформируются в округлые в плане впадины глубиной до 15 м [Paull et al., 2022]. Опробованием ППФ гравитационными трубками получен керн длиной 1–5 м как на их вершинах, так и в компенсационных впадинах. Установлено, что ППФ сложены переслаиванием позднеплейстоценовых талых песков и суглинков, сильнольдистых суглинков и ледогрунтов с объемной льдистостью

от 10–30 до 70–90%. Отложения окружающих ППФ компенсационных впадин представлены морскими голоценовыми текучими глинами и илами с прослоями, обогащенными органическим материалом и остатками ракушек [Paull et al., 2007]. Молекулярный состав и изотопия углерода в составе метана газовых выбросов указывают на газогидратное (подмерзлотное и внутримерзлотное) происхождение флюидов [Paull et al., 2007]. Результаты опробования в последние годы [Gwiazda et al., 2019] показали, что в донных осадках на участке развития ППФ в большом количестве содержатся пресные поровые воды, причем их содержание возрастает по мере увеличения глубины моря.

Механизм образования флюидогенных форм и его связь с газопроявлениями на шельфе. Опубликованные материалы свидетельствуют о наличии на дне арктических морей флюидогенных форм, различающихся по морфологии и внутреннему строению, в частности покмарок, ППФ, комплексов поднятий и кратеров в относительно глубоководных частях шельфа. На большинстве участков их распространения установлены газопроявления в донных осадках и в водной толще, что позволяет заключить, что процесс дегазации является определяющим в развитии этих форм. Наличие газопроявлений с высокой вероятностью позволяет ожидать в районе их развития присутствия на дне флюидогенных форм того или иного ранга (от мезо- до наноформ). Установленные выше закономерности пространственного развития и внутреннего строения флюидогенных форм разных видов позволяют сделать некоторые выводы о механизме их образования и современной активности флюидогенного морфолитогенеза.

Покмарки. Широкое распространение покмарок характерно для Баренцевоморского шельфа, в особенности для участков развития немерзлых осадков морского, озерного, аллювиально-морского и ледниково-озерного генезиса. Там, где мощность этих толщ снижается до 5 м и менее, плотность покмарок резко сокращается или они вообще не выражены [Rise et al., 2015]. На таких участках не установлено связи плотности покмарок на дне с распространением дочетвертичных отложений с коллекторскими свойствами, а также с плотностью зафиксированных газопроявлений в донных осадках и водной толще. Исключение составляют разломные зоны и участки нефтегазоносных структур, где установлена современная флюидогенная активность. Наличие каналов, подводящих флюиды в виде газовых труб в разрезе, разломов и источников флюидов в форме диапиров, нефтегазоносных структур и неглубокого залегания коренных пород с коллекторскими свойствами играет решающую роль для современного

развития этих форм [Chand et al., 2009, 2012; Tasianan et al., 2018; Миронюк, Росляков, 2019; Мороз и др., 2023; Соколов и др., 2023]. В таких районах участки с повышенной плотностью покмарок, как правило, сосредоточены вдоль линейных тектонических нарушений, в разрезах и водной толще фиксируются акустические аномалии, связанные с подъемом флюидов. Так, установлено наличие сложной флюидопроводящей системы на участках нефтегазовых месторождений в Норвежском секторе Баренцева моря [Chand et al., 2009, 2012; Tasianan et al., 2018]. Глубинные флюиды проникают к поверхности дна по разломам в коренных консолидированных отложениях в сосредоточенной форме и по рыхлым глинистым четвертичным осадкам – в диффузной форме. В приповерхностном слое донных осадков разгрузка газов происходит через покмарки, в том числе насаженные на борозды айсбергового выпавивания. На участках повышенной активности дегазации (в зонах высокой трещиноватости, в местах пересечения тектонических разломов) формируются гигантские покмарки с вложенными в них скоплениями более мелких форм.

Установленные закономерности позволяют заключить, что не все покмарки, зафиксированные на дне арктических морей, являются современными активными формами. По-видимому, значительная часть их образовалась в недавнем геологическом прошлом, после снятия ледниковой нагрузки (на Баренцевоморском шельфе) и деградации газогидратов в верхней части разреза. Таким образом, многие покмарки можно считать реликтовыми образованиями, на отсутствие их современной динамики указывает отсутствие газопроявлений в донных осадках и водной толще, а также, нередко, перекрытие их голоценовыми морскими отложениями.

Кратеры и поднятия дна в области погруженного шельфа, описанные в работах [Waage et al., 2019, 2020; Астахов и др., 2014], по-видимому, представляют собой формы одного порядка, происхождение которых также связано с дегазацией. Крупные флюидогенные кратеры (иногда именуемые гигантскими покмарками) приурочены к участкам наиболее активного флюидного потока на флангах структурных поднятий шельфа и на участках разломных зон, сочетающихся с близким к поверхности залеганием газогидратов (см. рис. 1). Для этих районов характерна сравнительно малая мощность четвертичных ледниковых и морских отложений – от 5–10 до 50–150 м [Waage et al., 2019; Waage et al., 2020], близкое залегание к поверхности дна триасовых, девонских и более древних отложений, обладающих коллекторскими свойствами. Современная тектоническая активность также является причиной повышенной мощности флюидопотока. Так, указанные

формы широко развиты близ бровки западной части Баренцевоморского шельфа в границах разломной зоны Хорнсунд. Агградация / деградация газогидратов служит дополнительным источником флюидов и триггером процессов пучения / проседания с образованием поднятий и кратеров. Механизм их формирования представляется следующим. Флюиды, мигрирующие из дочетвертичных отложений, проникают к поверхности по разломам и накапливаются под подошвой слабопроницаемых четвертичных преимущественно глинистых отложений. На участках, где их давление превысило критические значения, в толще слабопроницаемых четвертичных отложений сформировались подводящие каналы в форме газовых труб. В приповерхностной части разреза флюиды трансформировались в газогидраты и карбонатные отложения, накопление которых сопровождалось уменьшением плотности и увеличением объема осадков с формированием поднятий. Деградация газогидратов в дальнейшем могла приводить к обрушению поднятий и формированию кратеров (гигантских покмарок). При этом эмиссия флюидов в их центральных частях блокировалось обвальными накоплениями, что приводило к росту поднятий по периферии кратеров. По всей видимости, поднятия и кратеры формируют единый парагенез форм с комплексной морфоскульптурой, о чем говорит нахождение склоновых отложений и грязевых брекчий в кернах [Астахов и др., 2014]. На западной периферии Баренцевоморского шельфа эти формы являются достаточно активными, что фиксируется многочисленными газопроявлениями, а в прибровочной части Чукотского шельфа, вероятно, представляют собой реликтовые образования.

Пингоподобные формы. Несмотря на достаточно широкое распространение ППФ на арктических шельфах, общепринятого мнения о механизме образования этих форм до сих пор нет. На основании полученных данных о строении ППФ на шельфе моря Бофорта была предложена гипотеза об их субаквальном формировании в результате таяния газогидратных залежей в ходе голоценовой трансгрессии [Paull et al., 2007]. Таяние газогидратов привело к формированию зон аномально высокого пластового давления и вовлечению пластичных высокольдистых отложений в движение вверх по разрезу по ослабленным зонам и участкам пониженной мощности многолетнемерзлых пород.

С учетом данных о наличии притока пресных вод к поверхности дна во внешней части шельфа моря Бофорта была предложена гипотеза, подразумевавшая значимое участие пресных вод в образовании ППФ [Gwiazda et al., 2019]. Предполагается, что пресные воды поступают к поверхности дна в результате таяния газогидратов и многолетнемерзлых

пород, а также с суши вдоль подошвы многолетней мерзлоты. Близ поверхности дна они замерзают из-за отрицательной температуры придонных вод и формируют льдистые отложения, вовлекая в процесс пучения окружающие осадки, что приводит к образованию ППФ как исключительно криогенных форм на дне. Возможность развития такого процесса подтверждена модельными расчетами [Frederick, Buffett, 2016]. Таким образом, участие притока пресных вод в качестве одного из факторов образования ППФ нельзя исключать в юго-восточной части Баренцева моря (близ устья р. Печоры), Карского моря (близ западного побережья п-ова Ямал), а также в море Лаптевых, где установлен значительный приток пресных вод через сквозные талики в Усть-Ленском рифте к востоку от дельты р. Лены [Charkin et al., 2017]. Формирование льдистых пород в привершинной части ППФ может быть связано с охлаждением слагающих грунтов придонными водами (с отрицательной температурой) при снижении потока флюидов [Serov et al., 2015]. В этом случае, наличие мерзлой «покрышки» указывает на отсутствие активной дегазации. В целом придонная температура вод, по-видимому, является важным условием образования ППФ на шельфах Арктики. По данным [Bogoyavlensky et al., 2018], во всех арктических морях наблюдаются отрицательные температуры придонных вод. Исключение составляют юго-западная и южная части Баренцева моря, а также заливы и губы (Байдарацкая, Енисейская, Обская, Хатангский и др. восточная часть Чукотского моря), где велико отепляющее влияние рек [Bukhanov et al., 2023].

Гипотеза, предложенная В.П. Бондаревым и соавторами [Бондарев и др., 2002], связывает формирование ППФ с таянием многолетнемерзлых пород снизу (в частности, в юго-восточной части Баренцева моря). Предполагается, что этот процесс сопровождается формированием талого газонасыщенного осадка и избыточного давления на подошву мерзлоты. Несмотря на невысокую мощность, толща мерзлых пород на дне выступает как покрышка, блокирующая миграцию флюидов к поверхности, что приводит к выжиманию глинистых осадков по ослабленным зонам в толще мерзлых пород к поверхности и формированию ППФ. Концептуально эта модель схожа с моделью [Paull et al., 2007], только здесь действующим фактором выступают газы тающих многолетнемерзлых пород, а в работе [Paull et al., 2007] – газогидраты. Также с таянием многолетней мерзлоты на шельфе и сопутствующим увеличением порового давления в грунтах связывается образование ППФ на шельфе моря Лаптевых, при этом предполагается, что стадия формирования ППФ предшествует образованию покмарок [Колюбакин и др., 2016].

В работе [Мельников и др., 1998] отмечается, что одним из возможных механизмов формирования льдистых пород, слагающих ППФ, является «промораживание» вмещающих донных осадков поднимающимся из глубинных нефтегазоносных структур газом за счет его расширения и дроссельного эффекта Джоуля–Томпсона, приводящего к падению температуры грунта вокруг канала истечения газа. По результатам моделирования, в ходе этого процесса под ППФ формируется колонна льдонасыщенных грунтов с убыванием льдистости вниз по разрезу. Эта закономерность в изменении льдистости подтверждена бурением в юго-восточной части Баренцевоморского шельфа [Бондарев и др., 2002].

Наличие в разрезах ППФ глинисто-ледяных брекчий (по данным [Бондарев и др., 2002]) в отдельных работах [Крапивнер, 2007] связывается в диапиризм и грязевым вулканизмом, в частности, в границах Вашуткино-Талотинской надвиговой зоны юго-восточной части Баренцевоморского шельфа.

Таким образом, имеющиеся сведения указывают на зависимость локализации районов распространения ППФ и их морфологии от геолого-тектонической позиции, наличия и характера многолетней мерзлоты, интенсивности дегазации, а также времени затопления конкретного участка шельфа в ходе голоценовой трансгрессии [Кохан и др., 2023]. Полученные к настоящему времени сведения позволяют уверенно связать образование ППФ на шельфе с пучением и выдавливанием пород под действием потока флюидов из недр в районах распространения многолетнемерзлых пород.

ВЫВОДЫ

Источники флюидов, разгрузка которых приводит к образованию покмарок, ППФ и прочих форм, по имеющимся данным могут быть как приповерхностные, так и глубинные. На это указывает присутствие в составе флюидов как термогенных глубинных, так и биогенных газов [Sapart et al., 2017; Semenov et al., 2020; Serov et al., 2015; Steinbach et al., 2021]. Флюиды образуются в результате таяния многолетнемерзлых пород, разложения газогидратов, подтока к поверхности пресных вод, а также поступают из пород с коллекторскими свойствами и нефтегазоносных структур [Соколов и др., 2023; Semenov et al., 2023; Thorsnes et al., 2023 и др.].

Имеющиеся сведения позволяют заключить, что флюидогенные формы являются комплексными образованиями с многосоставным источником флюидов. Распространение этих форм и сопутствующих газопроявлений в донных осадках и водной толще определяется сложным сочетанием ряда факторов:

1. Распространением и мощностью толщ субаквальных многолетнемерзлых пород, подстилающих их толщ подмерзлотных газогидратов, а также толщ приповерхностных глубоководных газогидратов (на участках с глубинами более 300–400 м, обеспечивающей агградацию / деградацию приповерхностных толщ газогидратов).

2. Условиями залегания нефтегазоносных структур и пород с коллекторскими свойствами (в частности, повышенный флюидопоток неоднократно фиксировался в зонах контакта триасовых и юрских толщ на западно-арктических шельфах [Соколов и др., 2023; Semenov et al., 2023; Thorsnes et al., 2023]).

3. Наличием благоприятных структурно-геологических условий для притока пресных вод суши вдоль подошвы многолетней мерзлоты на шельфе, а также степени засоленности донных отложений.

4. Наличием структурных каналов для притока флюидов к поверхности в виде разломов и газовых труб в разрезе отложений с возможным вкладом струйного эффекта дегазации в новообразование мерзлых пород, сопровождающееся пучением дна.

5. Наличием придонных холодных вод и отрицательной температуры донных отложений, способствующих охлаждению флюидов (в первую очередь, пресной воды при ее наличии), промерзанию дна с возможным образованием форм пучения.

Установленные закономерности распространения разных типов флюидогенных форм в Арктике

во многом связаны с историей геологического развития шельфовой зоны. Так, по мнению ряда зарубежных и отечественных исследователей [Swendsen et al., 2004; Velichko et al., 1989], в позднем плейстоцене акватория Баренцева моря подверглась воздействию покровных ледников. Дискуссионные вопросы, касающиеся наличия и границ позднеплейстоценового оледенения на шельфе Арктики, лежат за рамками цели настоящего исследования, поэтому в данной работе не рассматриваются. Ледниковая экзарация во многом способствовала формированию условий с близким залеганием к поверхности дна коренных пород с коллекторскими свойствами и последующему проявлению дегазации в рельефе дна [Thorsen et al., 2023]. Мерзлые породы в акватории не установлены (за исключением Печорского моря) [Bogoyavlensky et al., 2018], что создает благоприятные условия для эмиссии газов и формирования ареалов покмарок. На мелководьях других морей Арктики в условиях понижения уровня Мирового океана в позднем плейстоцене (LGM) были сформированы толщ многолетнемерзлых пород и сопутствующие им внутримерзлотные и подмерзлотные газогидраты. В настоящее время все эти толщ, по-видимому, постепенно деградируют под действием потока флюидов разного происхождения, в том числе глубинных газов рифтогенных систем, что сопровождается образованием форм пучения (в частности, ППФ).

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 22-77-10091 «Закономерности проявления дегазации на Баренцево-Карском шельфе и ее влияние на рельеф и донные отложения».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алешин М.И., Гайнанов В.Г., Токарев М.Ю. и др. Изучение придонных осадков в Петрозаводской губе Онежского озера с помощью комплексирования геолого-геофизических методов изучения донных отложений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 4. С. 98–104. DOI: 10.33623/0579-9406-2019-4-98-104.
- Астахов А.С., Маркевич В.С., Колесник А.Н. и др. Возможные условия и время формирования покмарков Чукотского плато // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 665–678. DOI: 10.7868/S0030157414040029.
- Бондарев В.Н., Рокос С.И., Костин Д.А. и др. Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 7. С. 587–598.
- Иванов М.К. Фокусированные углеводородные потоки на глубоководных окраинах континентов: дис. ... докт. геол.-минерал. наук. М., 1999. 222 с.
- Колюбакин А.А., МIRONЮК С.Г., Росляков А.Г. и др. Применение комплекса геофизических методов для выявления опасных геологических процессов и явлений на шельфе моря Лаптевых // Инженерные изыскания. 2016. № 10–11. С. 38–51.
- Кохан А.В., Мороз Е.А., Еременко Е.А. и др. Флюидогенный рельеф районов распространения многолетней мерзлоты на шельфе Печорского и Карского морей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. Т. 78. № 3. С. 104–124. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.9.
- Крапивнер Р.Б. Признаки неотектонической активности Баренцевоморского шельфа // Геотектоника. 2007. № 2. С. 73–89.
- Мельников В.П., Федоров К.М., Вольф А.А., Спесивцев В.И. Анализ возможного сценария образования придонных ледяных бугров на шельфе Печорского моря // Криосфера Земли. 1998. Т. 11. № 4. С. 51–57.
- МIRONЮК С.Г. Флюидогенные образования: обоснование выделения новой генетической группы рельефа морского дна // VIII Щукинские чтения: рельеф и природопользование: материалы Всероссийской конференции с международным участием. М., 2020. С. 37–43.
- МIRONЮК С.Г., Колюбакин А.А., Голенок О.А. и др. Грязевулканические структуры (вулканоиды) Карского моря: морфологические особенности и строение: материалы XXIII Международной научной конферен-

- ции (Школы) по морской геологии «Геология морей и океанов». ИО РАН. Т. 5. М., 2019а. С. 192–196.
- Миронюк С.Г., Иванова А.А., Хлебникова О.А. Флюидогенные формы рельефа как индикаторы нефтегазонасыщенности недр шельфа // Труды VII Международной научно-практической конференции. Т. II(IV). М.: ПолиПРЕСС, 2019б. С. 120–131.
- Миронюк С.Г., Росляков А.Г. Типы, активность и закономерности распространения покровов в арктических морях / Труды VII Международной научно-практической конференции. Т. II(IV). М.: ПолиПРЕСС, 2019. С. 70–76.
- Мороз Е.А., Еременко Е.А., Денисова А.П. и др. Проявление дегазации в осадочном чехле и рельефе Южно-Новоземельского жёлоба (Печорское море) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 512. № 1. С. 5–11. DOI: 10.31857/S2686739723600820.
- Соколов С.Ю., Мороз Е.А., Зарайская Ю.А. и др. Картирование опасных геологических объектов и процессов северной и центральной частей шельфа Баренцева моря по данным гидроакустического комплекса НИС «Академик Николай Страхов» // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 13. № 2. С. 164–179. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-164-179.
- Тулапин А.В., Рокос С.И., Длугач А.Г. Скоростное моделирование и динамический анализ изображений диапироподобных структур в Печорском море // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2021. Вып. 8. С. 246–251. DOI: 10.24412/2687-1092-2021-8-246-251.
- Astrom E., Sen A., Carroll M., Carroll J. Cold Seeps in a Warming Arctic: Insights for Benthic Ecology, *Front. Mar. Sci.*, 2020, vol. 7, DOI: 10.3389/fmars.2020.00244.
- Baranov B., Galkin S., Vedenin A. et al. Methane seeps on the outer shelf of the Laptev Sea: characteristic features, structural control, and benthic fauna, *Geo-Mar. Lett.*, 2020, vol. 40, p. 541–557, DOI: 10.1007/s00367-020-00655-7.
- Blasco S., Bennett R., Brent T. et al. 2010 State of Knowledge: Beaufort Sea seabed geohazards associated with offshore hydrocarbon development, Geological Survey of Canada, Open File 6989, 2013, 340 p., DOI: 10.4095/292616.
- Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A. Evidence of large-scale absence of frozen ground and gas hydrates in the northern part of the East Siberian Arctic shelf, *Marine and Petroleum Geology*, 2023, vol. 148, 106050, DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.106050.
- Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A. et al. Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas, *Geosciences*, 2018, vol. 8(12), 453, DOI: 10.3390/geosciences8120453.
- Bukhanov B., Chuvilin E., Zhmaev M. et al. In situ bottom sediment temperatures in the Siberian Arctic seas: Current state of subsea permafrost in the Kara sea vs Laptev and East Siberian seas, *Marine and Petroleum Geology*, 2023, vol. 157, 106467, DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2023.106467.
- Chand S., Rise L., Ottesen D. et al. Pockmark-like depressions near the Goliath hydrocarbon field, Barents Sea; morphology and genesis, *Mar. and Pet. Geol.*, 2009, vol. 26, p. 1035–1042, DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2008.09.002.
- Chand S., Thorsnes T., Rise L. et al. Multiple episodes of fluid flow in the SW Barents Sea (Loppa High) evidenced by gas flares, pockmarks and gas hydrate accumulation, *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, vol. 331–332, p. 305–314, DOI: 10.1016/j.epsl.2012.03.021.
- Charkin A.N., Loeff van der M.R., Shakhova N. et al. Discovery and characterization of submarine groundwater discharge in the Siberian Arctic seas: a case study in the Buor-Khaya Gulf, Laptev Sea, *The Cryosphere*, 2017, vol. 11, p. 2305–2327, DOI: 10.5194/tc-11-2305-2017.
- Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D. et al. Evidence of Gas Emissions from Permafrost in the Russian Arctic, *Geosciences*, 2020, vol. 10(10), 383, DOI: 10.3390/geosciences10100383.
- Frederick J.M., Buffett B.A. Submarine groundwater discharge as a possible formation mechanism for permafrost-associated gas hydrate on the circum-Arctic continental shelf, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2016, vol. 121, p. 1383–1404, DOI: 10.1002/2015JB012627.
- Gwiazda R., Paull C.K., Dallimore S.R. et al. Freshwater seepage into sediments of the shelf, shelf edge, and continental slope of the Canadian Beaufort Sea, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, vol. 19, p. 3039–3055, DOI: 10.1029/2018GC007623.
- Milkov A.V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates, *Marine Geology*, 2000, vol. 167, p. 29–42, DOI: 10.1016/S0025-3227(00)00022-0.
- Overduin P., Von Deimling T.S., Miesner F. et al. Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP), *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, vol. 124, DOI: 10.1029/2018JC014675.
- Paull C.K., Lii W.U., Dallimore S.R. et al. Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates, *Geoph. Res. Lett.*, 2007, vol. 34, L01603, DOI: 10.1029/2006GL027977.
- Paull C.K., Dallimore S.R., Jin Y.K. et al. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost, *PNAS*, 2022, vol. 119, no. 12, DOI: 10.1073/pnas.2119105119.
- Portnov A., Smith A.J., Mienert J. et al. Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20 m at the South Kara Sea shelf, *Geoph. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, DOI: 10.1002/grl.50735.
- Rekant P., Bauch H., Schwenk T. et al. Evolution of subsea permafrost landscapes in Arctic Siberia since the Late Pleistocene: a synoptic insight from acoustic data of the Laptev Sea, *Arktos*, 2015, vol. 1, p. 1–15, DOI: 10.1007/s41063-015-0011-y.
- Rise L., Bellec V.K., Chand S. et al. Pockmarks in the southwestern Barents Sea and Finnmark fjords, *Norw. J. of Geol.*, 2015, vol. 94, p. 263–282, DOI: 10.17850/njg94-4-02.
- Sapart C., Shakhova N., Semiletov I. et al. The origin of methane in the East Siberian Arctic Shelf unraveled with triple isotope analysis, *Biogeosciences*, 2017, vol. 14, p. 2283–2292, DOI: 10.5194/bg-14-2283-2017.
- Semenov P., Portnov A., Krylov A. et al. Geochemical evidence for seabed fluid flow linked to the subsea permafrost outer border in the South Kara Sea, *Geochemistry*, 2020, vol. 80, no. 3, 125509, DOI: 10.1016/j.chemer.2019.04.005.
- Serov P., Portnov A., Mienert J. et al. Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2015, vol. 120, p. 1515–1529, DOI: 10.1002/2015JF003467.

- Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf, *Nature Geoscience*, 2013, vol. 7, p. 64–70, DOI: 10.1038/NCEO2007.
- Shakhova N., Semiletov I., Sergienko N. et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice, *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 2015, vol. 373, 20140451, DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
- Shearer J.M., Macnab R.F., Pelletier B.R., Smith T.B. Submarine pingoes in the Beaufort Sea, *Science*, 1971, vol. 174, no. 4011, p. 816–818.
- Steinbach J., Holmstrand H., Shcherbakova K. et al. Source apportionment of methane escaping the subsea permafrost system in the outer Eurasian Arctic Shelf, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, vol. 118(10), DOI: 10.1073/pnas.2019672118.
- Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia, *Quaternary Science Reviews*, 2004, vol. 23, iss. 11–13, p. 1229–1271, DOI: 10.1016/j.quascirev.2003.12.008.
- Tasianas A., Bunz S., Bellwald B. et al. High-resolution 3D seismic study of pockmarks and shallow fluid flow systems at the Snøhvit hydrocarbon field in the SW Barents Sea, *Marine Geology*, 2018, vol. 403, p. 247–261, DOI: 10.1016/j.margeo.2018.06.012.
- Thorsnes T., Chand S., Bellec V.K. et al. Gas seeps in Norwegian waters – distribution and mechanisms, *Norwegian Journal of Geology*, 2023, vol. 103, 202309, DOI: 10.17850/njg103-2-4.
- Van Rensbergen P., De Batist M., Klerkx J. et al. Sublacustrine mud volcanoes and methane seeps caused by dissociation of gas hydrates in Lake Baikal, *Geology*, 2002, vol. 30(7), p. 631–634, DOI: 10.1130/0091-7613(2002)030<0631:SM-VAMS>2.0.CO;2.
- Velichko A.A., Isayeva L.L., Oorshkin D.B., Faustova M.A. The last glaciation of Eurasia, *The Arctic seas, climatology, oceanography, geology and biology*, New York, 1989, p. 729–758.
- Waage M., Portnov A., Serov P. et al. Geological controls on fluid flow and gas hydrate pingo development on the Barents Sea margin, *Geochimistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, vol. 20, p. 630–650, DOI: 10.1029/2018GC007930.
- Waage M., Serov P., Andreassen K. et al. Geological controls of giant crater development on the Arctic seafloor, *Sci. Rep.*, 2020, vol. 10, no. 8450, DOI: 10.1038/s41598-020-65018-9.
- Weidner E., Weber T., Mayer L. et al. A wideband acoustic method for direct assessment of bubble-mediated methane flux, *Continental Shelf Research*, 2019, vol. 173, p. 104–115, DOI: 10.1016/j.csr.2018.12.005.
- Электронный ресурс
Salt diapir and gas leakage on Tiddlybanken, Mareano, Collecting marine knowledge, 2023, URL: https://mareano.no/en/news/news_2013/salt_diapir_and_gas_leakage_on_tiddlybanken (дата обращения 04.10.2022).

Поступила в редакцию 04.10.2023

После доработки 11.11.2023

Принята к публикации 04.12.2023

FLUIDOGENIC LANDFORMS ON THE ARCTIC SHELVES

A.V. Kokhan¹, E.A. Eremenko², E.A. Moroz³, A.V. Ermakov⁴, S.Yu. Sokolov⁵

^{1–3,5} Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Ocean Floor Geomorphology and Tectonics

⁴ Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Heat and Mass Transfer

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography

¹ Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geology; e-mail: kkkkk1987@mail.ru

² Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: eremenkoeaig@gmail.com

³ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geology; e-mail: morozzea@gmail.com

⁴ Scientific Researcher; e-mail: a.v.ermakov@gmail.com

⁵ Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geology; e-mail: sysokolov@yandex.ru

The paper summarizes and systematizes available data on geological and geomorphologic structure of fluidogenic landforms on the Arctic shelves, in particular, pockmarks, pingo-like features, domes and craters. A small-scale map of the spatial distribution of fluidogenic landforms has been compiled. Geographical patterns of distribution of different types of fluidogenic landforms in the Arctic seas were identified, as well as main factors and conditions that determine their localization, morphology and modern activity. It is shown that fluidogenic landforms are complex formations with a multi-component source of fluids. Their distribution and accompanying gas manifestations in bottom sediments and water column are determined by complex combinations of factors. Among them the most significant are distribution and thickness of subaquatic permafrost and subpermafrost and the near-surface deep-sea gas hydrates. The amount of fluidogenic landforms at the bottom is influenced by specific features of oil and gas bearing structures and rocks with reservoir properties, as well as the influx of fresh land waters along the base of permafrost on the shelf, the degree of salinity of bottom sediments and the temperature of near-bottom water. In addition, fluidogenic morpholithogenesis is facilitated by the presence of structural channels for the influx of fluids to the surface in the form of faults and gas pipes

in bottom sediments with the possible contribution of the jet degassing effect to the new formation of frozen rocks, accompanied by bottom heaving. Morphological differences in the structure of fluidogenic landforms are associated, in addition to the factors indicated above, with the history of the geological development of the shelf, in particular, with the time of submersion during the Holocene transgression and the impact of glaciation.

Keywords: degassing, pockmarks, pingo-like features, gas manifestation, acoustic anomalies, morpholithogenesis, fluids

Acknowledgments. The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project 22-77-10091 “Spatial Patterns of Degassing Manifestation on the Barents-Kara Shelf and Its Influence on Relief and Bottom Sediments”).

REFERENCES

- Aleshin M.I., Gaynanov V.G., Tokarev M.Yu. et al. Izuchenie pridonnyh osadkov v Petrozavodskoj gube Onezhskogo ozera s pomosh'yu kompleksirovaniya geologo-geofizicheskikh metodov izucheniya donnyh otlozhenij [Study of Onega lake Petrozavodsk bay sub-bottom sediments using complex geophysical and geological data analysis], *Mos. Un-ty Bulletin, Ser. 4, Geology*, 2019, no. 4, p. 98–104, DOI: 10.33623/0579-9406-2019-4-98-104. (In Russian)
- Astakhov A.S., Kolesnik A.N., Obrezkova M.S. et al. Possible conditions and the formation time of the Chukchi Plateau pockmarks, *Oceanology*, 2014, vol. 54, no. 5, p. 624–636, DOI: 10.1134/S000143701404002X.
- Astrom E., Sen A., Carroll M., Carroll J. Cold Seeps in a Warming Arctic: Insights for Benthic Ecology // *Front. Mar. Sci*, 2020, vol. 7, DOI: 10.3389/fmars.2020.00244.
- Baranov B., Galkin S., Vedenin A. et al. Methane seeps on the outer shelf of the Laptev Sea: characteristic features, structural control, and benthic fauna, *Geo-Mar. Lett.*, 2020, vol. 40, p. 541–557, DOI: 10.1007/s00367-020-00655-7.
- Blasco S., Bennett R., Brent T. et al. *2010 State of Knowledge: Beaufort Sea seabed geohazards associated with offshore hydrocarbon development*, Geological Survey of Canada, Open File 6989, 2013, 340 p., DOI: 10.4095/292616.
- Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A. Evidence of large-scale absence of frozen ground and gas hydrates in the northern part of the East Siberian Arctic shelf, *Mar. and Petr. Geol.*, 2023, vol. 148, 106050, DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.106050.
- Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A. et al. Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas, *Geosciences*, 2018, vol. 8(12), 453, DOI:10.3390/geosciences8120453.
- Bondarev V.N., Rokos S.I., Kostin D.A. et al. Podmerzlotnye skopleniya gaza v verhnej chasti osadochnogo chehla Pechorskogo morja [Underpermafrost accumulations of gas in the upper part of the sedimentary cover of the Pechora Sea], *Geologiya i geofizika*, 2002, vol. 43, no. 7, p. 587–598. (In Russian)
- Bukhanov B., Chuvilin E., Zhmaev M. et al. In situ bottom sediment temperatures in the Siberian Arctic seas: Current state of subsea permafrost in the Kara sea vs Laptev and East Siberian seas, *Mar. and Petr. Geol.*, 2023, vol. 157, 106467, DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2023.106467.
- Chand S., Rise L., Ottesen D. et al. Pockmark-like depressions near the Goliat hydrocarbon field, Barents Sea; morphology and genesis, *Mar. and Pet. Geol.*, 2009, vol. 26, p. 1035–1042, DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2008.09.002.
- Chand S., Thorsnes T., Rise L. et al. Multiple episodes of fluid flow in the SW Barents Sea (Loppa High) evidenced by gas flares, pockmarks and gas hydrate accumulation, *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, vol. 331–332, p. 305–314, DOI: 10.1016/j.epsl.2012.03.021.
- Charkin A.N., Loeff van der M.R., Shakhova N. et al. Discovery and characterization of submarine groundwater discharge in the Siberian Arctic seas: a case study in the Buor-Khaya Gulf, Laptev Sea, *The Cryosphere*, 2017, vol. 11, p. 2305–2327, DOI: 10.5194/tc-11-2305-2017.
- Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D. et al. Evidence of Gas Emissions from Permafrost in the Russian Arctic, *Geosciences*, 2020, vol. 10(10), no. 383, DOI:10.3390/geosciences10100383.
- Frederick J.M., Buffett B.A. Submarine groundwater discharge as a possible formation mechanism for permafrost-associated gas hydrate on the circum-Arctic continental shelf, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2016, vol. 121, p. 1383–1404, DOI: 10.1002/2015JB012627.
- Gwiazda R., Paull C.K., Dallimore S.R. et al. Freshwater seepage into sediments of the shelf, shelf edge, and continental slope of the Canadian Beaufort Sea, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, vol. 19, p. 3039–3055, DOI: 10.1029/2018GC007623.
- Ivanov M.K. *Fokusirovannye uglevodorodnye potoki na glubokovodnykh okrainah kontinentov* [Focused hydrocarbon flows at deep-sea continental margins], D.Sc. Thesis in Geology and Mineralogy, Moscow, 1999, 222 p. (In Russian)
- Kokhan A.V., Moroz E.A., Eremenko E.A. et al. Flyuidogenyj relief raionov rasprostraneniya mnogoletnej merzloty na shelfe Pechorskogo i Karskogo morej [Fluidogenic landforms within the permafrost zone on the shelf of the Pechora and Kara seas], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2023, vol. 78, no. 3, p. 104–124. DOI:10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.9. (In Russian)
- Kolyubakin A.A., Mirnyuk S.G., Roslyakov A.G. et al. Primenenie kompleksa geofizicheskikh metodov dlya vyavleniya opasnykh geologicheskikh protsessov i yavlenij na shelfe moray Laptevyyh [Using a complex of geophysical methods to reveal dangerous geological processes and phenomena on the Laptev Sea shelf], *Engineering Survey*, 2016, no. 10–11, p. 38–51. (In Russian)
- Krapivner R.B. Indications of neotectonic activity at the Barents Sea shelf, *Geotektonics*, 2007, vol. 41, no. 2, p. 149–162.
- Mel'nikov V.P., Fedorov K.M., Vol'f A.A., Spesivcev V.I. Analiz vozmozhnogo scenariya obrazovaniya pridonnyh ledjanyh bugrov na shel'fe Pechorskogo morja [Analysis of possible scenario of ice column formation on the bottom of the Pechora Sea shelf], *Kriosfera Zemli*, 1998, vol. 11, no. 4, p. 51–57. (In Russian)

- Milkov A.V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates, *Marine Geology*, 2000, vol. 167, p. 29–42, DOI: 10.1016/S0025-3227(00)00022-0.
- Mironyuk S.G. [Fluidogenic Formations: Substantiation of the Identification of a New Genetic Group of the Seabed Relief], *VIII Shhukinskie chtenija: rel'ef i prirodopol'zovanie* [VIII Schukin Conference: Relief and Nature Management], materialy Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, 2020, p. 37–43. (In Russian)
- Mironyuk S.G., Ivanova A.A., Hlebnikova O.A. [Fluidogenic landforms as indicators of oil and gas potential of the shelf subsurface], *trudy VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference], vol. II(IV), 2019, PoliPRESS Publ., p. 120–131. (In Russian)
- Mironyuk S.G., Kolyubakin A.A., Golenok O.A. et al. [The mud volcanic structures (vulcanoides) of the Kara Sea: morphological features and structure], *Geologiya morej i okeanov, materialy XXIII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii po morskoy geologii* [Geology of seas and oceans. Proceedings of XXIII International Conference on Marine Geology], Moscow, IO RAN, 2019, vol. 5, p. 192–196. (In Russian)
- Mironyuk S.G., Roslyakov A.G. [Types, activity and patterns of distribution of pockmarks in the Arctic seas], *trudy VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference], vol. II(IV), 2019, PoliPRESS Publ., p. 70–76. (In Russian)
- Moroz E.A., Eremenko E.A., Denisova A.P. et al. The manifestation of degassing in the sedimentary cover and relief of the Southern Novaya Zemlya trench (Pechora sea), *Doklady Earth Sciences*, 2023, vol. 512, pt 1, p. 773–778, DOI: 10.31857/S2686739723600820.
- Overduin P., Von Deimling T.S., Miesner F. et al. Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP), *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, vol. 124, DOI: 10.1029/2018JC014675.
- Paull C.K., Dallimore S.R., Jin Y.K. et al. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost, *PNAS*, 2022, vol. 119, no. 12, DOI: 10.1073/pnas.2119105119.
- Paull C.K., Lii W.U., Dallimore S.R. et al. Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates, *Geoph. Res. Lett.*, 2007, vol. 34, L01603, DOI: 10.1029/2006GL027977.
- Portnov A., Smith A.J., Mienert J. et al. Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20 m at the South Kara Sea shelf, *Geoph. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, DOI: 10.1002/grl.50735.
- Rekant P., Bauch H., Schwenk T. et al. Evolution of subsea permafrost landscapes in Arctic Siberia since the Late Pleistocene: a synoptic insight from acoustic data of the Laptev Sea, *Arktos*, 2015, vol. 1, p. 1–15, DOI: 10.1007/s41063-015-0011-y.
- Rise L., Bellec V.K., Chand S. et al. Pockmarks in the southwestern Barents Sea and Finnmark fjords, *Norw. J. of Geol.*, 2015, vol. 94, p. 263–282, DOI: 10.17850/njg94-4-02.
- Sapart C., Shakhova N., Semiletov I. et al. The origin of methane in the East Siberian Arctic Shelf unraveled with triple isotope analysis, *Biogeosciences*, 2017, vol. 14, p. 2283–2292, DOI: 10.5194/bg-14-2283-2017.
- Semenov P., Portnov A., Krylov A. et al. Geochemical evidence for seabed fluid flow linked to the subsea permafrost outer border in the South Kara Sea, *Geochemistry*, 2020, vol. 80, no. 3, 125509, DOI: 10.1016/j.chemer.2019.04.005.
- Serov P., Portnov A., Mienert J. et al. Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2015, vol. 120, p. 1515–1529, DOI: 10.1002/2015JF003467.
- Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf, *Nature Geoscience*, 2013, vol. 7, p. 64–70, DOI: 10.1038/NGEO2007.
- Shakhova N., Semiletov I., Sergienko N. et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice, *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 2015, vol. 373, 20140451, DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
- Shearer J.M., Macnab R.F., Pelletier B.R., Smith T.B. Submarine pingoes in the Beaufort Sea, *Science*, 1971, vol. 174, no. 4011, p. 816–818.
- Sokolov S.Yu., Moroz E.A., Zarajskaya Yu.A. et al. Kartirovanie opasnyh geologicheskikh ob'ektov i processov severnoj i central'noj chastej shel'fa Barenceva morya po dannym gidroakusticheskogo kompleksa NIS “Akademik Nikolaj Strahov” [Mapping of dangerous geological objects and processes at the northern and central parts of the Barents Sea shelf according to the hydroacoustic data from RV “Akademik Nikolai Strakhov”], *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2023, vol. 13, no. 2, p. 164–179, DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-164-179. (In Russian)
- Steinbach J., Holmstrand H., Shcherbakova K. et al. Source apportionment of methane escaping the subsea permafrost system in the outer Eurasian Arctic Shelf, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, vol. 118(10), DOI: 10.1073/pnas.2019672118.
- Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia, *Quaternary Science Reviews*, 2004, vol. 23, iss. 11–13, p. 1229–1271, DOI: 10.1016/j.quascirev.2003.12.008.
- Tasianias A., Bunz S., Bellwald B. et al. High-resolution 3D seismic study of pockmarks and shallow fluid flow systems at the Snøhvit hydrocarbon field in the SW Barents Sea, *Marine Geology*, 2018, vol. 403, p. 247–261, DOI: 10.1016/j.margeo.2018.06.012.
- Thorsnes T., Chand S., Bellec V.K. et al. Gas seeps in Norwegian waters – distribution and mechanisms, *Norwegian Journal of Geology*, 2023, vol. 103, 202309, DOI: 10.17850/njg103-2-4.
- Tulapin A.V., Rokos S.I., Dlugach A.G. Skorostnoe modelirovanie i dinamicheskij analiz izobrazhenij diapiropodobnyh struktur v Pechorskome more [Seismic velocity modeling and dynamic analysis of PLF images in Pechora Sea], *Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*, 2021, iss. 8, p. 246–251. (In Russian)
- Van Rensbergen P., De Batist M., Klerkx J. et al. Sublacustrine mud volcanoes and methane seeps caused by dissociation of gas hydrates in Lake Baikal, *Geology*, 2002, vol. 30(7), p. 631–634, DOI: 10.1130/0091-7613(2002)030<0631:SM-VAMS>2.0.CO;2.

- Velichko A.A., Isayeva L.L., Oorshkin D.B., Faustova M.A. The last glaciation of Eurasia, in *The Arctic seas, climatology, oceanography, geology and biology*, 1989, New York, p. 729–758.
- Waage M., Portnov A., Serov P. et al. Geological controls on fluid flow and gas hydrate pingo development on the Barents Sea margin, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, vol. 20, p. 630–650, DOI: 10.1029/2018GC007930.
- Waage M., Serov P., Andreassen K. et al. Geological controls of giant crater development on the Arctic seafloor, *Sci. Rep.*, 2020, vol. 10, no. 8450, DOI: 10.1038/s41598-020-65018-9.
- Weidner E., Weber T., Mayer L. et al. A wideband acoustic method for direct assessment of bubble-mediated methane flux, *Continental Shelf Research*, 2019, vol. 173, p. 104–115, DOI: 10.1016/j.csr.2018.12.005.
- Web source*
Salt diapir and gas leakage on Tiddlybanken, Mareano, Collecting marine knowledge, 2023, URL: https://mareano.no/en/news/news_2013/salt_diapir_and_gas_leakage_on_tiddlybanken (access date 04.10.2022).

Received 04.10.2023

Revised 11.11.2023

Accepted 04.12.2023

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИДОННОГО СЛОЯ МОРЕЙ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА К ТЕМПЕРАТУРЕ ВОЗДУХА В XX–XXIII ВВ. ПО ДАННЫМ CMIP6

В.В. Малахова¹, А.В. Елисеев²

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет

² Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН

¹ Введ. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук; e-mail: malax@sscc.ru

² Введ. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук; e-mail: eliseev.alexey.v@mail.ru

Проведено исследование чувствительности температуры придонного слоя (T_B) морей арктического шельфа к изменениям температуры воздуха (T_A) для периода 1850–2300 гг. на основе результатов пяти моделей из ансамбля CMIP6 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 6) при сценарии с высокими антропогенными выбросами парниковых газов. Анализ был проведен в терминах ансамблевой статистики, а не отдельных моделей. Изменения обеих переменных рассчитывались как разница средних значений соответствующей переменной между заранее выбранными интервалами времени. Эти интервалы характеризовали доиндустриальное состояние (1850–1900), современность (2005–2015), конец XXI в. (2090–2100) и конец XXIII в. (2290–2300).

Для периода 2005–2015 гг. для морей сибирского и североамериканского шельфов коэффициенты чувствительности $\Delta T_B / \Delta T_A$ (Δ указывает на изменения относительно доиндустриального периода) составили менее 0,1 для среднегодовых и зимних значений и до 0,4 летом. Полученные результаты для летнего периода хорошо согласуются с имеющимися данными измерений для Восточно-Сибирского шельфа. Для Баренцева моря уже в этот период коэффициенты чувствительности выше: 0,17–0,44 для среднегодовых значений и от 0,4 до 0,6 для летних температур. В XXI–XXIII вв. коэффициенты чувствительности заметно вырастают, особенно для той части арктического шельфа, которая освобождается ото льда. Наиболее заметно это для летнего периода в морях сибирского и североамериканского шельфа, где осредненные по региону значения коэффициентов чувствительности составили до 0,5 от доиндустриального к концу XXI в. и выросли до 0,8 к концу XXIII в. Для последнего изменения состояния коэффициенты чувствительности летом в секторе Баренцева моря будут близки к единице.

Предложены аналитические аппроксимации указанных зависимостей, позволяющие проводить вычисления с моделью термодинамики донных отложений шельфа.

Ключевые слова: арктический шельф, придонная температура, температура воздуха, CMIP6, сценарии SSP

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.9

ВВЕДЕНИЕ

В высоких широтах Северного полушария температура приземного воздуха увеличивается со скоростью, которая в 2–4 раза превышает среднее глобальное потепление. По данным HadCRUT5 [Morice et al., 2021], в 1980–2020 гг. соответствующие скорости потепления составили 0,4–0,8°C/десятилетие (в зависимости от региона) и 0,2°C/десятилетие. Это явление называется арктическим усилением [Мохов, 2022; Previdi et al., 2021]. Анализ же соответствующих изменений температуры воды в Северном Ледовитом океане (СЛО) (в частности, в придонном слое шельфовых морей) остается недостаточным, а выводы – противоречивыми. В свою очередь, понимание изменений температуры воды у морского дна необходимо для оценки отклика свойств донных отложений на настоящее и бу-

дущее потепление. Среди этих свойств – динамика мерзлоты на арктическом шельфе [Малахова, Елисеев, 2020a; Romanovskii, Hubberten, 2001] и связанных с ней гидратов метана [Малахова, Елисеев, 2020a; Ruppel, Kessler, 2017; Shakhova et al., 2019]. В настоящее время заметное влияние потепления климата на этот выброс маловероятно из-за длительных, многотысячелетних масштабов реакции вышеупомянутых свойств на изменения температуры поверхности [Canadell et al., 2021; Malakhova, Eliseev, 2020b]. Однако нельзя исключать усиление этого воздействия в будущем, поскольку продолжающееся, в основном антропогенное, потепление климата, вероятно, будет прогрессировать и дальше [Masson-Delmotte et al., 2021].

Кроме того, перенос метана зависит от растворимости этого газа, которая, в свою очередь, зависит

от температуры воды [Vinogradova et al., 2022]. Так, установлено, что сезонное потепление перемешанного слоя океана приводит к снижению объема метана, который может содержаться в воде в растворенном виде [Vinogradova et al., 2022]. Это может увеличить количество метана, который в конечном итоге выбрасывается из СЛО в атмосферу. Наконец, рост температуры воды в морях арктического шельфа может повлиять на арктические экосистемы, которые в последние десятилетия стали более продуктивными [Ardyna, Arrigo, 2020].

С одной стороны, можно полагать, что отклик температуры вблизи морского дна на изменения температуры придонного воздуха будет небольшим. Это объясняется тем, что в соответствии с соленостью Северного Ледовитого океана, от 28 до 34‰, за исключением регионов вблизи устьев рек [Osadchiev et al., 2023], температура, при которой плотность воды максимальна, составляет от -1 до -2°C и близка к температуре замерзания. Холодная и тяжелая вода опускается на дно, поддерживая температуру вблизи морского дна почти постоянной. Возможно, это стало причиной очень небольшого (менее 1°C) повышения придонной температуры, полученного по результатам проекта CMIP3 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 3) в течение нескольких десятков лет после удвоения содержания CO_2 в атмосфере (q_{CO_2}) [Lamarque, 2008]. Аналогичный результат был получен и для проекта CMIP5 (CMIP, phase 5) в рамках сценария RCP8.5. Несмотря на выраженное потепление воздуха над арктическим шельфом (около 10°C в 2081–2100 гг. по сравнению с 1986–2005 гг.; см. рис. 12.11 из [Collins et al., 2013]), придонная температура океана увеличилась лишь на $(2,3 \pm 1,0)^{\circ}\text{C}$ [Heuzé et al., 2015] – вчетверо меньше. Следует заметить, что аргумент о максимальной плотности для температуры, близкой к постоянной у морского дна, может быть оспорен, если принять во внимание океаническую циркуляцию и изменения солености. В частности, поле придонной температуры формируется турбулентным обменом энергией с атмосферой (важным для верхнего слоя океана толщиной в несколько десятков метров [Boyer Montégut et al., 2004]), а также адвекцией и конвекцией в океане (проявляющихся во всей толще водного столба) [Lique et al., 2018]. К факторам, влияющим на рост температуры придонного слоя на шельфе морей Северного Ледовитого океана, можно также отнести влияние стока крупных рек. Теплые речные воды оказывают тепловое влияние на придонный слой мелководных шельфов и формируют области опреснения, например, в Карском море [Osadchiev et al., 2023] и в море Лаптевых [Golubeva et al., 2018]. На континентальном шельфе арктических морей на глубинах более

200 м повышение придонной температуры формируется под тепловым воздействием атлантических водных масс, которые распространяются вдоль континентального склона Евразии [Ivanov, 2023].

С другой стороны, в [Shu et al., 2022] отмечено, что на основании данных океанического реанализа и моделирования CMIP6 (CMIP, phase 6; см. [Masson-Delmotte et al., 2021]) температура воды в СЛО растет заметно быстрее по сравнению со средним значением для глобального океана на тех же глубинах. Это потепление составило 6°C в 2081–2100 гг. по сравнению с 1981–2000 гг. в слое 0–700 м. Однако наибольшее потепление отмечено в Баренцевом море, в других же арктических шельфовых морях изменение температуры незначительно. Отметим, что в [Shu et al., 2022] проведен сравнительный анализ изменения температуры в СЛО по отношению к среднеглобальному изменению на соответствующей глубине. Кроме того, в [Shu et al., 2022] не рассматриваются изменения температуры морской воды в более отдаленном будущем.

Помимо модельных оценок имеются прямые измерения температуры вблизи морского дна (T_B) в летний период (с июня по сентябрь) 1985–2009 гг. [Dmitrenko et al., 2011]. Согласно этим измерениям, вода в прибрежной зоне (определенной в [Dmitrenko et al., 2011] как часть океана с глубинами дна ≤ 10 м) прогрелась на $2,1^{\circ}\text{C}$ в море Лаптевых и на $2,2^{\circ}\text{C}$ в Восточно-Сибирском море. Соответствующее повышение температуры придонного воздуха (T_A) составило $2,6$ и $2,8^{\circ}\text{C}$. Таким образом, для данного сезона и для данного временного интервала $\Delta T_B / \Delta T_A \approx 0,8$, что достаточно близко к единице. На внутреннем шельфе (определенном в [Dmitrenko et al., 2011] как часть океана с глубинами дна от 10 до 50 м) в море Лаптевых потепление составило всего $0,8^{\circ}\text{C}$, а в Восточно-Сибирском море наблюдалось похолодание на $0,25^{\circ}\text{C}$. Поэтому в этой части моря Лаптевых $\Delta T_B / \Delta T_A \approx 0,4$, а в Восточно-Сибирском море соответствующая $\Delta T_B / \Delta T_A$ была отрицательной.

Одной из возможных причин таких разногласий в результатах моделей является достаточно грубое разрешение в моделях океана, использовавшихся в предыдущих (CMIP5 и более ранних) поколениях моделей земной системы (МЗС). В частности, на арктическом шельфе имеется ряд узких проливов, важных для циркуляции океана. Среди них проливы между северным побережьем материковой России и близлежащими островами и проливы Канадского архипелага. Типичная ширина этих проливов – до нескольких десятков километров. Кроме того, океанический радиус Россби, определяющий масштаб горизонтальных вихрей, на арктическом шельфе составляет менее 10 км [Nurser, Bacon, 2014]. Все

это требует более высокого разрешения океанических моделей в Арктике. В идеале это разрешение должно достигать нескольких километров, но такое разрешение остается неприемлемым для моделирования в масштабе столетия и тысячелетия с использованием МЗС.

Упомянутое выше потепление в придонном слое моря Лаптевых в последние десятилетия было воспроизведено в численном эксперименте с использованием модели СЛО высокого разрешения и с учетом теплового стока реки Лены [Golubeva et al., 2018]. В ходе моделирования было получено усиленное вертикальное перемешивание в прибрежной зоне арктического шельфа, что привело к проникновению тепла до дна.

Длительные наблюдения за температурой придонного слоя воды за 30 лет и более для оценки климатических изменений редки или вообще отсутствуют, за исключением описанных в [Dmitrenko et al., 2011]. Имеются данные, позволяющие сравнить температуры воздуха и водной поверхности. Так, по данным срочных наблюдений на гидрометеорологических станциях Росгидромета за 1981–2017 гг. и реанализа NOAA_OI_SST_V2 изучена межгодовая изменчивость температуры воздуха и воды на поверхности моря Лаптевых [Ростов и др., 2019]. Средние климатические тренды за 10 лет для температуры воздуха оценены величиной $+0,75^{\circ}\text{C}$, а для температуры воды $+0,35^{\circ}\text{C}$ (для летнего сезона).

Таким образом, в настоящее время единственным способом оценки таких взаимосвязей является использование климатических моделей. Хотя пространственное разрешение современных МЗС остается недостаточным для определения мелкомасштабной океанической циркуляции на арктическом шельфе, оно значительно улучшилось за последние годы. В частности, сеточное разрешение увеличилось в несколько раз от моделей CMIP3 до CMIP6 (см. табл. 8.1 в [Solomon et al., 2007] и табл. AnII.5 в [Masson-Delmotte et al., 2021]).

Целью настоящего исследования является оценка связи между изменениями температуры приводного воздуха и придонного слоя воды для арктического шельфа на основе результатов CMIP6 для сценария с высоким уровнем антропогенного воздействия. Этот выбор учитывает ранее неисследованные взаимосвязи между изменениями температуры в атмосфере над арктическим шельфом и придонного слоя морей. Кроме того, мы используем моделирование, продленное до 2300 г., что потенциально важно для изучения изменений океана – инерционного компонента системы Земли. Следует отметить, что данная работа – расширение работы [Malakhova, Eliseev, 2023]. В отличие от указанной публикации, в данной работе, во-первых, анализ

проводится не в терминах отдельных моделей, а в терминах ансамблевой статистики, что позволяет представить результаты в более компактном виде. Во-вторых, предложены аналитические аппроксимации полученных качественных зависимостей $T_B(T_A)$, позволяющие проводить вычисления с моделью термодинамики донных отложений шельфа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование основано на анализе двух переменных из результатов расчетов моделей CMIP6: среднегодовой температуры воздуха на высоте 2 м от воды (переменная tas) и среднегодовой температуры придонной воды (переменная tob). Далее эти две переменные обозначаются как T_A и T_B соответственно. При этом в CMIP6 под придонной температурой понимается температура нижнего расчетного уровня модели. Точное расположение этого уровня зависит от конкретной модели. Рассмотрены модельные данные по двум сценариям CMIP6: «historical» с 1850 по 2014 г. и сценарий SSP5-8.5 (2014–2100) с высоким содержанием CO_2 в атмосфере [Gidden et al., 2019]. Выбраны модели с продленным исследованием до 2300 г. (табл.). Выбранные модели прогнозируют температуру воздуха в региональном масштабе в XXI–XXIII вв. с существенными различиями. Это объясняется почти двукратным различием в их равновесной чувствительности к удвоению q_{CO_2} (equilibrium climate-sensitivity – ECS, см. табл.). Мы рассматриваем последнее как дополнительное преимущество нашего ансамбля, поскольку модели показывают одну из основных неопределенностей в исследованиях климата – неопределенность, связанную с чувствительностью климата к внешним воздействиям. В исследовании мы используем средние по ансамблю моделей значения описанных переменных.

Для всех моделей переменные T_A и T_B были интерполированы на сетку $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, а затем усреднены по ансамблю. В процедуре интерполяции использовались четыре соседних узла сетки. Веса интерполяции выбраны пропорциональными $\exp(-\rho/\rho(0))$, где ρ – горизонтальное расстояние (в градусах широты и долготы) между точками на двух сетках, $\rho(0)$ в Арктике близка к $0,36^{\circ}$. Затем среднеансамблевые как T_A и T_B были усреднены за периоды 1850–1900, 2005–2015, 2090–2100 и 2290–2300 гг. (как в среднем за год, так и для отдельных сезонов). Эти четыре временных интервала обозначаются как I0, I1, I2 и I3 соответственно. Связь между изменениями температуры приводного воздуха и придонной температуры выражается с помощью безразмерного коэффициента:

$$\alpha_j = \frac{T_{B,j} - T_{B,0}}{T_{A,j} - T_{A,0}}, \quad (1)$$

где индекс $0 \leq j \leq 3$ указывает среднее значение за соответствующий интервал времени I_j . Статистическая значимость оценивалась с помощью двустороннего критерия Стьюдента. Все рассчитанные значения α_j оказались статистически значимыми.

Также были сделаны расчеты α_j для T_B и T_A , усредненных по областям шельфа: Баренцеву морю (BS), остальной части Евразии (RoE) и Северной Америке (NA) (рис. 1А). Мы выбрали отдельное усреднение по Баренцеву морю, поскольку коэффициенты чувствительности для этого региона сильно отличаются от коэффициентов для других областей арктического шельфа России (см. ниже).

Поэтому для компактности изложения мы объединили шельфы Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей в единый регион RoE. При осреднении мы оценивали две максимальные глубины для обозначения границ шельфа: 200 и 500 м. Однако шельф Баренцева моря оказался географически слишком мал при выборе пороговой глубины 200 м. При этом рассчитанные для этих глубин α имеют незначительные различия для всех регионов шельфа, кроме Баренцева моря. Поэтому в дальнейшем при осреднении по регионам для обозначения границ шельфа была выбрана максимальная глубина 500 м.

Таблица

Выбранные модели проекта CMIP6 [Masson-Delmotte et al., 2021]

Модель	Модель океана	Модель морского льда	Пространственное разрешение	ECS, °C
MRI-ESM2-0, Япония	MRI.COM4.4	MRI.COM4.4	15 км, L61	3,2
ACCESS-ESM1-5, Австралия	ACCESS-OM2	CICE4.1	17 км, L50	3,9
IPSL-CM6A-LR, Франция	NEMO 3.6	NEMO-LIM3	17 км, L30	4,6
CESM2-WACCM, США	POP2	CICE5.1	15 км, L60	4,8
CanESM5, Канада	NEMO 3.4.1	LIM2	17 км, L45	5,6

Примечание. ECS (equilibrium climate sensitivity) – равновесная чувствительность глобальной приземной температуры к удвоению содержания CO_2 в атмосфере.

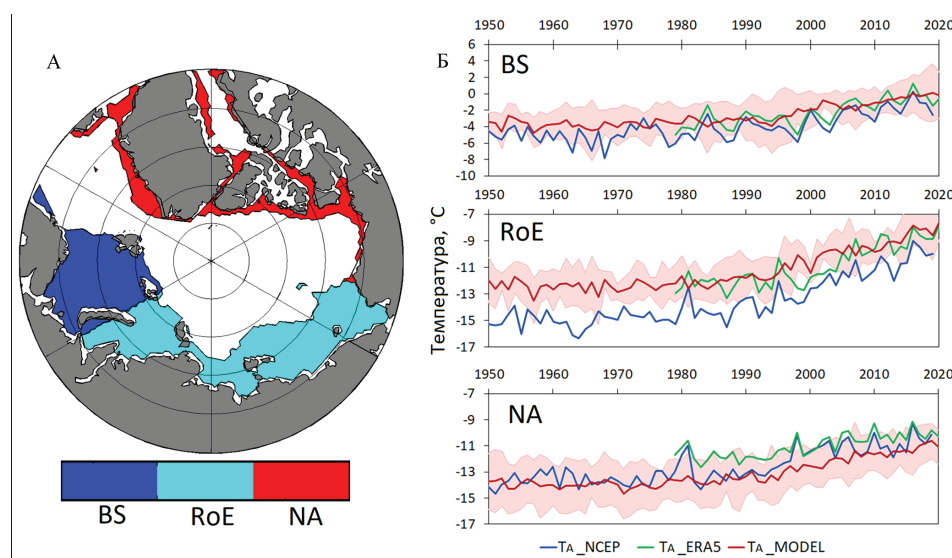


Рис. 1. Осреднение среднеансамблевой температуры приземного воздуха по шельфовым регионам:

А – маска регионов с пороговой глубиной океана 500 м, используемая для осреднения температуры; Б – среднеансамблевая температура приземного воздуха (T_{MODEL}), осредненная по шельфовым регионам в соответствии с А, в сравнении с реанализом NCEP–DOE (T_{NCEP}) и ERA5 (T_{ERA5}). Закрашенная область характеризует межмодельную неопределенность внутри ансамбля, определенную как интервал шириной, равной удвоенному межмодельному среднеквадратичному отклонению в данный календарный год в данном регионе

Fig. 1. Averaging of ensemble-average surface air temperature over shelf regions:

А – mask of regions with a threshold ocean depth of 500 m, used for temperature averaging; Б – ensemble mean surface air temperature (T_{MODEL}), averaged over shelf regions in accordance with А in comparison with the NCEP–DOE reanalysis (T_{NCEP}) and ERA5 reanalysis (T_{ERA5}). The shaded area characterizes the inter-model uncertainty within the ensemble (defined as an interval of width equal to twice the inter-model standard deviation in a given calendar year in a given region)

В дальнейших приложениях, однако, целесообразно вместо коэффициента α , который определяется относительно начального состояния, использовать другой коэффициент $\beta = dT_B / dT_A$, который относительно локализован во времени и, следовательно, локализован по отношению к состоянию системы. В данной работе указанный коэффициент был определен с помощью линейной регрессии T_B на T_A . Эта регрессия, в свою очередь, была вычислена для скользящего (с шагом в 1 год) окна длиной 30 лет. Регрессия вычислялась для окна только при дополнительном условии, что в нем $\max(T_B) - \min(T_B) \geq 1^\circ\text{C}$. Затем коэффициент β был рассмотрен как функция средней температуры воздуха для соответствующего 30-летнего скользящего отрезка. В работе также получена аналитическая аппроксимация этого коэффициента как функции от указанной температуры.

Отметим, что среднее по ансамблю T_A над арктическим шельфом хорошо согласуется с данными реанализов NCEP–DOE [Kanamitsu et al., 2002] и ERA5 (Европейский центр среднесрочного прогноза погоды) [Hersbach et al., 2020] (см. рис. 1Б).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены пространственные распределения рассчитанного коэффициента α_j для трех периодов. Для среднегодовой температуры и перехода между периодами I0 и I1 коэффициент чувствительности α_1 составил от 0,2 до 0,7 в Баренцевом море (см. рис. 2А). В остальных шельфовых бассейнах $\alpha_1 \leq 0,2$. Последнее согласуется с общепринятым мнением о том, что температура придонного слоя воды близка к постоянной [Bogoyavlensky et al., 2018]. Коэффициенты α для среднегодовой температуры заметно увеличились при переходе I0 $\rightarrow$ I2 (см. рис. 2Б). В частности, рост придонной температуры почти сравним с потеплением воздуха вблизи Скандинавии, где α_2 составил 0,8. В морях Сибирского шельфа также происходит увеличение температуры придонной воды, но не столь выраженное, и α_2 составил от 0,1 до 0,4. Коэффициенты чувствительности для среднегодовых температур продолжают расти и при переходе I0 $\rightarrow$ I3 (см. рис. 2В). Здесь коэффициент $\alpha_3 > 1$ для шельфа Баренцева моря, $\alpha_3 > 0,3$ для Карского моря, для остальных морей он составил 0,2–0,3.

Также были рассмотрены коэффициенты чувствительности отдельно для зимнего (с декабря по март) и летнего (с июня по сентябрь; это определение идентично использованному в [Dmitrenko et al., 2011]) периодов. Зимой коэффициенты чувствительности незначительно меньше, чем среднегодовые для всех временных интервалов (см. рис. 2Г, 2Д, 2Е). Тем не менее они заметно увеличились для

периода I0 $\rightarrow$ I3 (см. рис. 2Е) относительно периодов I0 $\rightarrow$ I1 (см. рис. 2Г) и I0 $\rightarrow$ I2 (см. рис. 2Д). Для летнего периода коэффициенты α оказались выше относительно полученных для среднегодовых значений (см. рис. 2Ж, 2З, 2И). Для периода I0 $\rightarrow$ I1 максимальные значения α_1 как и в случае со среднегодовыми температурами характерны для области Баренцева моря (см. рис. 2Ж). Однако область с $\alpha_1 \geq 0,5$ более распространенная для летнего периода. Более того, регионы с $\alpha_1 \geq 0,3$ получены в этом случае и на остальной территории Евразии. Для переходов I0 $\rightarrow$ I2, и особенно для I0 $\rightarrow$ I3, коэффициенты чувствительности стали существенно выше по сравнению с таковыми для исторического периода I0 $\rightarrow$ I1. В частности, для периода I0 $\rightarrow$ I2 $\alpha_2 \geq 0,5$ не только в Баренцевом море, но и в некоторых областях Сибирского шельфа. Для перехода I0 $\rightarrow$ I3 коэффициенты выросли и в этом случае $\alpha_3 \geq 0,5$ повсюду на арктическом шельфе. Для перехода I0 $\rightarrow$ I3 в летний период сектор Баренцева моря мало чем отличается от двух других секторов.

На рис. 3 представлены значения коэффициента α_j , осредненного по регионам BS, RoE и NA (см. рис. 1А). Для среднегодовых температур коэффициенты максимальны в регионе Баренцева моря (BS): $\alpha_1 = 0,29$; $\alpha_2 = 0,48$ и $\alpha_3 = 0,73$. В RoE и NA они имеют более низкие значения для всех периодов и почти одинаковы: $\alpha_1 \approx 0,1$; $\alpha_2 \approx 0,2$ и $\alpha_3 \approx 0,4$ (см. рис. 3А). Диапазон значений α_j в зависимости от модели самый широкий в регионе Баренцева моря для всех трех периодов. При усреднении по крупным шельфовым регионам для зимнего периода α_j уменьшился и в зависимости от временного интервала составил от 0,2 до 0,6 в BS, от 0,02 до 0,3 в RoE и менее 0,30 в NA (см. рис. 3Б). Летом коэффициенты чувствительности были значительно выше, чем зимой, для всех временных интервалов (см. рис. 3В). Эти коэффициенты максимальны в секторе Баренцева моря, где составили от 0,5 до 0,8. Но они заметно увеличились в летний период для двух других регионов: $\alpha_1 = 0,3$; $\alpha_2 = 0,5$ и $\alpha_3 = 0,7$ в RoE и $\alpha_1 = 0,15$; $\alpha_2 = 0,4$ и $\alpha_3 = 0,66$ в NA. Также заметно увеличился диапазон значений α_j в зависимости от модели для летнего периода (см. рис. 3В).

Таким образом, наибольшие значения коэффициентов чувствительности обнаружены в Баренцевом море. Как было продемонстрировано, в этом регионе они могут превысить единицу для будущего периода. Другой важной особенностью рассчитанных коэффициентов чувствительности является их увеличение с течением времени. Особенно это характерно для летнего периода для морей сибирского и североамериканского шельфа.

В [Heuzé et al., 2015] для моделей CMIP5 при сценарии RCP-8.5 до 2100 г. (близкому к сценарию

SSP5-8.5) оценен $\alpha \approx 0,2-0,3$ для перехода от 2081–2100 гг. к 1986–2005 гг. Эта величина сравнима с нашей оценкой α_2 , несмотря на разницу в пороговой глубине (500 м в данной работе и 1000 м в [Heuze

et al., 2015]). Более того, изменение придонной температуры, полученное в моделях проекта CMIP5, было самым большим в секторе Баренцева моря, что согласуется с нашими результатами.

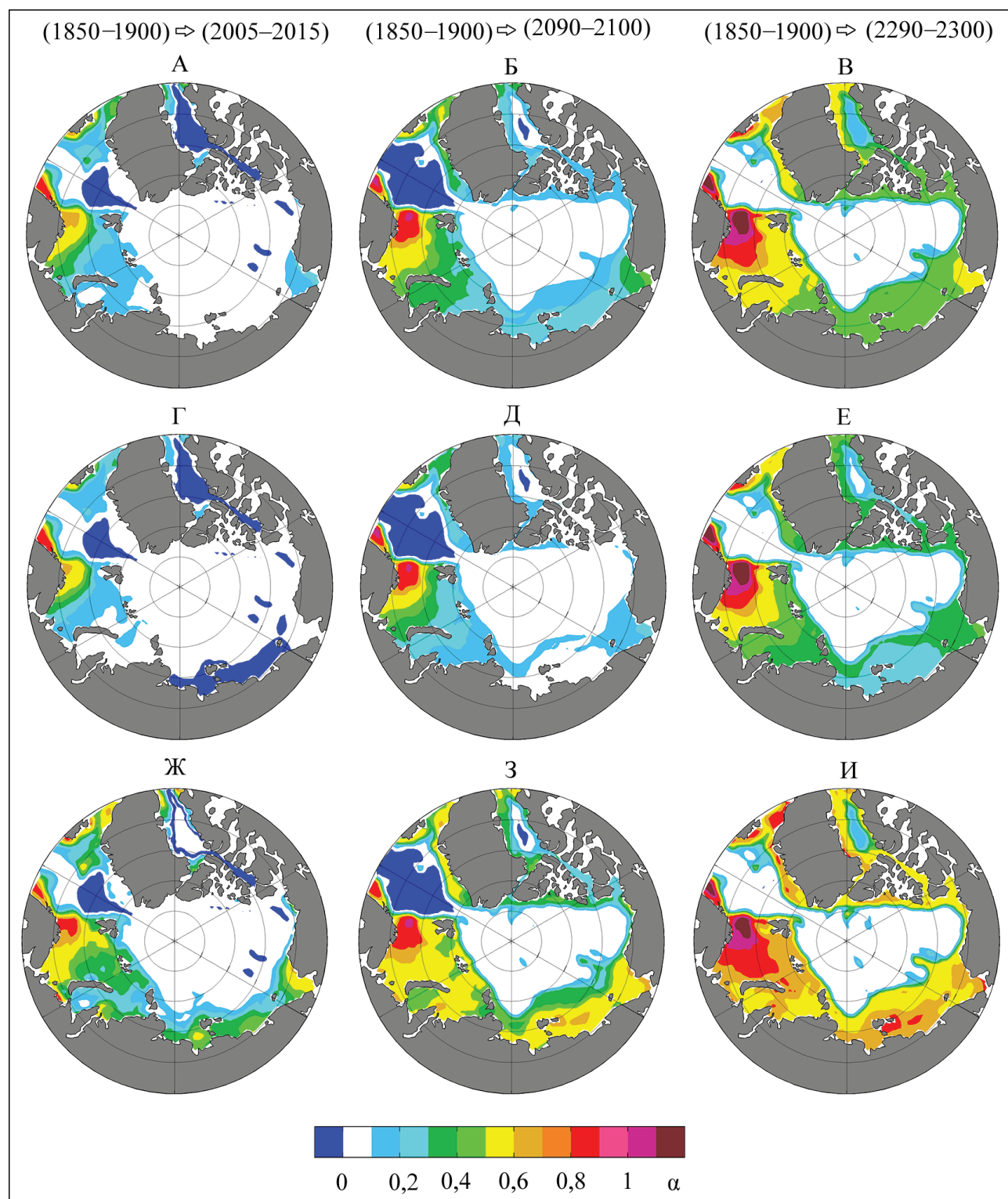


Рис. 2. Коэффициенты α (безразмерные) для трех переходов: А, Б, В – для среднегодовых температур; Г, Д, Е – для средних зимних температур (с декабря по март); Ж, З, И – для средних летних температур (с июня по сентябрь)

Fig. 2. Coefficients α (dimensionless) for three transitions: А, Б, В – for average annual temperatures; Г, Д, Е – for average winter temperatures (from December to March); Ж, З, И – for average summer temperatures (from June to September)

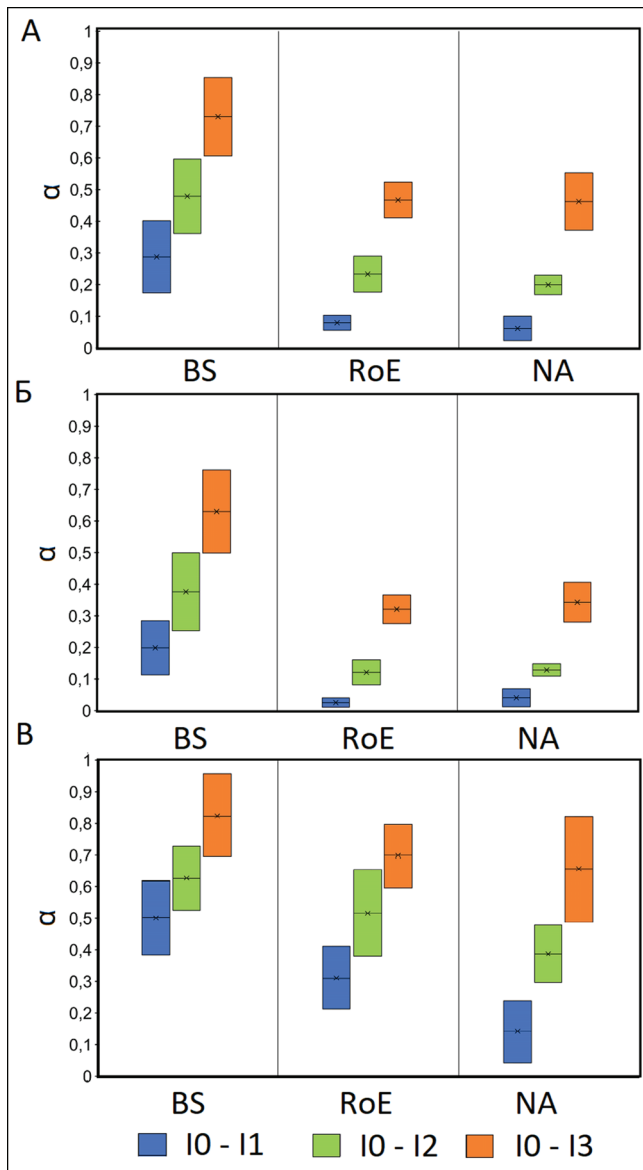


Рис. 3. Коэффициенты α (безразмерные) для трех переходов, усредненные по арктическим регионам в соответствии с рис. 1А, и среднеквадратичное отклонение α по ансамблю моделей:
 А – для среднегодовых температур; Б – для средних зимних температур (с декабря по март); В – для средних летних температур (с июня по сентябрь). Для каждого изображенного столбика центральная горизонтальная линия указывает на среднеансамблевую оценку, а высота характеризует межмодельную неопределенность внутри ансамбля (определенную как интервал шириной, равной удвоенному межмодельному среднеквадратичному отклонению коэффициента α)

Fig. 3. Coefficients α (dimensionless) for three transitions, averaged over Arctic regions, in accordance with Fig. 1A and standard deviation α for the ensemble of models:
 А – for average annual temperatures; Б – for average winter temperatures (from December to March); В – for average summer temperatures (from June to September). For each bar shown, the central horizontal line indicates the ensemble mean estimate, and the height characterizes the inter-model uncertainty within the ensemble (defined as an interval with a width equal to twice the inter-model standard deviation of the coefficient α)

Для усредненных по шельфовым регионам значений придонной и приводной температур получены зависимости $\beta(T_A)$ (здесь для простоты через T_A обозначена средняя для соответствующего 30-летнего скользящего отрезка приводная температура), позволяющие проводить вычисления с моделью термофизики донных отложений шельфа.

Для среднегодовых температур (рис. 4А):

$$\beta = \begin{cases} 0,25, T_A \leq -4,3^\circ\text{C}; \\ 0,00501 \cdot T_A^2 + 0,043 \cdot T_A + 0,34, -4,3^\circ\text{C} < T_A < 7^\circ\text{C}; \\ 0,90, T_A \geq 7^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (2)$$

Для зимы (декабрь – март) (см. рис. 4Б):

$$\beta = \begin{cases} 0,14, T_A \leq -9,6^\circ\text{C}; \\ 0,0050 \cdot T_A^2 + 0,096 \cdot T_A + 0,60, -9,6^\circ\text{C} < T_A \leq 2^\circ\text{C}; \\ 0,91, T_A > 2^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (3)$$

Для лета (июнь – сентябрь) (см. рис. 4В):

$$\beta = \begin{cases} 0,031 \cdot T_A + 0,33, T_A \leq 13^\circ\text{C}; \\ -0,095 \cdot T_A + 2,16, T_A > 13^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, можно предположить, что заметное увеличение коэффициентов чувствительности произошло, когда шельфовая область полностью освободилась ото льда летом. Усиление сезонного таяния при потеплении климата морского ледового покрова летом в данном регионе в целом должно приводить к некоторому распреснению морской воды. Однако особенности циркуляции в Северном Ледовитом океане ограничивают такое распреснение регионом Канадского бассейна, тогда как на шельфе вблизи Евразии, наоборот, соленость увеличивается [Lique et al., 2018]. Это приводит к ослаблению стратификации и усиливает вертикальное перемешивание в слое от поверхности до глубин в несколько сот метров. Увеличение глубины перемешивания, вероятно, будет наибольшим в начале осени. Тогда такой мощный перемешанный слой будет сохраняться в течение части зимы, обеспечивая перенос тепла на морское дно шельфа. Это согласуется с результатами, опубликованными в [Lique et al., 2018], где было обнаружено, что в совместной модели высокого разрешения сильное увеличение содержания CO_2 в атмосфере приводит к очень глубокому перемешиванию в Северном Ледовитом океане, включая шельфовые районы. Такой механизм согласуется, в частности, с относительно большими (по сравнению с другими морями Северного Ледовитого океана) значениями коэффициента α в Баренцевом море для потепления от второй половины XIX в. до современного периода. Дополнительным возможным механизмом может быть нагревание толщи воды солнечной радиацией, кото-

рая поглощается непосредственно водой в условиях отсутствия льда, а также ветровое перемешивание. Так, в работе [Плотников и др., 2020] показано, что за счет изменения ветрового и термического режимов, уменьшения площади ледяного покрова произошло увеличение площади и интенсивности ветрового перемешивания в морях восточного сектора Арктики в современный период. Активность волновой деятельности увеличивается, и, соответственно, растет глубина волнового перемешивания

от июня до октября, где она достигает максимума. Отметим, что такое глубокое перемешивание эпизодически проявляется на арктическом шельфе уже в современную эпоху по данным судовых измерений [Ivanov, 2023].

Кроме того, отметим, что в Баренцевом море большую роль играет адвекция теплой воды из Атлантики. Это также может быть причиной выявленных особенностей коэффициента чувствительности в данной акватории.

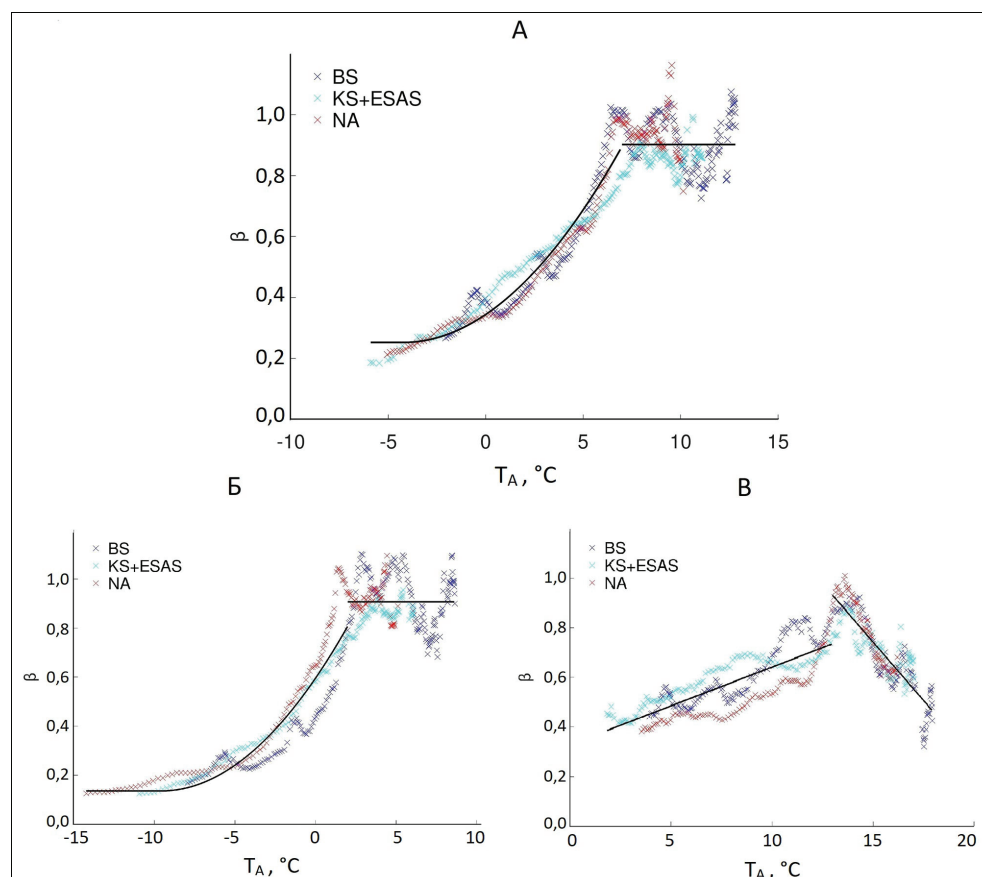


Рис. 4. Коэффициенты β : А – для среднегодовых температур; Б – для зимнего периода (декабрь–март); В – для летнего периода (июнь–сентябрь). Цвет кривой соответствует цвету региона, по которому проводилось осреднение температуры (см. рис. 1А). Линиями указаны аналитические аппроксимации (см. текст)

Fig. 4. β coefficients obtained for: А – average annual temperatures; Б – the winter period (December–March); В – the summer period (June–September). The colors indicate the regions involved in temperature averaging (see Fig. 1A). Black lines indicate analytical approximations (see text)

Возможное применение полученных результатов связано с изменением теплофизических свойств донных отложений шельфа. Если потепление на поверхности океана приводит к значительному росту температуры около морского дна, температурный сигнал может распространиться вглубь отложений. После некоторой задержки (которая, однако, могла достигать нескольких тысяч лет [Malakhova, Eliseev, 2020b]) этот температурный сигнал приводит к таянию вечной мерзлоты,

затопленной после последнего ледникового максимума. Кроме того, этот сигнал может привести к диссоциации гидратов метана, связанных с вечной мерзлотой, с последующим потоком метана из донных осадков в воду. Кроме того, потепление всей океанической толщи над шельфом может снизить растворимость метана в воде [Vinogradova et al., 2022] и, следовательно, еще больше увеличить эмиссию газа с акватории Северного Ледовитого океана в атмосферу.

Проведенное исследование имеет ряд ограничений. Первое связано с грубым горизонтальным разрешением используемых моделей CMIP6, которые не описывают мелкомасштабную циркуляцию в океане. Подобные вихревые циркуляции могут способствовать переносу явного тепла вниз в толщу воды. Еще одно ограничение связано с небольшим размером используемого ансамбля, который обусловлен доступностью данных, удовлетворяющих указанным во введении критериям. Поскольку наши коэффициенты чувствительности зависят от модели, очевидно, что любое расширение ансамбля моделей изменит количественно полученные результаты. Однако таяние морского льда летом в XXI в. характерно для всех моделей CMIP5 и CMIP6 и даже для всех сценариев [Елисеев, Семенов, 2016; Notz, 2020]. Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что коэффициенты чувствительности, близкие к единице, будут появляться на арктическом шельфе при условии, что потепление прогрессирует и морской лед растает в данном регионе.

В работе использован только сценарий SSP5-8.5. Разумеется, коэффициенты чувствительности для других сценариев будут другими. Однако главным результатом нашей работы является сильное увеличение коэффициентов чувствительности в районах, свободных ото льда летом. Поэтому этот результат применим и к другим сценариям, при условии, что соответствующее потепление будет достаточно сильным, чтобы привести к сокращению ледового покрова.

Далее, несмотря на утверждение о сильной зависимости коэффициента чувствительности от состояния морского льда, мы не попытались построить явную связь α со сплоченностью льда. Отклик придонной температуры, вероятно, будет запаздывать по отношению к изменениям морского льда, что усложняет построение этой взаимосвязи. Более того, наш основной интерес в будущих приложениях результатов настоящей статьи заключается в изучении теплофизики шельфовых отложений в масштабах тысячелетий. В соответствии с полученными результатами, при сезонном освобождении шельфа ото льда расчеты с моделями, в которых придонная температура используется в качестве граничного условия, можно выполнять с «асимптотически высокими» (близкими к единице) коэффициентами чувствительности.

Несмотря на все вышеупомянутые ограничения, мы приходим к выводу, что для прогнозов теплофизического состояния арктических шельфовых отложений на тысячелетия вполне реально предпо-

ложить, что потепление придонного слоя воды будет сравнимо по величине с потеплением температуры воздуха, при условии, что последнее потепление сопровождается таянием морского льда.

ВЫВОДЫ

В работе изучена чувствительность температуры придонного слоя к глобальному потеплению в период с 1850 по 2300 г. на основе результатов пяти моделей CMIP6. Количественная оценка этой чувствительности α получена с помощью отношения изменений температуры океана у морского дна ΔT_B и температуры приводного воздуха ΔT_A : $\alpha = \Delta T_B / \Delta T_A$. Оба изменения рассчитывались как разница средних значений соответствующей переменной между заранее выбранными интервалами времени. Эти интервалы характеризовали доиндустриальное состояние (1850–1900), современность (2005–2015), конец XXI века (2090–2100) и конец XXIII в. (2290–2300). Мы ограничились изучением сценария SSP5-8.5 (Shared Socio-Economic Pathways 5–8.5) с высокими антропогенными выбросами парниковых газов.

Получено, что в период с 2005 по 2015 г. для сибирского и североамериканского шельфов коэффициенты чувствительности были довольно низкие (обычно менее 0,12 для среднегодовых значений температур и до 0,4 в летний период). Это получено вне зависимости от сезона (в среднем за год, летом или зимой). Для лета полученные результаты согласуются с ограниченными измерениями на Восточно-Сибирском шельфе. Исключением был сектор Баренцева моря, где уже в этот период α составили от 0,14 до 0,44 для среднегодовых значений и от 0,4 до 0,6 для средних летних значений температур.

Для периодов с учетом сценария потепления коэффициенты чувствительности увеличились. Наиболее заметно это было летом для морей сибирского и североамериканского шельфа, где осредненные по региону значения коэффициентов чувствительности составляли до 0,5 от доиндустриального к концу XXI в. и выросли до 0,8 для перехода от доиндустриального периода к концу XXIII в. По сравнению с историческим периодом рост для этих регионов составил более чем в два раза. Для последнего изменения состояния коэффициент чувствительности летом в секторе Баренцева моря также вырос и стал близок к единице.

В результате исследования получены зависимости придонной температуры от температуры воздуха $T_B(T_A)$, позволяющие проводить вычисления с моделью термофизики донных отложений шельфа.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-11-20112 в части проведения анализа придонной температуры и ее зависимости от изменения климата; и грант № 23-47-00104 в части вывода аналитических аппроксимаций зависимости температуры придонной воды).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Елисеев А.В., Семенов В.А. Изменения климата Арктики в XXI в.: ансамблевые модельные оценки с учетом реалистичности воспроизведения современного климата // Доклады РАН. 2016. Т. 471. № 2. С. 214–218.
- Малахова В.В., Елисеев А.В. Влияние диффузии солей на состояние и распространение многолетнемерзлых пород и зоны стабильности метан-гидратов шельфа моря Лаптевых // Лед и Снег. 2020а. Т. 60. № 4. С. 533–546. DOI: 10.31857/S2076673420040058.
- Мохов И.И. Аналитические условия формирования арктического усиления в земной климатической системе // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 505. № 1. С. 103–108.
- Плотников В.В., Вражский А.Н., Мезенцева Л.И. и др. Изменчивость гидрометеорологического режима морей восточного сектора Арктики (Восточно-Сибирское, Чукотское) в современный период // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 7. С. 103–115.
- Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А. Тенденции климатических изменений термических условий моря Лаптевых за последние 37 лет // Вестник ДВО РАН. 2019. № 1 С. 97–107. DOI: 10.25808/08697698.2019.203.1.011.
- Ardyna M., Arrigo K. Phytoplankton dynamics in a changing Arctic Ocean, *Nat. Clim. Chang.*, 2020, vol. 10, p. 892–903, DOI: 10.1038/s41558-020-0905-y.
- Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A. et al. Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas, *Geosciences*, 2018, vol. 8, p. 453, DOI: 10.3390/geosciences8120453.
- Boyer Montégut de C., Madec G., Fischer A.S., Lazar A., Iudicone D. Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology, *J. geophys. Res.: Oceans*, vol. 109, C12003, DOI: 10.1029/2004JC002378.
- Canadell J., Monteiro P., Costa M. et al. Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, USA, 2021, p. 673–816.
- Collins M., Knutti R., Arblaster J. et al. Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility, *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. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, USA, 2013, p. 1029–1136, URL: <https://pure.iiasa.ac.at/10551>.
- Dmitrenko I., Kirillov S., Tremblay L. et al. Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability, *J. Geophys. Res. Ocean*, 2011, vol. 116, C10027, DOI: 10.1029/2011JC007218.
- Gidden M., Riahi K., Smith S. et al. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: A dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century, *Geosci. Model. Dev.*, 2019, vol. 12, p. 1443–1475, DOI: 10.5194/gmd-12-1443-2019.
- Golubeva E., Platov G., Malakhova V. et al. Modelling the long-term and inter-annual variability in the Laptev Sea hydrography and subsea permafrost state, *Polarforschung*, 2018, vol. 87, p. 195–210, DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.195.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, p. 1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
- Heuzé C., Heywood K., Stevens D., Ridley J. Changes in global ocean bottom properties and volume transports in CMIP5 models under climate change scenarios, *J. Clim.*, 2015, vol. 28, p. 2917–2944, DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00381.1.
- Ivanov V. Arctic Sea Ice Loss Enhances the Oceanic Contribution to Climate Change, *Atmosphere*, 2023, vol. 14, p. 409, DOI: 10.3390/atmos14020409.
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al. NCEP–DOE AMIP-II reanalysis (R-2), *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2002, vol. 83, p. 1631–1644, DOI: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
- Lamarque J.F. Estimating the potential for methane clathrate instability in the 1%-CO₂ IPCC AR-4 simulations, *Geophys. Res. Lett.*, 2008, vol. 35, L19806, DOI: 10.1029/2008GL035291.
- Lique C., Johnson H., Plancherel Y. Emergence of deep convection in the Arctic Ocean under a warming climate, *Clim. Dyn.*, 2018, vol. 50, p. 3833–3847, DOI: 10.1007/s00382-017-3849-9.
- Malakhova V.V., Eliseev A.V. A Relationship between Changes of Surface Air and Sea Floor Temperatures at the Arctic Shelf from the Coupled Models Intercomparison Project, Phase 6 Data, *Atmosphere*, 2023, vol. 14, p. 1024, DOI: 10.3390/atmos14061024.
- Malakhova V., Eliseev A. Uncertainty in temperature and sea level datasets for the Pleistocene glacial cycles: Implications for thermal state of the subsea sediments, *Glob. Planet. Chang.*, 2020b, vol. 192, 103249, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103249.
- Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. et al. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press: Cambridge, UK, New York, NY, USA, 2021, 2391 p.
- Morice C.P., Kennedy J.J., Rayner N.A. et al. An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 data set, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, vol. 126, e2019JD032361, DOI: 10.1029/2019JD032361.
- Notz D. SIMIP Community. Arctic sea ice in CMIP6, *Geophys. Res. Lett.*, 2020, vol. 47, e2019GL086749, DOI: 10.1029/2019GL086749.

- Nurser A., Bacon S. The Rossby radius in the Arctic Ocean, *Ocean Sci.*, 2014, vol. 10, p. 967–975, DOI: 10.5194/os-10-967-2014.
- Osadchiev A., Sedakov R., Frey D. et al. Intense zonal freshwater transport in the Eurasian Arctic during ice-covered season revealed by in situ measurements, *Sci Rep.*, 2023, vol. 13, 16508, DOI: 10.1038/s41598-023-43524-w.
- Previdi M., Smith K., Polvani L. Arctic amplification of climate change: A review of underlying mechanisms, *Environ. Res. Lett.*, 2021, vol. 16, 093003, DOI: 10.1088/1748-9326/ac1c29.
- Romanovskii N., Hubberten H.W. Results of permafrost modelling of the lowlands and shelf of the Laptev Sea region, Russia, *Permafrost. Perigl. Proc.*, 2001, vol. 12, p. 191–202, DOI: 10.1002/ppp.387.
- Ruppel C., Kessler J. The interaction of climate change and methane hydrates, *Rev. Geophys.*, 2017, vol. 55, p. 126–168, DOI: 10.1002/2016RG000534.
- Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the permafrost-hydrate system and associated methane releases in the East Siberian Arctic Shelf, *Geosciences*, 2019, vol. 9, p. 251, DOI: 10.3390/geosciences9060251.
- Shu Q., Wang Q., Arthun M. et al. Arctic Ocean Amplification in a warming climate in CMIP6 models, *Sci. Adv.*, 2022, vol. 8, iss. 30, DOI: 10.1126/sciadv.abn9755.
- Solomon S., Qin D., Manning M. et al. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, US, 2007, 996 p.
- Vinogradova E., Damm E., Pnyushkov A. et al. Shelf-sourced methane in surface seawater at the Eurasian continental slope (Arctic Ocean), *Front. Environ. Sci.*, 2022, vol. 10, 811375, DOI: 10.3389/fenvs.2022.811375.

Поступила в редакцию 23.09.2023

После доработки 15.11.2023

Принята к публикации 04.12.2023

SENSITIVITY OF THE BOTTOM LAYER TEMPERATURE OF THE ARCTIC SHELF SEAS TO AIR TEMPERATURE IN THE 20TH–23RD CENTURIES ACCORDING TO CMIP6 DATA

V.V. Malakhova¹, A.V. Eliseev²

¹ Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

² Lomonosov Moscow State University, Physical Faculty

² A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences

¹ Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Physics and Mathematics; e-mail: malax@sscc.ru

² Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Physics and Mathematics; e-mail: eliseev.alexey.v@mail.ru

Sensitivity of the seafloor temperature (T_B) of the Arctic shelf seas to changes in surface air temperature (T_A) for the period of 1850–2300 was studied, based on the results of five models from the CMIP6 ensemble (Coupled Models Intercomparison Project, phase 6) under a scenario with high anthropogenic greenhouse gas emissions. The analysis is carried out in terms of ensemble statistics rather than individual models. Changes of both variables were calculated as a difference of mean values of the corresponding variable between pre-selected time intervals. These intervals characterized the pre-industrial state (1850–1900), modernity (2005–2015), the end of the 21st century (2090–2100), and the end of the 23rd century (2290–2300).

For the period of 2005–2015 the seas of the Siberian and North American shelves showed the sensitivity coefficients $\Delta T_B / \Delta T_A$ (Δ indicates changes relative to the pre-industrial period) less than 0,1 for average annual and winter values and up to 0,4 in summer. The results obtained for the summer period are in good agreement with available measurement data for the East Siberian shelf. The sensitivity coefficients for the Barents Sea during the period are higher, i. e. 0,17–0,44 for average annual values and from 0,4 to 0,6 for summer temperatures.

Sensitivity coefficients for the 21st–23rd centuries show a significant increase, especially for the part of the Arctic shelf which would be free from ice. This is most pronounced for the summer period in the seas of the Siberian and North American shelves, where the regionally averaged values of sensitivity coefficients were up to 0,5 from pre-industrial values by the end of the 21st century and increased to 0,8 by the end of the 23rd century. For the last change in state, the sensitivity coefficient in summer in the Barents Sea sector was close to one.

Analytical approximations of these dependencies are suggested, which allow calculations to be carried out using a model of thermophysics of the bottom shelf sediments.

Keywords: Arctic shelf; seafloor temperature; surface air temperature; CMIP6; SSP scenarios

Acknowledgments. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 20-11-20112 – seafloor temperature analysis and its dependence on climate change; project 23-47-00104 – deriving analytical approximations for the dependence of bottom water temperature).

REFERENCES

- Ardyna M., Arrigo K. Phytoplankton dynamics in a changing Arctic Ocean, *Nat. Clim. Chang.*, 2020, vol. 10, p. 892–903, DOI: 10.1038/s41558-020-0905-y.
- Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A., Bogoyavlensky I. Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas, *Geosciences*, 2018, vol. 8, p. 453, DOI: 10.3390/geosciences8120453.
- Boyer Montégut de C., Madec G., Fischer A.S., Lazar A., Iudicone D. Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology, *J. geophys. Res.: Oceans*, vol. 109, C12003, DOI 10.1029/2004JC002378.
- Canadell J., Monteiro P., Costa M. et al. Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, USA, 2021, p. 673–816.
- Collins M., Knutti R., Arblaster J. et al. Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. In *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. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, USA, 2013, p. 1029–1136, URL: <https://pure.iasa.ac.at/10551>.
- Dmitrenko I., Kirillov S., Tremblay L. et al. Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability, *J. Geophys. Res. Oceans*, 2011, vol. 116, C10027, DOI: 10.1029/2011JC007218.
- Eliseev A.V., Semenov V.A. Arctic climate changes in the 21st century: ensemble model estimates accounting for realism in present-day climate simulation, *Doklady Earth Sci.*, 2016, vol. 471, no. 1, p. 1183–1187.
- Gidden M., Riahi K., Smith S. et al. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: A dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century, *Geosci. Model. Dev.*, 2019, vol. 12, p. 1443–1475, DOI: 10.5194/gmd-12-1443-2019.
- Golubeva E., Platov G., Malakhova V. et al. Modelling the long-term and inter-annual variability in the Laptev Sea hydrography and subsea permafrost state, *Polarforschung*, 2018, vol. 87, p. 195–210, DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.195.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, p. 1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
- Heuzé C., Heywood K., Stevens D., Ridley J. Changes in global ocean bottom properties and volume transports in CMIP5 models under climate change scenarios, *J. Clim.*, 2015, vol. 28, p. 2917–2944, DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00381.1.
- Ivanov V. Arctic Sea Ice Loss Enhances the Oceanic Contribution to Climate Change, *Atmosphere*, 2023, vol. 14, p. 409, DOI: 10.3390/atmos14020409.
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al. NCEP–DOE AMIP-II reanalysis (R-2), *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2002, vol. 83, p. 1631–1644, DOI: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
- Lamarque J.F. Estimating the potential for methane clathrate instability in the 1%-CO₂ IPCC AR-4 simulations, *Geophys. Res. Lett.*, 2008, vol. 35, L19806, DOI: 10.1029/2008GL035291.
- Lique C., Johnson H., Plancherel Y. Emergence of deep convection in the Arctic Ocean under a warming climate, *Clim. Dyn.*, 2018, vol. 50, p. 3833–3847, DOI: 10.1007/s00382-017-3849-9.
- Malakhova V.V., Eliseev A.V. A Relationship between Changes of Surface Air and Sea Floor Temperatures at the Arctic Shelf from the Coupled Models Intercomparison Project, Phase 6 Data, *Atmosphere*, 2023, vol. 14, p. 1024, DOI: 10.3390/atmos14061024.
- Malakhova V.V., Eliseev A.V. Vliyanie diffuzii solej na sostojanie i rasprostranenie mnogoletnemjorzlyh porod i zony stabil'nosti metan-gidratov shel'fa morja Laptevyyh [Salt diffusion effect on the submarine permafrost state and distribution as well as on the stability zone of methane hydrates on the Laptev Sea shelf], *LED I SNEG*, 2020, vol. 60, no. 4, p. 533–546, DOI: 10.31857/S2076673420040058. (In Russian)
- Malakhova V., Eliseev A. Uncertainty in temperature and sea level datasets for the Pleistocene glacial cycles: Implications for thermal state of the subsea sediments, *Glob. Planet. Chang.*, 2020b, vol. 192, 103249, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103249.
- Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. et al. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, USA, 2021, 2391 p.
- Mokhov I.I. Analytical conditions for the formation of Arctic amplification in the earth's climate system, *Doklady Earth Sciences*, 2022, vol. 505, no. 1, p. 496–500.
- Morice C.P., Kennedy J.J., Rayner N.A. et al. An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 data set, *J. of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, vol. 126, e2019JD032361, DOI: 10.1029/2019JD032361.
- Notz D. SIMIP Community. Arctic sea ice in CMIP6, *Geophys. Res. Lett.*, 2020, vol. 47, e2019GL086749, DOI: 10.1029/2019GL086749.
- Nurser A., Bacon S. The Rossby radius in the Arctic Ocean, *Ocean Sci.*, 2014, vol. 10, p. 967–975, DOI: 10.5194/os-10-967-2014.
- Osadchiv A., Sedakov R., Frey D. et al. Intense zonal freshwater transport in the Eurasian Arctic during ice-covered season revealed by in situ measurements, *Sci Rep.*, 2023, vol. 13, 16508, DOI: 10.1038/s41598-023-43524-w.
- Plotnikov V.V., Vrazhkin A.N., Mezentseva L.I. et al. Izmenchivost' gidrometeorologicheskogo rezhima morej vostochnogo sektora Arktiki (Vostochno-Sibirskoe, Chukotskoe) v sovremennyj period [Present-day variability of hydrometeorological regime of seas of the Eastern Arctic sector (East Siberian, Chukchi)], *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2020, vol. 331, no. 7, p. 103–115. (In Russian)

- Previdi M., Smith K., Polvani L. Arctic amplification of climate change: A review of underlying mechanisms, *Environ. Res. Lett.*, 2021, vol. 16, 093003, DOI: 10.1088/1748-9326/ac1c29.
- Romanovskii N., Hubberten H.W. Results of permafrost modelling of the lowlands and shelf of the Laptev Sea region, Russia, *Permafrost. Perigl. Proc.*, 2001, vol. 12, p. 191–202, DOI: 10.1002/ppp.387.
- Rostov I.D., Dmitrieva E.V., Vorontsov A.A. Tendencii klimaticheskikh izmenenij termicheskikh uslovij morja Laptevyyh za poslednie 37 let [Tendencies of climatic changes for thermal condition of the Laptev Sea in the last 37 years], *Vestnik DVO RAN*, 2019, no. 1, p. 97–107, DOI: 10.25808/08697698.2019.203.1.011. (In Russian)
- Ruppel C., Kessler J. The interaction of climate change and methane hydrates, *Rev. Geophys.*, 2017, vol. 55, p. 126–168, DOI: 10.1002/2016RG000534.
- Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the permafrost-hydrate system and associated methane releases in the East Siberian Arctic Shelf, *Geosciences*, 2019, vol. 9, p. 251, DOI: 10.3390/geosciences9060251.
- Shu Q., Wang Q., Årthun M. et al. Arctic Ocean Amplification in a warming climate in CMIP6 models, *Sci. Adv.*, 2022, vol. 8, iss. 30, DOI: 10.1126/sciadv.abn9755.
- Solomon S., Qin D., Manning M. et al. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, US, 2007, 996 p.
- Vinogradova E., Damm E., Pnyushkov A. et al. Shelf-sourced methane in surface seawater at the Eurasian continental slope (Arctic Ocean), *Front. Environ. Sci.*, 2022, vol. 10, 811375, DOI: 10.3389/fenvs.2022.811375.

Received 23.09.2023

Revised 15.11.2023

Accepted 04.12.2023

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ ПРИГОРОДНОГО РАЙОНА ЧЕБОКСАР ЗА ПОСЛЕДНИЕ 30 ЛЕТ

А.С. Чучкалов¹, Г.А. Зырянов², Д.В. Мартемьянов³

^{1–3} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра экономической и социальной географии России*

¹ *Аспирант; e-mail: chuchkalov_sashka@mail.ru*

² *Аспирант; e-mail: ziryarov.geo@gmail.com*

³ *Магистрант; e-mail: dany-c1998@yandex.ru*

Пригородная сельская местность характеризуется проявлениями различных взаимосвязей между сельским и городским населением. Общее свойство пригородных районов в постсоветский период – интенсификация двух типов пространственно выраженных взаимосвязей: трудовых («маятниковых») миграций сельского населения в город-центр и дачных рекреационных поездок горожан в сельскую местность. В статье с учетом региональной специфики Чувашской Республики (полиэтничного региона с повышенной долей сельского населения с быстрым ростом агломерации регионального центра) выявлены факторы пространственной неоднородности постсоветской трансформации населения сел, поселков и деревень пригородного Чебоксарского района. Анализ эволюции населенных пунктов предшествовал пространственный анализ динамики сельского населения района по межпереписным периодам начиная с 1979 г. Через определение территориальных различий в интенсивности, во-первых, появление садовых товариществ, во-вторых, индивидуального жилищного строительства, выделены три пространственные зоны по характеру взаимодействия сельской местности с городом-центром: 1) непосредственно пригородная; 2) переходная и 3) традиционная сельская. Населенным пунктам непосредственно пригородной зоны свойственна наибольшая интенсивность переселения горожан на постоянное место жительства (проявления классической субурбанизации), переходной зоны – наибольшая величина миграционного притока населения из периферийных сельских районов, традиционной сельской зоны – наибольшие относительные различия между величиной постоянного и летнего сезонного населения. В пределах каждой зоны охарактеризованы сельские населенные пункты разных типов – локальные центры расселения, «спальные» поселения с фермерскими хозяйствами и «спальные» поселения без мест приложения коллективного труда. Исходя из анализа постсоветской динамики людности населенных пунктов, расположенных на разном отдалении от города, сделан вывод о первостепенной роли транспортной доступности города-центра как фактора пространственной дифференциации распределения сельского населения. Фактор наличия рабочих мест в населенном пункте в непосредственно пригородной зоне не имеет важного значения для его устойчивости, в то время как в традиционной сельской зоне района его роль, наоборот, возрастает. Вследствие этого «спальные» поселения без рабочих мест одновременно являющиеся как лучшими в районе по постсоветской динамике (при отдаленности менее 20 км от центра города они трансформируются в коттеджные поселки), так и худшими (при отдаленности более чем на 40 км).

Ключевые слова: субурбанизация, дачная сезонная субурбанизация, центр-периферийная структура, коттеджные поселки, Чувашская Республика

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.10

ВВЕДЕНИЕ

В сельских исследованиях отсутствует единое понимание критериев, которым должна удовлетворять сельская местность для отнесения ее к пригородному типу. В экономико-географических исследованиях на региональном уровне наиболее распространен формальный подход: пригородной чаще всего считают сельскую местность с высокой интенсивностью хозяйственной деятельности, расположенную в пределах администра-

тивных районов, непосредственно граничащих с региональными центрами или иными большими городами. Формальный подход, однако, не учитывает пространственной неоднородности пригородной сельской местности, в зависимости от степени проявления которой может различаться ее внешний облик, образ жизни постоянного и сезонного населения, специфика расположенных организаций, фермерских и личных подсобных хозяйств.

Пригородная сельская местность характеризуется, в первую очередь, выраженностью проявления взаимосвязей различных типов между сельским и городским населением, как связанных с его непосредственным перемещением, так и культурных, финансовых и неформальных социальных. К числу основных можно отнести два типа взаимосвязей: трудовые («маятниковые») миграции сельского населения пригородных районов в город-центр и дачные рекреационные поездки горожан в сельскую местность. Интенсификация этих пространственных взаимосвязей в постсоветский период – общее свойство сельской местности пригородных районов вне зависимости от региональной специфики. Фоновыми процессами в сельской местности в пределах городских агломераций являются, с одной стороны, пространственная концентрация сельского населения, с другой стороны, распространение субурбанизации (в классическом определении). Совокупность перечисленных факторов приводит к усложнению социального состава и усилению внутренней неоднородности образа жизни населения пригородных районов.

Географические исследования пригородной сельской местности многочисленны как в России, так и за рубежом [Lynch, 2005; Wiggins, Proctor, 2001]. В зарубежной географии в XX в. получила распространение идея сельско-городского континуума как совокупности стадий пространственно выраженного континуального перехода между городом и селом [Dewey, 1960]. Для российских регионов типология сельско-городских континуумов была предложена А.И. Трейвишем [Трейвиш, 2016]. В российской социально-экономической географии исследования сельско-городских континуумов выполняются преимущественно через анализ возвратной пространственной мобильности населения в агломерациях – в форме сезонной дачной мобильности [Махрова, 2017; Нефедова, 2015], «маятниковых» миграций населения [Между домом..., 2016], расширения сети коттеджных поселков, не имеющих поселенческого статуса [Махрова, 2014]. Помимо многовекторного изучения трансформационных процессов в пределах столичных Московской [Браде и др., 2013; Гусева, 2012; Русанов, 2023] и Санкт-Петербургской агломераций [Михеева, 2012], ранее были выполнены исследования сезонной дачной субурбанизации в Пермской агломерации [Щепеткова, 2018], а также субурбанизации в целом вокруг городов Сибири – Иркутска [Григоричев, 2013], Улан-Удэ [Бреславский, 2014] и Тюмени [Шелудков, 2020].

Упомянутые работы включают в себя анализ разнонаправленных как безвозвратных, так и временных возвратных миграций населения в приго-

родных зонах. Трансформация сельской местности в них рассматривается в основном как следствие и результат описываемых миграционных процессов. В настоящей же работе предпринимается попытка анализа социально-экономических изменений в сельской местности пригородного района через фокус рассмотрения эволюции сельского расселения, в частности трансформации элементов систем расселения – сельских населенных пунктов (СНП).

В качестве территории исследования выбран Чебоксарский муниципальный округ Чувашской Республики¹. Выбор обусловлен двумя факторами: во-первых, ярко выраженной спецификой сельской местности Чувашии (полиэтничного региона с поздним началом урбанизации, повышенной долей и высокой плотностью сельского населения), во-вторых, исключительно быстрым ростом Чебоксарской агломерации, совокупная численность городских жителей которой с 1970 г. по настоящее время увеличилась почти в 2,5 раза. Т.Г. Нефедова пишет, что *«сельская местность Чувашии по ряду социально-экономических признаков похожа на южную республику, каким-то образом занесенную в средние широты и, с другой стороны, позволяет предположить, что было бы сегодня с русской деревней, если бы не ее депопуляция»* [Нефедова, 2017, с. 182]. В этой связи интересна локальная специфика пригородного района, образ жизни сельского населения которого сохранил много традиционных и архаичных черт [Харитонов, 2017].

Цель выполненного авторами исследования заключалась в характеристике пространственной дифференциации трансформации СНП пригородного Чебоксарского района в 1989–2021 гг. с учетом региональной специфики. Выдвинута гипотеза, что характер социально-экономической трансформации населенных пунктов в пределах пригородного района внутренне неоднороден – ее направленность может описываться в соответствии с центр-периферийной пространственной моделью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Информационной основой исследования послужил массив сведений, собранных в ходе двух его этапов – подготовительного и полевого. Подготовительный этап включал в себе предварительный сбор статистической и иной информации о сельской местности Чебоксарского района.

¹ Границы Чебоксарского муниципального округа соответствуют границам административно-территориальной единицы – Чебоксарского административного района. Для упрощения под Чебоксарским районом будем рассматривать единицу муниципального устройства Чебоксарский муниципальный округ.

Собранные на подготовительном этапе сведения можно объединить в несколько групп: 1) людность СНП по результатам переписей 1979, 1989, 2002 и 2010 гг. [Энциклопедия Чебоксарского..., 2014]; 2) список сельскохозяйственных, образовательных организаций, медицинских и культурных учреждений, функционировавших на территории Чебоксарского района в позднесоветское время [Энциклопедия агропромышленного..., 2017; Энциклопедия Чебоксарского..., 2014]; 3) сведения обо всех организациях различных видов экономической деятельности (включая садовые некоммерческие, огороднические и дачные товарищества и коллективные (фермерские) хозяйства (К(Ф)Х), образованные после 1991 г. [СПАРК..., 2023; Единый..., 2023], с указанием лет их регистрации и ликвидации и среднесписочной численности занятых по данным ФНС (в случае субъектов малого и среднего предпринимательства)). Факт соответствия мест регистрации юридических лиц и мест осуществления фактической деятельности проверялся по доступному с 2003 г. архиву сайта администрации Чебоксарского муниципального округа [Чебоксарский..., 2023] и по реестрам объектов животноводства и растениеводства Россельхознадзора [Перечни..., 2023].

С использованием инструмента построения маршрутов в сервисе «Яндекс Карты» [Яндекс..., 2023] для каждого СНП было рассчитано расстояние по автомобильным дорогам с твердым покрытием до главпочтамта г. Чебоксары, соответствующее наименьшим затратам времени в пути на легковом автомобиле в 12:00 в летний будний день в отсутствие пробок. Расстояние (в км) и время в пути (в мин) рассчитывались как среднее арифметическое между показателями в прямом (от СНП до города) и обратном направлениях.

Через сопоставление топографических карт местности ориентировочно 1984–1986 гг. (масштаба 1:100 000), 2001 г. (масштаба 1:25 000) и дешифрованных аэрофотоснимков 2010 и 2021 гг. [Чебоксары – старые..., 2023; Google..., 2023] для каждого СНП были определены факты изменения площади индивидуальной жилой застройки (с сер. 1980-х до 2010 г.), строительства новых жилых домов (после 2010 г.), времени появления и ликвидации садовых товариществ.

В ходе полевого этапа в феврале и в июле 2022 г. были посещены районная администрация, районный архив и центры шести существовавших на тот момент муниципальных образований, различающихся по степени транспортной доступности г. Чебоксары, по интенсивности дачного освоения и по темпам строительства в постсоветский период (центры Атлашевского, Ишакского, Ишлейского, Синьяльского, Хыркасинского и Шинерпосинского сельских посе-

лений). При посещении каждого сельского поселения были проведены полупоформальные экспертные интервью (суммарно более 25) с представителями сельских администраций, работниками сферы культуры, краеведами и старожилами. Средняя продолжительность экспертных интервью составляла около 60 минут. Кроме того, были посещены отдельные организации АПК (например, молочный комплекс в Атлашевском сельском поселении). По результатам общения с сельскими жителями в с. Ишлеи и пос. Новое Атлашево в феврале 2022 г. собран массив из около 20 неформальных интервью.

Таким образом, методика исследования подразумевала выполнение его на районном (по всем СНП) и локальном (по шести ключевым СНП) уровнях. На районном уровне различия в постсоветской трансформации СНП оценивались с использованием количественных методов и геоинформационных систем, на уровне ключевых населенных пунктов описывались через применение качественных социологических методов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расположенный на севере республики Чебоксарский район выгодно выделяется экономико-географическим положением – он непосредственно граничит с городскими округами Чебоксары и Новочебоксарск, по его территории проходят железнодорожная ветка Канаш – Чебоксары и автомобильные дороги федерального значения М7 «Волга» и Р-176 «Вятка». В постсоветское время пригородный район стал одним из основных центров производства сельскохозяйственной продукции – концентрируя 14,5% сельского населения Республики, в среднем за 2020–2022 гг. в Чебоксарском районе в хозяйствах всех категорий производилось 14,8% региональной продукции растениеводства и 25,9% продукции животноводства (в том числе 48,9% мяса и мясопродуктов). Абсолютное большинство существовавших в позднесоветское время агропредприятий, изменив организационно-правовую форму, функционируют и в настоящее время.

Районный центр – фактически слившийся с Чебоксарами поселок городского типа Кугеси людностью более 13 тыс. чел., население которого в 1985–2005 гг. считалось городским. Несмотря на то, что юридически его население сейчас считается сельским, он был исключен из числа рассматриваемых СНП – без ПГТ Кугеси в пределах района 171 населенный пункт. Плотность сельского населения велика – она превышает 52 чел./км², и это с учетом обширной лишенной постоянного населения левобережной части района. Свыше 85% сельского населения района по переписи 2021 г. – верховые

и средненизовые чувашаи. 62,5% населения используют в повседневной жизни чувашский язык.

Система сельского расселения в пределах района преимущественно сформировалась в XVIII–XIX вв. Ее развитие в XX в. до 1980-х гг. характеризовалось сокращением количества СНП за счет объединения небольших деревень-околотков в более крупные деревни и села по мере роста сельского населения и расширения площади СНП [Социально-экономический..., 2013]. Средняя людность СНП по данным 2021 г. составляла 285 чел., медианная – 162 чел.

Для определения динамики сельского населения в постсоветское время предложен показатель изменения численности сельского населения Чебоксарского района относительно величины, средней для региона (рис. 1). Для его расчета сначала вычислялось отношение численности сельского населения Чувашской Республики на конец межпереписного периода к численности на начало периода [Итоги..., 2023; Переписи..., 2023]². Аналогичное отношение суммарной людности на конец и начало межпереписного периода рассчитывалось для СНП, центры которых расположены внутри контуров квадратов равной площади. Затем вычислялось частное от деления агрегированной по квадратам сетки величины отношения динамики суммарной людности расположенных в них СНП на ранее полученное отношение динамики численности сельского населения региона в целом. Величина показателя больше 1 означает более позитивную динамику населения в пределах квадрата, чем в среднем по региону (т. е. прирост сельского населения или менее интенсивную убыль), менее 1 – более негативную. В целом за 1979–2021 гг. население Чебоксарского района (без населения современной территории ПГТ Кутеси) сократилось незначительно – с 50,8 тыс. чел. до 48,8 тыс. чел.

Распределение величины рассчитанного показателя по территории Чебоксарского района (см. рис. 1) свидетельствует об отсутствии круглогодично выраженной субурбанизации в межпереписные периоды 1979–1989 гг. и 1989–2002 гг. (при наличии интенсивной сезонной дачной субурбанизации). В постсоветское время периферийные части Чебоксарского района и вовсе характеризовались убылью сельского населения, превышавшей среднереспубликанские показатели – положительная динамика отмечалась преимущественно вокруг «центральных усадеб» колхозов и совхозов, находившихся на основных автомобильных дорогах. В преимущественно кризисный период 1989–2002 гг. центр-периферийные

различия динамики населения слабо выражены, однако большая часть района более благополучна относительно республиканского уровня. В 2002–2010 и 2010–2021 гг. рост населения пригородного района уже сопровождался классической субурбанизацией: в 2000-е гг. сформировалась обширная пригородная зона к югу от г. Чебоксары, а в 2010-е гг. – к юго-востоку (между Чебоксарами и Новочебоксарском). И только в последнее десятилетие начала ярко проявляться зональность в пространственной концентрации населения в направлении с севера на юг – от ядра агломерации к периферии.

Проявления зональности в трансформации сельской местности пригородного района. На рис. 2 представлен анализ пространственно выраженных процессов постсоветского жилищного освоения территории Чебоксарского района: 1) дачного освоения (прежде всего, в форме появления садовых и дачных товариществ) и 2) жилищного строительства в пределах СНП на земельных участках, ранее свободных от застройки. Пик интенсивности дачного освоения вокруг Чебоксар и Новочебоксарска пришелся на конец 1970-х – конец 1990-х гг. В начале 1980-х гг. экспансия дачных массивов вышла за пределы городов и на протяжении двух десятилетий распространялась по территории пригородного района. Как в пределах города, так и в Чебоксарском районе, массивы дач в значительной мере располагались в непригодных для иной застройки неудобьях, соседствуя с СНП, исторически находящимися по бортам долин малых рек и ручьев.

Жилые дома в СНП активно возводились как в 1980-е гг., так и в настоящее время. Индивидуальная жилищная застройка конца 1980-х гг. преимущественно возводилась в центральных усадьбах колхозов и совхозов в рамках проектов реконструкции их внешнего облика. В 1990-е гг. активное индивидуальное жилищное строительство охватило сначала черту города, притом там оно проявлялось в двух поляризованных формах – статусных коттеджных поселков и поселков «самостроя». Последние появились в конце 1970-х – начале 1980-х гг., когда в период стихийной неконтролируемой урбанизации получившие паспорта сельские жители начали переезжать в региональный центр в обход механизма распределения на трудоустройство. Проживали они в таком случае в возведенных на скорую руку домах, расположенных вокруг промышленных предприятий – мест трудоустройства. В 1990-е – начале 2000-х гг. на самозанятых территориях взамен старых домов начали возводиться капитальные строения, в том числе из кирпича. Сейчас отличительными чертами этих поселков являются очень плотная застройка, узкие улицы, отсутствие газификации, централизованного водоснабжения и неопределенный юридический статус.

² В обоих случаях сельское население бралось за вычетом, во-первых, населения сел – районных центров, во-вторых, населения бывших городских населенных пунктов и, в-третьих, СНП, население которых позднее стало городским (при наличии населенных пунктов этих типов).

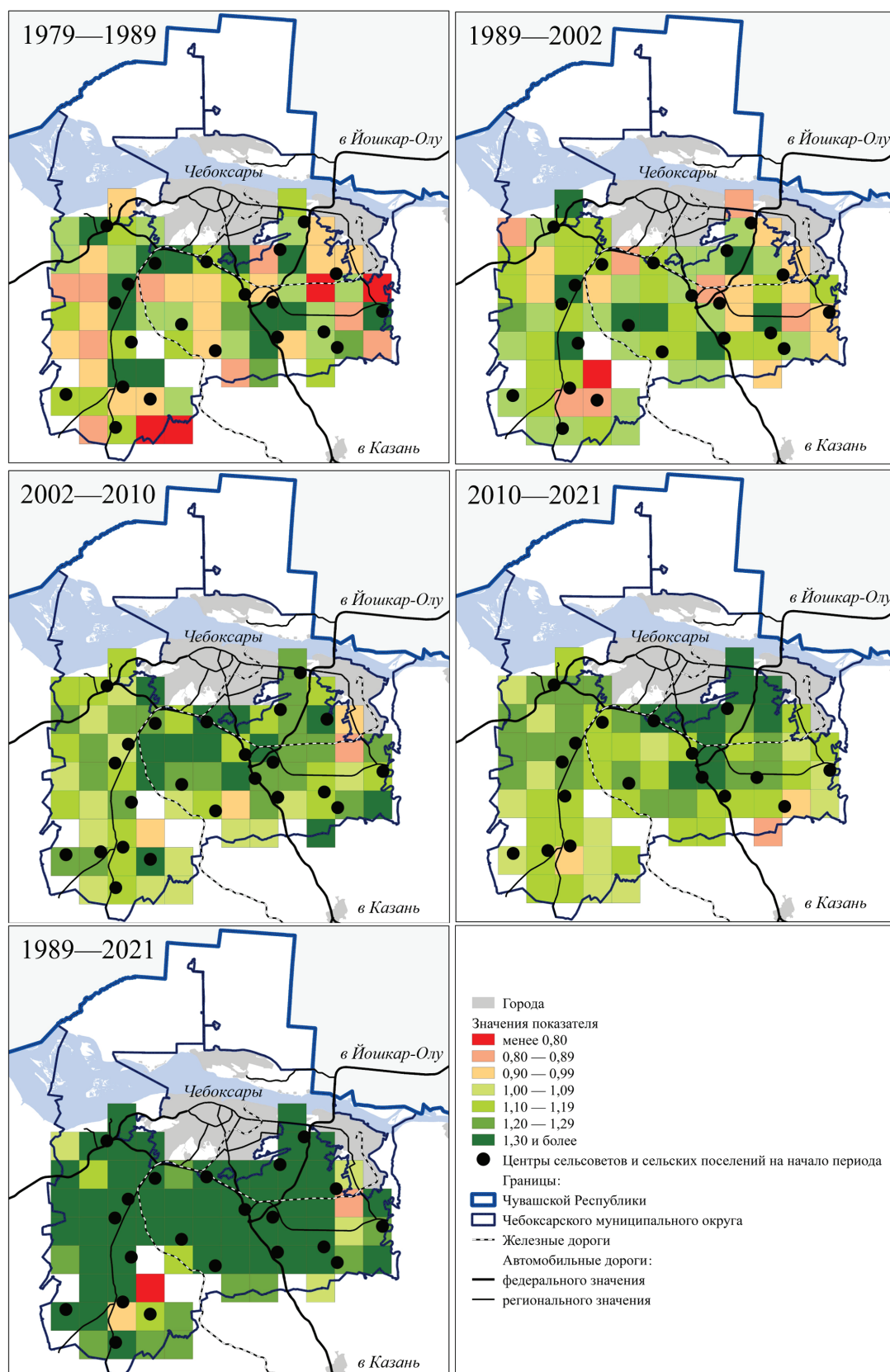


Рис. 1. Динамика численности наличного сельского населения на территории Чебоксарского муниципального округа относительно среднего по региону показателя.

Источник: составлено авторами

Fig. 1. Dynamics of the rural population numbers within the territory of the Cheboksary Municipal District relative to regional average. Source: compiled by the authors

После 2002 г. интенсивное индивидуальное жилищное строительство в городах прекратилось – районами концентрации новых индивидуальных жилых домов теперь стали СНП, прилегающие к федеральным и региональным автомобильным дорогам с хорошей транспортной доступностью города. Приобретателями земельных участков в них становились сельские жители более периферийных сельских районов, трудоустроенные в городе, но неспособные позволить себе покупку городской квартиры по материальным причинам. В 2010-е гг. основным направлением освоения территории стала организация коттеджных поселков строительными компаниями на землях, изъятых из сельскохозяйственного использования и включенных в границы СНП. Клубные и элитные коттеджные поселки с огороженной территорией, контрольно-пропускными пунктами на въезде, независимыми коммуникациями и домами в едином стиле возводятся в западном направлении от города в непосредственной близости от Волги, нередко с возможностью спуска к реке. Во всех существующих коттеджных поселках (суммарно их около 25) отсутствует социальная инфраструктура кроме облагороженных общественных пространств – основная нагрузка ложится на существующие в СНП социальные учреждения. Подавляющее большинство владельцев коттеджей трудоустроено в городе, но зарегистрировано по месту проживания – в отличие от столичных агломераций коттеджи являются круглогодично обитаемыми.

Таким образом, по характеру процессов дачного освоения и индивидуального жилищного строительства после 1985 г. в пределах Чебоксарского района возможно выделение трех зон, обозначенных как I, II и III на рис. 2, 3 и 4: непосредственно пригородной (I), переходной (II) и традиционной сельской (III).

Примыкающая к городам *непосредственно пригородная зона* характеризуется как интенсивным созданием садовых и дачных товариществ на всем протяжении 1970–1990-х гг., так и строительством жилых домов в СНП в 2000–2010-е гг. и возведением коттеджных поселков в последнее десятилетие. Созданные ранее садовые товарищества в пределах этой зоны продолжают функционировать и в настоящее время. Поля с посевами сельскохозяйственных культур отсутствуют – сельское хозяйство представлено тепличными комплексами и фермерами, выращивающими плодово-ягодные культуры. Ведение личных подсобных хозяйств (ЛПХ) сельскими жителями ограничено – оно представлено растениеводством, реже – содержанием домашней птицы. Зона ограничена изохронами 27–30 минут по дорогам федерального значения и 23–25 минут по региональной трассе от центра г. Чебоксары (см.

рис. 3). В сторону Волги и г. Новочебоксарск граница отдалается до изохроны 40 минут в пути.

Переходная зона отличается наибольшим разнообразием социально-экономической деятельности, а также сезонного и постоянного населения. Садовые товарищества, возникшие в конце 1980-х – в 1990-е гг. преимущественно ликвидированы. Большая часть участков заброшена из-за отдаленности от города – жилыми являются только товарищества рядом с крупными СНП с многоквартирными домами и в пешей доступности от железнодорожных станций. Темпы индивидуального жилищного строительства в 2000-е гг. здесь заметно превосходили по интенсивности темпы в 2010-е гг. Все немногочисленные коттеджные поселки – экономкласса: с покрытыми щебнем дорогами, отсутствием освещения и какого-либо благоустройства. Вместе с тем именно в переходной зоне расположены крупнейшие сельхозорганизации района, ориентированные на спрос со стороны горожан – три птицефабрики, свинокомплекс, молочные и мясные фермы крупного рогатого скота (КРС). Наиболее активно фермерство представлено овощеводством и молочным направлением скотоводства. Активность ведения ЛПХ в постсоветское время резко сокращается, тем не менее сельские жители продолжают держать крупный и мелкий рогатый скот. Граница зоны по региональной трассе проходит по изохронам 28–30 минут от центра г. Чебоксары, по федеральным трассам переходная зона простирается за пределы Чебоксарского района.

Традиционная сельская зона испытывает наименьшее влияние города – садовых товариществ горожан здесь не было изначально, активное жилищное строительство не ведется с конца 1980-х гг. Сельское хозяйство представлено преимущественно выращиванием зерновых культур, требующих больших пахотных площадей. Для постоянного населения по-прежнему велико значение ЛПХ как одного из источников средств к существованию. Коттеджные поселки отсутствуют, а подавляющее большинство дачников – переехавшие в город уроженцы деревень и сел, на летний период приезжающие в родные места.

Трансформация сельских населенных пунктов в пределах различных зон. Для определения характера трансформаций населенных пунктов выделены типы СНП пригородного района. В соответствии с предложенными А.И. Алексеевым методическими подходами к типологии СНП в современных демографических и социально-экономических условиях [Алексеев, Сафронов, 2017] все населенные пункты разделены на четыре основных типа: 1) субцентры в пределах района, 2) локальные центры расселения, 3) специализированные поселения и 4) «спальные» поселения (см. рис. 4).

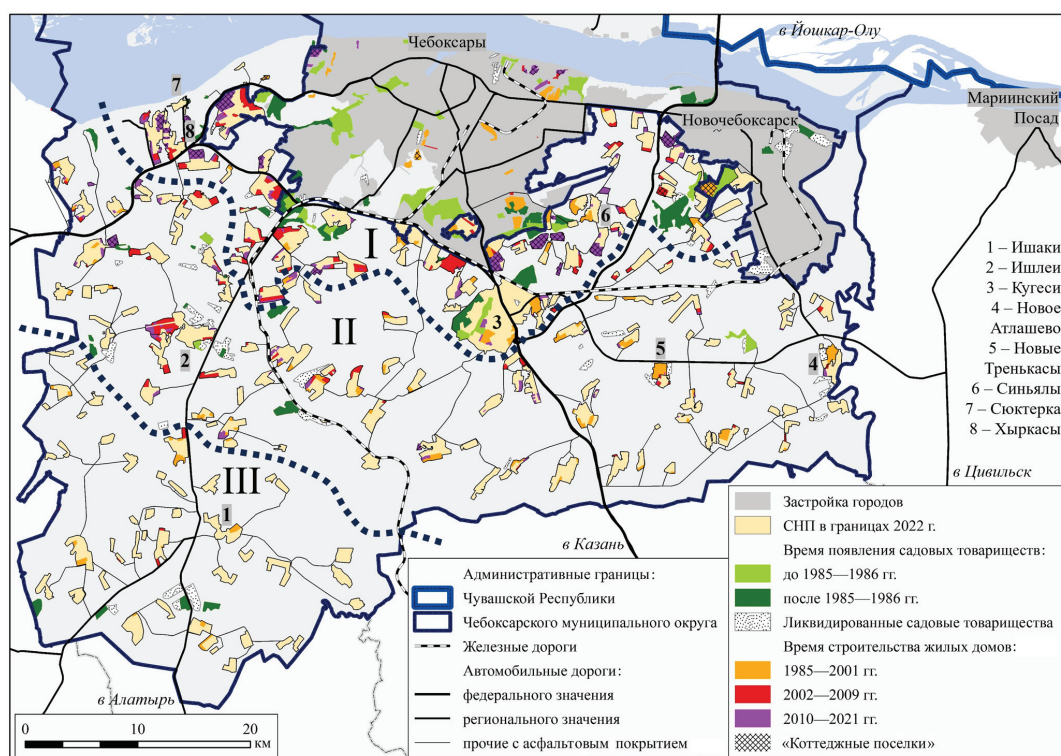


Рис. 2. Дачное освоение и жилищное строительство на территории Чебоксарского муниципального округа в позднесоветский и постсоветский периоды.

Источник: составлено авторами

Fig. 2. Dacha development and housing construction within the territory of the Cheboksary Municipal District in the late Soviet and post-Soviet periods. Source: compiled by the authors

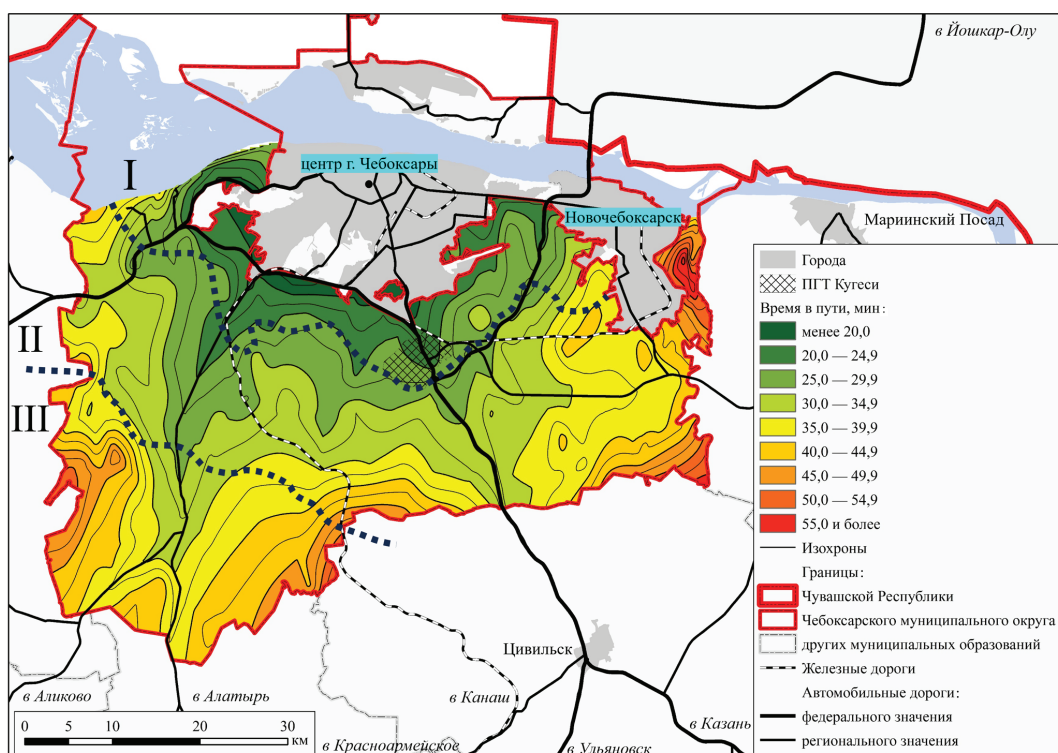


Рис. 3. Транспортная доступность центра г. Чебоксары на территории Чебоксарского муниципального округа.

Источник: составлено авторами

Fig. 3. Transport accessibility of the center of the city of Cheboksary from the territory of the Cheboksary Municipal District. Source: compiled by the authors

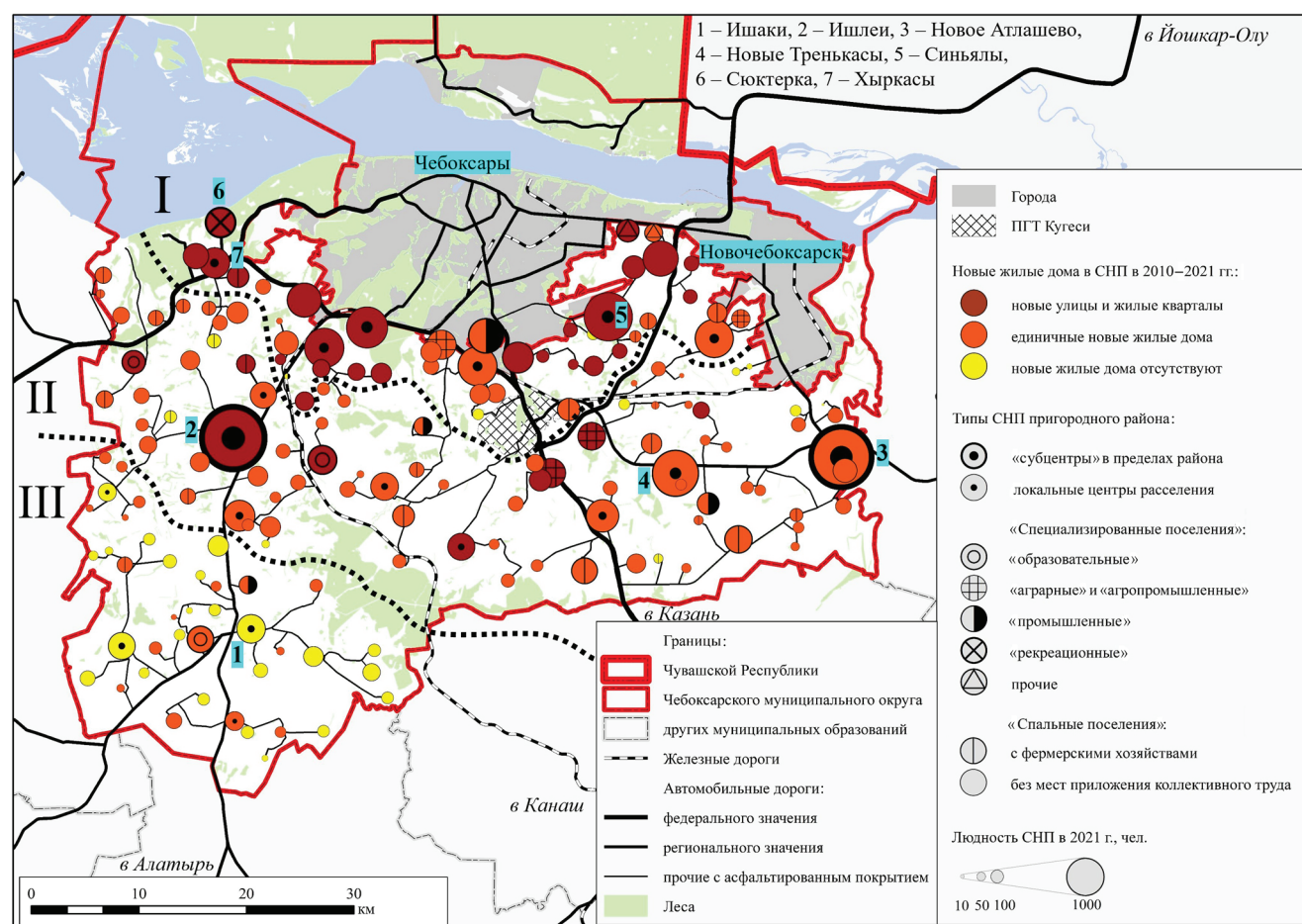


Рис. 4. Типология сельских населенных пунктов Чебоксарского муниципального округа по характеру занятости населения и по интенсивности жилищного строительства за 2010–2021 гг. *Источник:* составлено авторами

Fig. 4. Typology of rural settlements of the Cheboksary Municipal District by the type of employment and the intensity of housing construction during 2010–2021. *Source:* compiled by the authors

К числу *субцентров* отнесены бывший районный центр село Ишлеи и агропромышленный поселок Новое Атлашево людностью около 3 тыс. чел. каждый, расположенные в переходной зоне. В отличие от других СНП субцентры обладают большим разнообразием мест приложения труда (завод высоковольтной аппаратуры, мясной и рыбный цеха в с. Ишлеи, птицефабрика, молочный комплекс и специализирующаяся на животноводстве агрофирма в пос. Новое Атлашево). Более 50% их населения проживают в многоквартирных домах. Летом в период отпусков жители этих СНП, как и в позднесоветское время, занимаются овощеводством в садоводческих товариществах, на территорию которых в последние годы активно проводится газоснабжение. В наиболее крупных СНП широко распространена форма проживания семей «на два дома» – с квартирой в субцентре и с индивидуальным жилым домом с участком в одной из окружающих деревень, при котором сельчане могут содержать домашнюю птицу и даже мелкий и крупный рогатый скот. Примером таких населен-

ных пунктов являются село Ишлеи и расположенная рядом деревня Мускаринкасы.

Локальными центрами расселения (16 СНП) считались населенные пункты с наличием либо основной, либо средней общеобразовательной школы и как минимум одной малой или средней коммерческой организации со среднесписочной численностью занятых не менее 15 человек. В случае же отсутствия школы, но при наличии не менее 15 рабочих мест в организациях внебюджетной сферы СНП был отнесен к категории специализированных поселений (17 СНП – образовательных, аграрных и агропромышленных, промышленных и рекреационных в зависимости от профиля деятельности организации-работодателя). «Спальными» поселениями считались населенные пункты (136 СНП) без школ и малых и средних организаций с единичными рабочими местами в магазинах, в фермерских хозяйствах (25 СНП) или в бюджетных учреждениях культуры.

В зависимости от расположения СНП в пределах зон по отношению к городу и принадлежности

их к определенному выделенному типу различен и характер происходивших в постсоветское время трансформаций.

В непосредственно пригородной зоне миграционный приток населения проявлялся во всех СНП, о чем можно судить по появлению новых улиц и жилых кварталов в их пределах (см. рис. 4). Отсутствие новых кварталов в отдельных СНП обусловлено лишь ограничениями площади для их дальнейшего территориального расширения. Фактор наличия рабочих мест в СНП не влияет на динамику населения, так как подавляющее большинство сельских жителей вовлечено в «маятниковые» трудовые миграции. Прирост населения здесь обеспечивается в основном классической субурбанизацией бывших горожан, покупающих взамен квартир участки в коттеджных поселках. Как следствие, большинство домовладений – круглогодично обитаемые.

В переходной зоне преобладающая часть населения также вовлечена в ежедневные «маятниковые» миграции – автоматизация производственных процессов в многочисленных аграрных и агропромышленных организациях приводит к высвобождению трудовых ресурсов и дефициту рабочих мест. Новые жилые дома есть во всех СНП кроме «спальных» поселений с фермерскими хозяйствами из-за их меньшей рекреационной привлекательности (см. рис. 4), так как строительство в основном ведется горожанами, покупающими участки для дачного использования. Новые улицы и жилые кварталы появляются либо в локальных центрах расселения, либо в образовательных центрах со школами, либо в аграрных и агропромышленных центрах с немногочисленными рабочими местами – в эти СНП переезжают на постоянное место жительства из других сельских районов. Однако немногочисленный миграционный приток не способен перекрыть убыль населения.

В традиционной сельской зоне возводятся лишь единичные новые жилые дома – дачные домовладения, притом чаще в более привлекательных для рекреации небольших СНП (в «спальных» поселениях без рабочих мест). Сезонно обитаемыми в пределах зоны в целом являются до 30–40% домовладений. Случаи переезда жителей, ранее не имевших каких-либо родственных связей с территорией, единичны – это в основном энтузиасты и дауншифтеры³.

Различия постсоветской динамики людности СНП разных типов в зависимости от расстояния

до центра агломерации приведены на рис. 5. На левом графике (А) отражена динамика людности в 1989–2021 гг. СНП двух типов в зависимости от их положения в колхозно-совхозной экономике. На правом графике (Б) приведены различия динамики людности СНП, типы которых выделены на момент 2002 г. в соответствии с новой типологией.

Различия между центральными усадьбами колхозов и совхозов, концентрировавшими в конце 1980-х гг. места приложения труда и учреждения обслуживания населения, и прочими СНП в постсоветский период усилились. На расстоянии менее 30 км от центра города (в пределах непосредственно пригородной и переходной зон) различия в динамике населения устойчивые, в то время как на отдалении более 35 км они резко возрастают. Это справедливо и для правого графика – «спальные» поселения без мест приложения труда на отдалении менее 30 км от города обладают даже лучшей динамикой людности, чем у центров расселения, в то время как на большем расстоянии проявляется поляризация расселения. «Спальные» поселения с фермерами, находящиеся ближе 35 км от города, являются СНП с наихудшей динамикой в пределах зоны из-за наименьшей их привлекательности для дачного освоения.

Таким образом, в пригородном районе в постсоветское время при сильном центр-периферийном градиенте социально-экономического освоения территории именно транспортная доступность города выступает в роли определяющего фактора различий постсоветской динамики населения СНП. В свою очередь, в традиционной сельской зоне резко усиливается значение фактора наличия рабочих мест в самом СНП или в непосредственной близости от него.

ВЫВОДЫ

Сельская местность пригородного района описывается высокой степенью пространственной неоднородности социально-экономической деятельности, соотношения сезонного и постоянного населения в зависимости от положения относительно города-центра и локальной специфики места.

В пределах слаборазвитой городской агломерации с высокой активностью «маятниковых» трудовых миграций населения наибольшая интенсивность субурбанизации (как процесса переселения городского населения в пригороды на постоянное место жительства) характерна для сельских населенных пунктов ближнего пояса пригородной зоны, миграционного притока населения из периферийных сельских районов – для более отдаленных населенных пунктов.

На данный момент наибольшие различия между постоянным и летним сезонным населением отмечены в небольших деревнях на периферии приго-

³ Цитата по интервью в одном из СНП традиционной сельской зоны: «Вот переехал к нам недавно из города молодой фермер-айтишник Денис, не регистрируется как К(Ф)Х, но активно ведет социальные сети – ищет там людей для производства сыров, планирует участки для расширения. Мы, местные, называем его отшельником, так как он и зимой живет у нас в деревне».

родного района в краевой зоне агломерации – это следствие миграционного оттока в города сельских жителей, возвращающихся в летний период в сельскую местность, а не приобретения сельских домов городскими жителями.

При сильном центр-периферийном градиенте социально-экономического освоения территории определяющим фактором постсоветской трансформации сельских населенных пунктов пригородного

района является их транспортная доступность по отношению к городу-центру.

Фактор наличия рабочих мест в населенном пункте в пределах непосредственно пригородной зоны не имеет важного значения для его устойчивости – наоборот, наилучшей динамикой населения в пригородном районе обладают именно «спальные» поселения без рабочих мест, постепенно трансформирующиеся в коттеджные поселки.

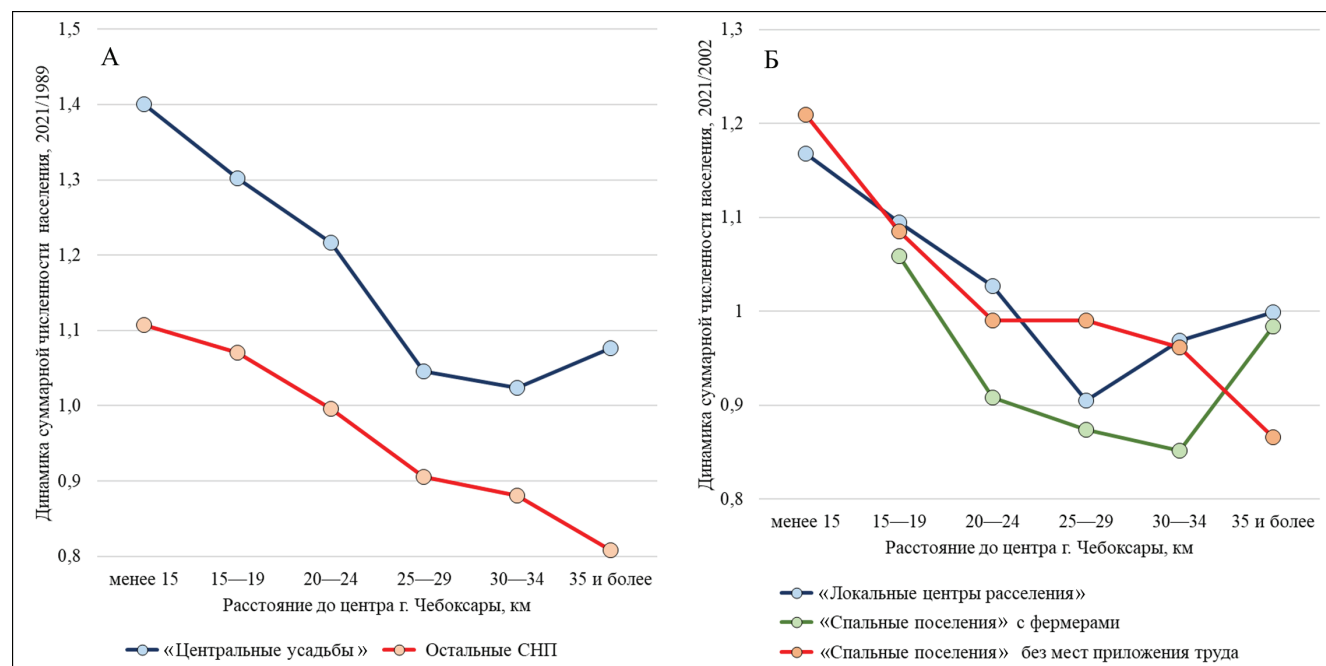


Рис. 5. Динамика численности населения сельских населенных пунктов различных типов в зависимости от их удаленности от центра г. Чебоксары.

Источник: составлено авторами

Fig. 5. Population dynamics in the rural settlements of various types depending on their distance from the center of the city of Cheboksary. Source: compiled by the authors

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-17-00107 «Малые города и сельские населенные пункты в системе расселения регионов России (1989–2021)»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.И., Сафронов С.Г. Типология сельских населенных пунктов Европейской части России в современной демографической и социально-экономической ситуации // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 6. С. 55–61.
- Браде И., Махрова А.Г., Нефедова Т.Г., Трейвиш А.И. Особенности субурбанизации в Московской агломерации в постсоветский период // Известия РАН. Сер. геогр. 2013. № 2. С. 19–29.
- Бреславский А.С. Незапланированные пригороды: сельско-городская миграция и рост Улан-Удэ в постсоветский период. Улан-Удэ: Издательство БНЦ СО РАН, 2014. 192 с.
- Григоричев К.В. В тени большого города: социальное пространство пригорода. Иркутск: Оттиск, 2013. 248 с.
- Гусева Е.С. Трансформация функций сельской местности Подмосквья за 20 лет рыночных преобразований // Региональные исследования. 2012. № 2. С. 47–58.
- Махрова А.Г. Полиерархический анализ сезонной дачной субурбанизации в современной России // Региональные исследования. 2017. № 3. С. 23–34.
- Махрова А.Г. Роль организованных коттеджных поселков в развитии субурбанизации в постсоветской России // Известия РАН. Сер. геогр. 2014. № 4. С. 49–59.
- Михеева З.А. Субурбанизация как инструмент решения жилищной проблемы Санкт-Петербурга и Ленинградской области: дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2012. 157 с.

- Между домом и... домом. Возвратная пространственная мобильность населения России / под ред. Т.Г. Нефедовой, К.В. Аверкиевой, А.Г. Махровой. М.: Новый хронограф, 2016. 504 с.
- Нефедова Т.Г. Российские дачи в разном масштабе пространства и времени // Демоскоп Weekly. 2015. № 657–658. С. 1–20.
- Нефедова Т.Г. Десять актуальных вопросов о сельской России: ответы географа. М.: ЛЕНАНД, 2017. 456 с.
- Русанов А.В. Социально-экономические предпосылки и географические особенности дачного освоения Московской области: дис. ... канд. геогр. наук. М., 2023. 162 с.
- Социально-экономический атлас Чувашской Республики / Ю.Р. Архипов и др. Чебоксары: Чуваш. кн. изд-во, 2013. 111 с.
- Трейвиш А.И. Сельско-городской континуум: региональное измерение // Вопросы географии. 2016. Вып. 141. С. 51–72.
- Харитонова В.Г. Крестьянство Чувашии: хозяйство, социальное развитие и повседневный быт (1946–1990 гг.). Чебоксары: Чувашский государственный институт гуманитарных наук, 2017. 284 с.
- Шелудков А.В. Трансформация сельского расселения Тюменской области в постсоветский период: дис. ... канд. геогр. наук. М., 2020. 173 с.
- Щепеткова И.О. Территориальная организация садоводческих образований в пригородах Перми // Известия РАН. Сер. геогр. 2018. № 4. С. 46–54.
- Энциклопедия агропромышленного комплекса Чувашской Республики / авт.-сост. А.П. Леонтьев. Чебоксары: Чуваш. кн. изд-во, 2017. 702 с.
- Энциклопедия Чебоксарского района / науч. ред. Э.И. Патмар; сост. Е.С. Васильева, С.В. Иванова. Чебоксары, 2014. Т. 1. 500 с.
- Dewey R. The Rural-Urban Continuum: Real but Relatively Unimportant, *American Journal of Sociology*, 1960, vol. 66, no. 1, p. 60–66.
- Lynch K. *Rural-urban interaction in the developing world*, London, New York, Routledge, 2005, 224 p.
- Wiggins S., Proctor S. How special are rural areas? The economic implications of location for rural development, *Development Policy Review*, 2001, vol. 19, no. 4, p. 427–436.
- Электронные ресурсы
- СПАРК – проверка контрагента. URL: <https://spark-interfax.ru/> (дата обращения 19.10.2023).
- Единый реестр субъектов малого и среднего предпринимательства. URL: <https://ofd.nalog.ru/> (дата обращения 19.10.2023).
- Итоги переписей // Книга переписей. URL: <https://www.statmuseum.ru/ru/results/> (дата обращения 19.10.2023).
- Переписи и обследования // Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Чувашской Республике. URL: <https://21.rosstat.gov.ru/folder/97254> (дата обращения 19.10.2023).
- Перечни объектов федерального государственного контроля (надзора) // Федеральная служба по ветеринарному и фитосанитарному надзору по Чувашской Республике и Ульяновской области. URL: <https://21.fsvps.gov.ru/obekty-nadzora/po-chuvashskoj-respublike/> (дата обращения 19.10.2023).
- Чебоксарский муниципальный округ Чувашской Республики // Официальный портал органов власти Чувашской Республики. URL: <https://chebs.cap.ru/> (дата обращения 19.10.2023).
- Чебоксары – старые карты // Старые карты городов России и Зарубежья – Ретромап. URL: <https://retromap.ru/> (дата обращения 19.10.2023).
- Яндекс Карты – транспорт, навигация, поиск мест. URL: <https://yandex.ru/maps> (дата обращения 19.10.2023).
- Google Планета Земля. URL: <https://earth.google.com> (дата обращения 19.10.2023).

Поступила в редакцию 26.10.2023

После доработки 16.11.2023

Принята к публикации 04.12.2023

SOCIO-ECONOMIC TRANSFORMATION OF RURAL SETTLEMENTS IN THE SUBURBAN MUNICIPAL DISTRICT OF THE CITY OF CHEBOKSARY OVER THE PAST 30 YEARS

A.S. Chuchkalov¹, G.A. Zyryanov², D.V. Martemyanov³

^{1–3} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Economic and Social Geography of Russia*

¹ *Postgraduate student; e-mail: chuchkalov_sashka@mail.ru*

² *Postgraduate student; e-mail: ziryryanov.geo@gmail.com*

³ *Master's student; e-mail: dany-c1998@yandex.ru*

Suburban rural areas are characterized by a number of various relationships between rural and urban populations. A common feature of suburban areas in the post-Soviet period is the intensification of two types of spatially expressed relationships, namely labour migrations of rural population to the city centre and dacha recreational trips of city residents to the countryside. The article considers the regional specifics of the Chuvash Republic (a multi-ethnic region with an increased share of rural population and a rapid expansion of the regional centre agglomeration), and identifies factors of spatial heterogeneity of the post-Soviet transformation

of the population of villages in the suburban Cheboksary district. The analysis of the evolution of settlements was preceded by a spatial analysis of the regional rural population dynamics by inter-census periods since 1979. Territorial differences in the intensity of both the emergence of gardening partnerships, and individual housing construction allow the identification of three spatial zones according to the nature of the interaction of rural areas with the city centre: 1) “immediately suburban”; 2) “transitional” and 3) “traditional rural”. The settlements of the “immediately suburban” zone are characterized by the highest intensity of relocation of the urban dwellers to permanent residence i.e. the classical suburbanization. The “transitional” zone experiences the largest migration influx of population from peripheral rural areas, and the “traditional rural” zone demonstrates the largest relative differences between the permanent and summer seasonal population numbers. Rural settlements of different types are characterized within each zone, such as local rural centres, “dormitory settlements” with farms and “dormitory settlements” without places of collective labour. The post-Soviet population dynamics of settlements located at different distances from the city was analyzed, and a conclusion was made about the primary role of transport accessibility of the city centre as a factor in the spatial differentiation of the distribution of the rural population. The availability of jobs in a settlement within the “immediately suburban” zone is not important for its sustainability, while on the contrary, the role of this factor increases in the “traditional rural” zone of the district. As a result, “dormitory settlements” without jobs are both the best in the region in terms of post-Soviet population dynamics (if they are less than 20 km from the city centre, they are transformed into cottage estates) and the worst (if they are more than 40 km away).

Keywords: suburbanization, dacha seasonal suburbanization, center-periphery structure, cottage estates, Chuvash Republic

Acknowledgments. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 24-17-00107 “Towns and rural settlements in the settlement system of Russian regions” (1989–2021))

REFERENCES

- Alekseev A.I., Safronov P.G. Tipologiya sel'skikh naselennykh punktov Evropeiskoi chasti Rossii v sovremennoi demograficheskoi i sotsial'no-ekonomicheskoi situatsii [Typology of rural settlements in the European part of Russia under recent demographic and socio-economic situation], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2017, no. 6, p. 55–61. (In Russian)
- Brade I., Makhrova A.G., Nefedova T.G., Treivish A.I. Osobennosti suburbanizatsii v Moskovskoi aglomeratsii v postsovet'skii period [Specific features of suburbanization in Moscow agglomeration in the post-Soviet era], *Izvestiya RAN, Ser. Geogr.*, 2013, no. 2, p. 19–29. (In Russian)
- Breslavskii A.P. Nezaplanirovannye prigorody: sel'skogorodskaya migratsiya i rost Ulan-Ude v postsovet'skii period [Unplanned suburbs: rural-urban migration and the growth of Ulan-Ude in the post-Soviet period], Ulan-Ude, Buryat Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2014, 192 p. (In Russian)
- Dewey R. The Rural-Urban Continuum: Real but Relatively Unimportant, *American Journal of Sociology*, 1960, vol. 66, no. 1, p. 60–66.
- Entsiklopediya agropromyshlennogo kompleksa Chuvashskoi Respubliki [Encyclopedia of the agro-industrial complex of the Chuvash Republic], Cheboksary: Chuvash Book Publ., 2017, 702 p. (In Russian)
- Entsiklopediya Cheboksarskogo raiona, t. 1 [Encyclopedia of the Cheboksary district of the Chuvash Republic, vol. 1], nauch. red. E.I. Patmar, sost. Ye.S. Vasil'yeva, S.V. Ivanova, Cheboksary, 2014, 500 p. (In Russian)
- Grigorichev K.V. V teni bol'shogo goroda: sotsial'noe prostanstvo prigoroda [In the shadow of a big city: the social space of the suburb], Irkutsk, Ottisk Publ., 2013, 248 p. (In Russian)
- Guseva E.P. Transformatsiya funktsii sel'skoi mestnosti Podmoskov'ya za 20 let rynochnykh preobrazovaniy [Rural areas functions transformation within the Moscow region during last 20 years], *Regional'nye issledovaniya*, 2012, no. 2, p. 47–58. (In Russian)
- Kharitonova V.G. *Krest'yanstvo Chuvashii: khozyaistvo, sotsial'noe razvitiye i povsednevnyi byt (1946–1990 gg.)* [Peasantry of Chuvashia: economy, social development and everyday life (1946–1990)], Cheboksary, Chuvash State Institute of Humanities Publ., 2017, 284 p. (In Russian)
- Lynch K. *Rural-urban interaction in the developing world*, London, New York, Routledge Publ., 2005, 224 p.
- Makhrova A.G. Polhierarkhicheskij analiz sezonnoj dachnoj suburbanizatsii v sovremennoj Rossii [Poly-hierarchical analysis of seasonal dacha suburbanization in modern Russia], *Regional'nye issledovaniya*, 2017, no. 3, p. 23–34. (In Russian)
- Makhrova A.G. Rol' organizovannykh kottedzhnykh poselkov v razvitiy suburbanizatsii v postsovet'skoi Rossii [The role of organized cottage settlements in the development of suburbanization in post-Soviet Russia], *Izvestiya RAN. Ser. Geogr.*, 2014, no. 4, p. 49–59. (In Russian)
- Mezhdum domom i... domom. Vozvratnaya prostranstvennaya mobil'nost' naseleniya Rossii [Between home and... home. The return spatial mobility of population in Russia], T.G. Nefedova, K.V. Averkieva, A.G. Makhrova (eds.), Moscow, Novyi khronograf Publ., 2016, 504 p. (In Russian)
- Mikheeva Z.A. Suburbanizatsiya kak instrument resheniya zhilishchnoi problemy Sankt-Peterburga i Leningradskoi oblasti [Suburbanization as a tool for solving the housing problem of St. Petersburg and the Leningrad region], Ph.D. Thesis in Geography, Saint Petersburg, 2012, 157 p. (In Russian)
- Nefedova T.G. Desyat' aktual'nykh voprosov o sel'skoi Rossii: Otveti geografa [Ten topical questions about rural Russia. Answers of a geographer], Moscow, LENAND Publ., 2017, 456 p. (In Russian)
- Nefedova T.G. Rossiiskie dachi v raznom masshtabe prostanstva i vremeni [Russian dachas at different scales of space and time], *Demoskop Weekly*, 2015, no. 657–658, p. 1–20. (In Russian)

- Rusanov A.V. *Sotsial'no-ekonomicheskie predposylki i geograficheskie osobennosti dachnogo osvoeniya Moskovskoi oblasti* [Socio-economic prerequisites and geographical features of dacha development in the Moscow region], Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, 2023, 162 p. (In Russian)
- Schepetkova I.O. Dachas in the Suburbs of Perm: History, Territorial Organization, and Regional Features, *Regional Research of Russia*, 2018, vol. 8, no. 4, p. 386–394.
- Sheludkov A.V. *Transformatsiya sel'skogo rasseleniya Tyumenskoi oblasti v postsovetskii period* [Transformation of rural settlement in the Tyumen region in the post-Soviet period], Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, 2023, 162 p. (In Russian)
- Sotsial'no-ekonomicheskii atlas Chuvashskoi Respubliki* [Socio-economic atlas of the Chuvash Republic], Yu.R. Arkhipov (ed.), Cheboksary, Chuvash Book Publ., 2013, 111 p. (In Russian)
- Treivish A.I. Sel'sko-gorodskoi kontinuum: regional'noe izmerenie [Rural-urban continuum: regional dimension], *Voprosy geografii*, 2016, no. 141, p. 51–72. (In Russian)
- Wiggins S., Proctor S. How special are rural areas? The economic implications of location for rural development, *Development Policy Review*, 2001, vol. 19, no. 4, p. 427–436.
- Web sources*
- Cheboksarskii munitsipal'nyi okrug Chuvashskoi Respubliki [Cheboksary Municipal District of the Chuvash Republic], Ofitsial'nyi portal organov vlasti Chuvashskoi Respubliki [Official portal of the authorities of the Chuvash Republic], URL: <https://chebp.cap.ru/> (access date 19.10.2023).
- Cheboksary – starye karty [Cheboksary – old maps], Starye karty gorodov Rossii i Zarubezh'ya – Retromap [Old maps of cities in Russia and abroad – Retromap], URL: <https://retromap.ru/Cheboksary> (access date 19.10.2023).
- Edinyi reestr sub'ektov malogo i srednego predprinimatel'stva [Unified Register of Small and Medium Enterprises], URL: <https://ofd.nalog.ru/> (access date 19.10.2023).
- Google Planeta Zemlya [Google Earth], URL: <https://earth.google.com> (access date 19.10.2023).
- Itogi perepisei [Census Results], Kniga perepisei [Census book], URL: <https://www.statmuseum.ru/ru/results/> (access date 19.10.2023).
- Perechni ob'ektov federal'nogo gosudarstvennogo kontrolya (nadzora) [Lists of objects of federal state control (supervision)], Federal'naya sluzhba po veterinarnomu i fitosanitarnomu nadzoru po Chuvashskoi Respublike i Ul'yanskoj oblasti [Federal Service for Veterinary and Phytosanitary Surveillance for the Chuvash Republic and Ulyanovsk Region], URL: <https://21.fsvpp.gov.ru/obekty-nadzora/po-chuvashskoj-respublike/> (access date 19.10.2023).
- Perepisi i obsledovaniya [Censuses and surveys], Territorial'nyi organ Federal'noi sluzhby gosudarstvennoi statistiki po Chuvashskoi Respublike [Territorial division of the Federal State Statistics Service for the Chuvash Republic], URL: <https://21.rosstat.gov.ru/folder/97254> (access date 19.10.2023).
- SPARK – proverka kontragenta [SPARK – verification of the counterparty], URL: <https://spark-interfax.ru/> (access date 19.10.2023).
- Yandeks Karty – transport, navigatsiya, poisk mest [Yandex Maps – transport, navigation, search for places], URL: <https://yandex.ru/maps> (access date 19.10.2023).

Received 26.10.2023

Revised 16.11.2023

Accepted 04.12.2023

АНАЛИЗ ВЫСОТЫ ВЕТРОВЫХ ВОЛН И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ БЕЗЛЕДНОГО ПЕРИОДА ВДОЛЬ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ С 1979 ПО 2021 Г.

С.А. Мысленков

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук; e-mail: stasocean@gmail.com

Работа посвящена анализу ветровых волн в арктических морях России вдоль Северного морского пути (СМП). Данные о параметрах ветрового волнения получены на основе спектральной модели WAVEWATCH III, о ветре и концентрации морского льда – из реанализа NCEP/CFRS/CFRSv2 за период с 1979 по 2021 г. Получены оценки распределения средней, максимальной и 95-го перцентиля высоты значительных волн и продолжительности безледного периода вдоль двух вариантов маршрута по СМП с шагом по пространству ~20 км. Также получены оценки трендов для рассматриваемых параметров за 43 года.

Минимальное значение продолжительности безледного периода составляет около 30 суток и наблюдается на северном маршруте СМП в Восточно-Сибирском море. На южном маршруте минимальная продолжительность не опускается ниже 65 суток. Среднегодовое значение высоты волн в безледный период превышает 2 м в Баренцевом море, 1,6 м в Чукотском и не превышает 1,2 м на остальном протяжении маршрута. Максимальная высота волн и 95-й перцентиль высоты волн существенно меньше на южном маршруте.

На всем протяжении СМП тренды для продолжительности безледного периода положительны и составляют 15–20 суток за 10 лет, а максимальные значения тренда наблюдаются к северу от Новой Земли и составляют 52 дня за 10 лет. Минимальные значения трендов продолжительности безледного периода наблюдаются в районе пролива Вилькицкого и в северо-восточной части Карского моря. Максимальный тренд для высоты волн в безледный период наблюдается в восточной части Восточно-Сибирского моря и достигает 0,33 м за 10 лет на северном и 0,12 м за 10 лет на южном маршрутах СМП.

Ключевые слова: ветровое волнение, Арктика, WAVEWATCH III

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.11

ВВЕДЕНИЕ

В связи с климатическими и геополитическими изменениями развитие альтернативных торговых маршрутов в Арктике становится все более актуальным. Перевозка грузов из стран Восточной и Юго-Восточной Азии в Европейский союз через СМП занимает существенно меньшее время по сравнению с традиционным маршрутом через Суэцкий канал [Зеленков, 2019]. Под акваторией СМП понимается водное пространство, прилегающее к северному побережью России, охватывающее внутренние морские воды, территориальное море, прилежащую зону и исключительную экономическую зону России [Осипова и др., 2019]. В работе [Тойменцева, Федоренко, 2023] описаны перспективы развития транспортно-логистической инфраструктуры СМП в контексте программы развития программы «Один пояс, один путь». Активное развитие Северного морского пути уже позволило увеличить грузооборот за 2020 г. до 33 млн т [Гурлев и др., 2022]. За последние 20–30 лет во многих областях Арктики регистрируется увеличение температуры воды и воздуха, сокращение площади льдов и другие климатические изменения [Алексеев и др., 2015; Ого-

родов и др., 2022; Ростов и др., 2019; Шалина, 2015; Ivanov, 2023]. В результате климатических изменений, связанных с увеличением продолжительности безледного периода (ПБП), уже в среднесрочной перспективе возможный рост объема перевозок по СМП может достигнуть 50 млн т в год [Воронина и др., 2017]. Одной из основных проблем для грузоперевозок по СМП являются низкие значения ПБП, связанные с тяжелой ледовой обстановкой [Зеленков, 2019].

По спутниковым данным средняя ПБП для СМП в 1980–2013 гг. составляла 80 суток [Мохов, Хон, 2015]. Особенности распределения сплоенности льдов и их динамики с 1997 по 2018 г. приведены в [Третьяков и др., 2019]. Устойчивые тенденции к увеличению ПБП в прибрежной зоне Карского моря за период 1979–2019 гг. со средним темпом в 12 сут./10 лет получены в работе [Шабанов, 2022]. В работе [Шалина, 2015] показано уменьшение сплоенности льда на трассе СМП в летние месяцы и практически полное освобождение трассы ото льда в сентябре с 2008 по 2012 г. Интегральные оценки продолжительности навигационного периода, когда открытая вода наблюдается более чем на

80–90% от общей длины трассы СМП, приведены в работах [Кибанова и др., 2018; Khon et al., 2017].

Согласно прогностическим расчетам на основе климатических моделей при сценарии умеренных антропогенных воздействий можно ожидать увеличения средних значений продолжительности навигационного периода к середине XXI в. до 4–5 мес., а к концу века – около 5 мес. и более [Мохов и др., 2016]. Оценки ожидаемой продолжительности навигационного периода на СМП составляют 2–3 мес. в середине XXI в. и 3–6 мес. в конце XXI в. [Кибанова и др., 2018].

Анализ ветрового волнения в арктических морях на основе спутниковых данных и модельных расчетов для современного климата представлен в работах [Нестеров, 2020; Вражкин, 2017; Плотников и др., 2020]. В этих работах приведены оценки распределения режимных и экстремальных характеристик волнения на акватории морей в основном в виде карт и таблиц.

В работах [Carbal et al., 2022; Li et al., 2019; Sharmar et al., 2021; Waseda et al., 2018] приведены оценки трендов площади льда, высоты волн и скорости ветра для Арктики в целом, отмечено также, что ледяной покров уменьшается и одновременно высота волн увеличивается. В [Li et al., 2019] проведено моделирование волнения с 2007 по 2018 г. для летнего периода (май–сентябрь) и показаны положительные тренды для высоты волн в целом для Арктики и в частности для Карского и Чукотского морей и моря Бофорта. В [Waseda et al., 2018] на основе реанализа ERA-Interim получены положительные тренды для максимальной высоты значительных волн и скорости ветра в морях Лаптевых и Бофорта.

В работе [Мохов, Погарский, 2021] модель WAVEWATCH III использовалась для воспроизведения полей ветровых волн в Арктике на основе концентрации морских льдов и приповерхностного ветра из глобальных климатических моделей ансамбля CMIP5.

Традиционно результаты моделирования ветрового волнения и данные реанализов представляются в виде карт пространственного распределения тех или иных характеристик, а также графиков и диаграмм в отдельных точках. С другой стороны, представляется важным анализ параметров волнения вдоль побережий или морских судоходных путей. Подобные варианты визуализации параметров ветрового волнения даны для побережья Балтийского моря в [Soomere, Eelsalu, 2014] и для европейских маршрутов морского транспорта [Chiroșcă, Rusu, 2022].

Таким образом, ранее анализ параметров ветровых волн, ПБП и их тренды для Арктики были

получены только в виде обзорных карт. Непосредственно для СМП были получены только средние интегральные оценки либо для всего маршрута, либо средние для его участков по каждому морю.

В данной работе по данным реанализа и результатов модели ветрового волнения за период с 1979 по 2021 г. представлен анализ высоты волн и продолжительности безледного периода вдоль двух маршрутов СМП с шагом ~20 км. Получены оценки трендов для параметров волнения и для ПБП.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа характеристик ветрового волнения в морях Российской Арктики использовалась база данных, полученная ранее на основе данных моделирования [Myslenkov et al., 2021; Мысленков, 2023]. При создании базы данных использовалась волновая модель WAVEWATCH III 6.07 и схема генерации волн ST6 для учета влияния льда схема IC0 [Tolman, 2019]. Расчеты проводились с использованием неструктурных сеток с высоким разрешением в прибрежной зоне. При моделировании волнения использовались данные о ветре и концентрации льда с шагом по времени 1 час из реанализа NCEP/CFSR (1979–2010) с пространственным разрешением ~0,3° и реанализа NCEP/CFSv2 (2011–2019) с разрешением ~0,2°.

При оценке качества модели в Карском море на основе спутниковых данных и прямых измерений на станции получено, что коэффициент корреляции для высоты значительных волн составляет ~0,9, среднеквадратическое отклонение от 0,32 до 0,39 м. В морях восточного сектора Российской Арктики коэффициент корреляции составил 0,95, систематическая ошибка –0,05 м, среднеквадратическая ошибка – 0,27 м, коэффициент рассеяния – 0,16 [Myslenkov et al., 2023; Мысленков, 2023].

Анализ параметров ветрового волнения осуществлялся для двух условных маршрутов через акваторию СМП, которые в данной статье обозначены как северный и южный маршруты СМП (рис. 1А). Маршруты были выбраны на основе карты СМП с набором маршрутов, представленной в статье [Осипова и др., 2019].

Методика обработки и анализа данных выглядела следующим образом: из базы данных ветрового волнения для каждой точки вдоль обоих маршрутов по СМП выбирались данные о высоте значительных волн с шагом 3 часа за период с 1979 по 2021 г. (43 года). Далее анализ данных был проведен в каждой точке отдельно для среднемноголетних значений и для трендов среднегодовых значений за 43 года.

На первом этапе было выполнено осреднение данных по высоте значительных волн для каждой

точки обоих маршрутов, расчет максимального значения и 95-го перцентиля за весь период. Необходимо отметить, что, согласно схеме учета льда в модели, узел с концентрацией льда более 0,5 считается покрытым льдом и высота волны составляет 0 м. Далее для каждого узла вдоль маршрутов была рассчитана среднемноголетняя ПБП, когда высота волн была более 0 м. Следовательно, в среднемноголетних значениях учитывалась высота 0 м в период присутствия льда. Также для каждого узла была рассчитана среднемноголетняя высота волн в безледный период (т. е. без учета значений 0 м при наличии льда).

На втором этапе были рассчитаны средние за год значения для высоты значительных волн, высоты волн в безледный период, максимума и 95-го перцентиля для каждого узла за каждый год. Далее на основе регрессионного анализа были получены оценки линейных трендов указанных величин за 43 года. Тренды вычислялись в сутках или метрах за 10 лет. Оценка значимости трендов выполнена по критерию Стьюдента и статистически значимыми признавались результаты при p -значении вероятности для нулевой гипотезы менее 0,05.

Визуализация результатов выполнена в виде столбчатых диаграмм отдельно для северного и южного маршрутов с запада на восток с шагом ~20 км.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ среднемноголетних значений высоты волн и продолжительности безледного периода. Распределение среднемноголетней высоты волн на акватории морей Российской Арктики и расположение северного и южного маршрутов представлены на рис. 1А. Картограмма выполнена в проекции Меркатора, что позволяет удобно сопоставлять столбчатые диаграммы на рис. 1Б–1Е, построенные с запада на восток с долготой по оси X .

Результаты расчета среднемноголетних значений для высоты значительных волн, максимального значения и 95-го перцентиля вдоль северного маршрута представлены на рис. 1Б–1Е. ПБП в Карском море составляет от 150 суток на границе с Баренцевым морем до 50 суток в районе пролива Вилькицкого (см. рис. 1Б). В море Лаптевых ПБП составляет от 50 до 90 суток. Минимальные значения ПБП составляют около 30 суток на северном маршруте СМП и наблюдаются в Восточно-Сибирском море. В Чукотском море ПБП увеличивается к Берингову проливу до 200 суток. В Баренцевом море лед присутствует только в его северной части. Стандартное отклонение ПБП вдоль маршрута составляет 40–50 суток с максимумом 85 суток к северу от Новой Земли (см. рис. 1Б).

Среднемноголетняя высота волн составляет 1–2,1 м в Баренцевом море, до 0,7 м в Чукотском море и на севере Карского моря, в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море 0,1–0,2 м (см. рис. 1В). Небольшие значения высоты волн обусловлены длительным ледовым сезоном, поэтому для анализа больший интерес представляет среднемноголетняя высота волн в безледный период (см. рис. 1Г). Стандартное отклонение для высоты волн в безледный период принимает значения около 0,15 м в Баренцевом море, а далее на восток составляет примерно половину от высоты волн (см. рис. 1Г). Для этой характеристики минимальные значения ~0,5 м наблюдаются в проливе Вилькицкого, на большей части акваторий Карского, Восточно-Сибирского морей и моря Лаптевых среднемноголетняя высота волн в безледный период составляет 0,8–1 м, а в Чукотском море достигает 1,5 м. 95-й перцентиль высоты волн убывает с запада на восток от 5 м в Баренцевом море до 0,8 м в проливе Вилькицкого (см. рис. 1Д). Максимальная высота волн достигает 14 м в Баренцевом море, 7,3 м в Чукотском море (см. рис. 1Е).

Результаты расчета средних характеристик для высоты значительных волн на южном маршруте представлены на рис. 2. Распределение среднемноголетней энергии волн на акватории морей Российской Арктики показано на рис. 2А. Максимальные значения потока волновой энергии более 30 кВт/м наблюдаются на западе Баренцева моря, на севере Карского моря этот показатель составляет около 2–3 кВт/м, в Чукотском море – 3–4 кВт/м, а в остальных районах исследуемой акватории – до 1 кВт/м. В целом полученные результаты для южного маршрута весьма схожи с результатами для северного маршрута, поэтому далее остановимся только на основных различиях.

Прежде всего, надо отметить, что ПБП на южном маршруте в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море не опускается ниже 65 сут., а в среднем составляет около 70–75 сут. (см. рис. 2Б). В Восточно-Сибирском море это приблизительно в 2 раза больше, чем на северном маршруте (см. рис. 2Б). Стандартное отклонение ПБП вдоль южного маршрута, как правило, не превышает 50 суток. Высота волн в безледный период на южном маршруте немного меньше в Карском и Чукотском морях, чем на северном (см. рис. 2Г).

Максимальная высота волн и 95-й перцентиль высоты волн на южном маршруте существенно меньше в районе 140–145° в. д., так как маршрут проходит южнее Новосибирских островов, которые препятствуют развитию штормового волнения (см. рис. 2Д, 2Е).

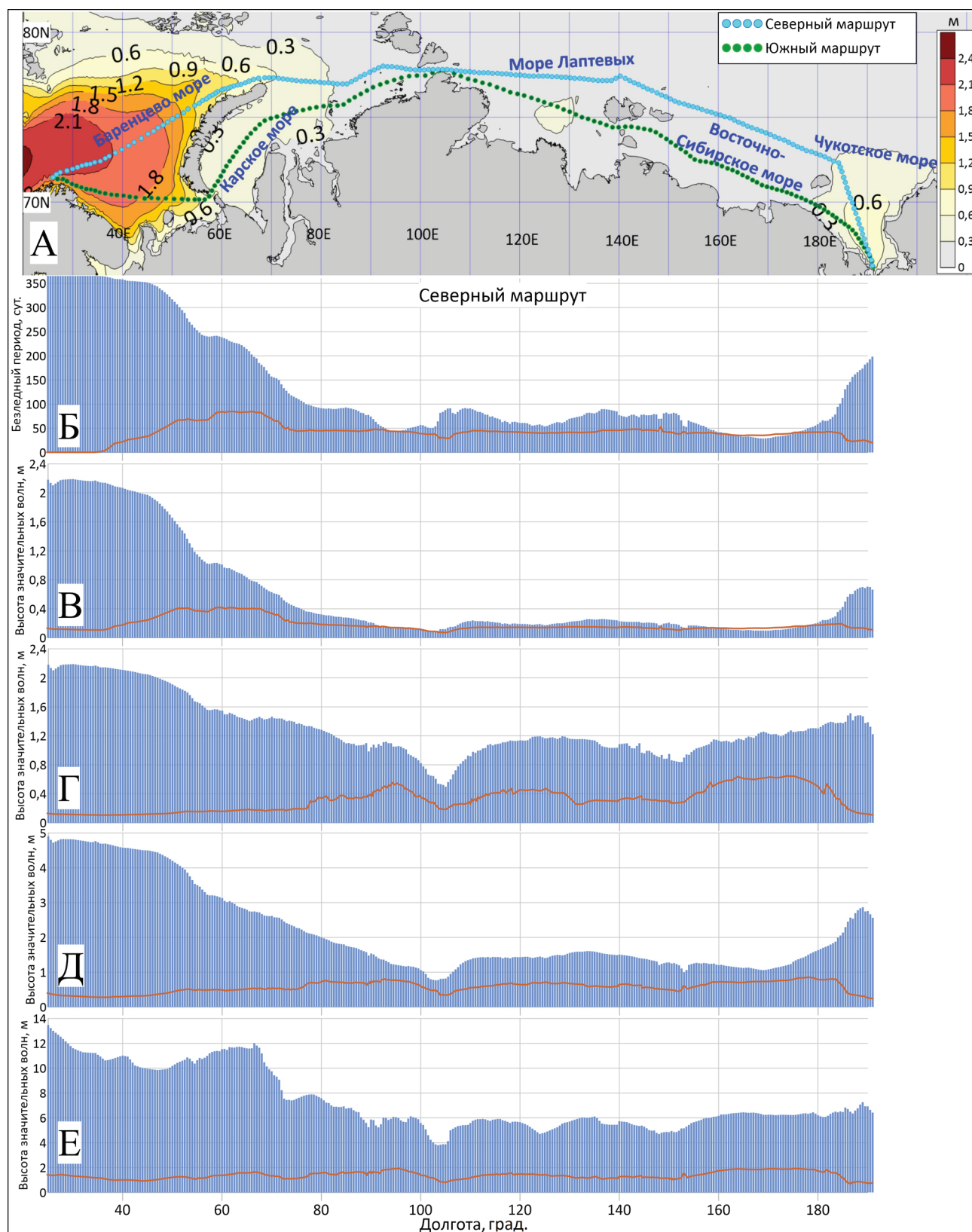


Рис. 1. Распределение параметров ветрового волнения вдоль северного маршрута Северного морского пути:
 А – среднегодоватная высота волн на акватории морей Российской Арктики; Б – продолжительность безледного периода;
 В – среднегодоватная высота волн; Г – среднегодоватная высота волн в безледный период; Д – 95-й перцентиль высоты волн;
 Е – максимальная высота волн. Линией представлена величина стандартного отклонения для каждого из параметров

Fig. 1. Distribution of wind wave parameters along the northern variant of the North Sea Route:
 А – average annual wave height in the Russian Arctic; Б – ice-free period; В – average annual wave height; Г – average wave height during the ice-free period; Д – 95th percentile of wave height; Е – maximum wave height. The line represents the value of the standard deviation for each of the parameters

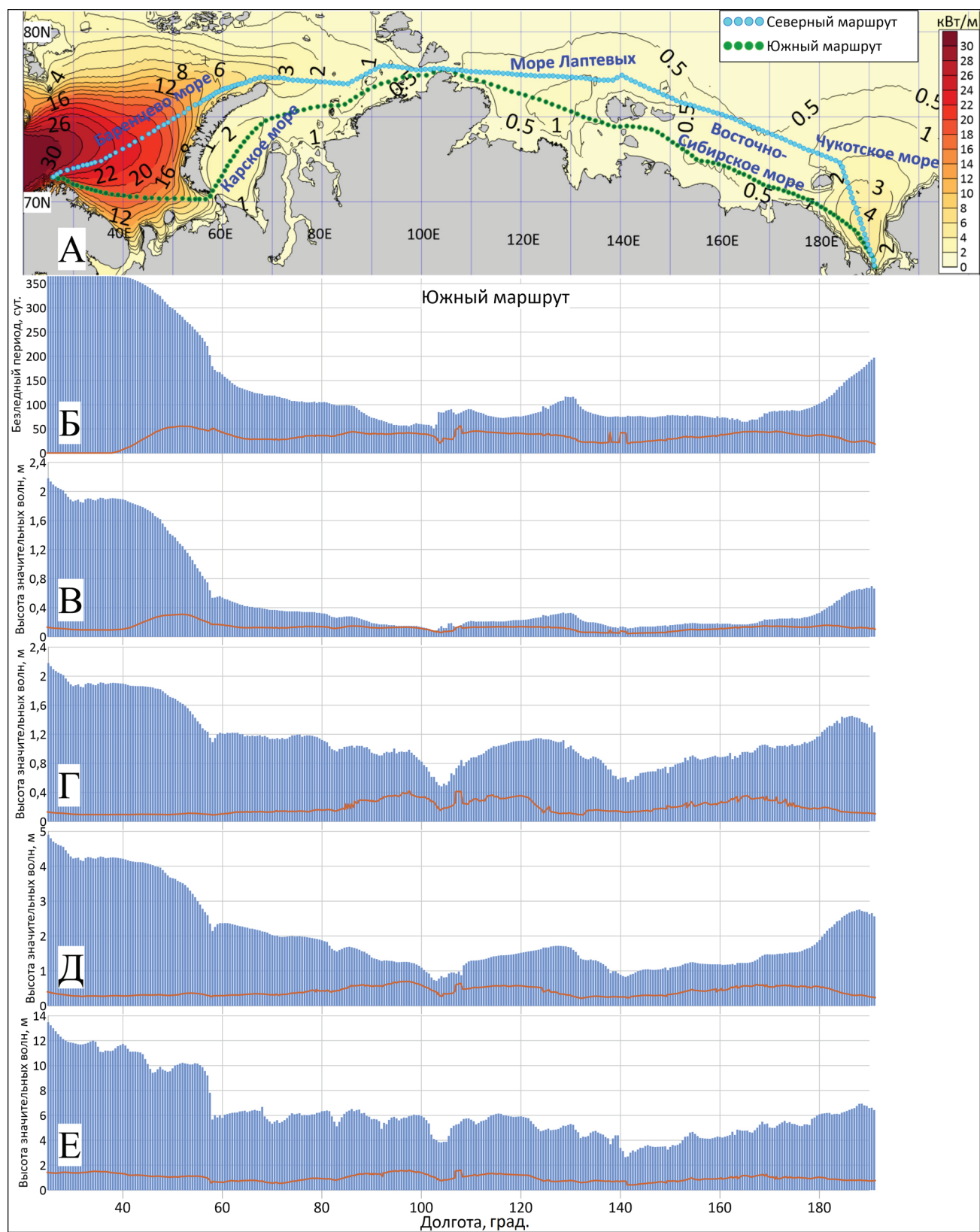


Рис. 2. Распределение параметров ветрового волнения вдоль южного маршрута Северного морского пути:
 А – среднегодовья энергия волн на акватории Арктических морей; Б – продолжительность безледного периода;
 В – среднегодовья высота волн; Г – среднегодовья высота волн в безледный период; Д – 95-й перцентиль высоты волн;
 Е – максимальная высота волн. Линией представлена величина стандартного отклонения для каждого параметра

Fig. 2. Distribution of wind wave parameters along the southern variant of the North Sea Route:
 А – average annual wave energy in the Russian Arctic; Б – ice-free period; В – average annual wave height; Г – average wave height during the ice-free period; Д – 95th percentile of wave height; Е – maximum wave height. The line represents the value of the standard deviation for each of the parameters

Полученные результаты могут быть использованы как режимные и экстремальные значения высоты волн при планировании грузоперевозок по СМП. В основном находящиеся на СМП суда предназначены для эксплуатации в открытом океане и выдерживают высоту волн более 8 м. Однако, высота волн более 2–4 м может оказаться критической при таких сложных операциях, как буксировка буровых платформ или перевозка опасных грузов. Критические значения по высоте волн указаны в правилах разработки и проведения морских операций Российского морского регистра судоходства [Правила..., 2022].

Анализ трендов для высоты волн и продолжительности безледного периода. Далее рассмотрим результаты анализа трендов для различных характеристик волнения и ПБП для северного и южного маршрутов. Распределение максимальной высоты значительных волн представлено на рис. 3А. Максимальная высота волн составляет 12 м и наблюдается на западе Баренцева моря, в Карском и Чукотском морях – 7–8 м, а в море Лаптевых и Восточно-Сибирском – 5–6 м. Вдоль северного маршрута максимальный тренд для ПБП наблюдается в Баренцевом море к северу от Новой Земли и составляет до 52 дней за 10 лет. Эти результаты в целом согласуются с оценками, приведенными в работе [Sharmar et al., 2021]. На всем протяжении СМП тренды ПБП положительны и составляют 15–20 суток (рис. 3Б). Минимальные значения трендов наблюдаются в районе пролива Вилькицкого и в северо-восточной части Карского моря. Тренды для среднегодовой высоты волн практически точно повторяют картину трендов для ПБП (рис. 3В), так как в расчетах учитываются нулевые значения при присутствии льда. Однако в западной части Баренцева моря наблюдается слабый отрицательный тренд, указывающий на отсутствие роста волн в незамерзающей части Баренцева моря, что было отмечено в работе [Myslenkov et al., 2023].

Наибольший интерес представляют тренды для среднегодовой высоты волн в безледный период (рис. 3Г). В Баренцевом море, несмотря на большой тренд на увеличение безледного периода, тренды для высоты волны не превышают 0,06 м за 10 лет. В Карском море и море Лаптевых тренды 0,1–0,18 м за 10 лет. Максимальный тренд наблюдается в восточной части Восточно-Сибирского моря и достигает 0,33 м за 10 лет. В Чукотском море тренд уменьшается от 0,18 м на севере до 0,03 м на юге (см. рис. 3Г). В работах [Carbal et al., 2022; Li et al., 2019] утверждается, что уменьшение площади льдов в Арктике и увеличение ПБП приводит к росту высоты волн из-за увеличения разгона. Это действительно подтверждается и нашими результатами, однако величина трендов для высоты волны существенно отличается для моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря, тогда

как тренды для ПБП для них практически одинаковы. В данном случае необходимо рассматривать дополнительно тренды для скорости ветра (они могут иметь другое направление или отсутствовать) и преобладающее направление ветра, так как если ветер в основном дует от открытой воды в сторону кромки льда, то разгон при отступании льда не играет роли для роста волн. Последнее, по всей видимости, объясняет практически нулевые тренды для высоты волн в безледный период в северной части Баренцева моря (см. рис. 3Г).

Тренды для высоты волн 95-го перцентиля и максимальной высоты волн представлены на рис. 3Д, 3Е. В Баренцевом море к западу от 40° в. д. тренды для этих показателей слабые и отрицательные. Так как эта часть Баренцева моря преимущественно не замерзает, то наблюдаемые тренды объясняются слабыми и отрицательными трендами в скорости ветра как в Баренцевом море, так и в Северной части Атлантического океана [Carbal et al., 2022; Sharmar et al., 2021]. Далее к востоку по всему маршруту тренд для 95-го перцентиля высоты волн составляет около 0,2–0,3 м за 10 лет и 0,4–0,6 м за 10 лет для максимальной высоты волн. Максимальные значения наблюдаются в восточной части Восточно-Сибирского моря и достигают 0,48 м для 95-го перцентиля и 1,1 м для максимальной высоты волн. Эти достаточно большие значения указывают на то, что максимальная высота волн за последние 40 лет увеличилась с 2 до 6 м в Восточно-Сибирском море. Такое увеличение объясняется, прежде всего, существенным увеличением ПБП в Восточно-Сибирском море, где в 1980-е гг. ПБП составляла около 10–20 дней, в некоторые годы открытой воды вообще не наблюдалось, а в последние годы ПБП достигает 3 месяцев. Следовательно, вероятность действия сильного ветра в отсутствие льда выросла

Распределение высоты волн 95-го перцентиля представлено на рис. 4А. Максимальные значения для этого показателя наблюдаются в Баренцевом море (до 5 м), до 2,5 м в Карском и Чукотском морях и небольшой локальный максимум 1,5 м – в море Лаптевых. Для южного маршрута тренды для различных характеристик волнения и ПБП представлены на рис. 4Б–4Е. Отметим основные отличия от трендов для северного маршрута, описанных выше. Тренд для ПБП в Баренцевом море не превышает 20 суток за 10 лет, так как маршрут проходит по южной части Баренцева моря (см. рис. 4Б). Высокие значения тренда (более 20 сут./10 лет) для ПБП, как и для северного маршрута, расположены в Восточно-Сибирском море. Низкие значения можно наблюдать в районе 140° в. д., южнее Новосибирских островов. Тренд для высоты волн в безледный период в Восточно-Сибирском море приблизительно

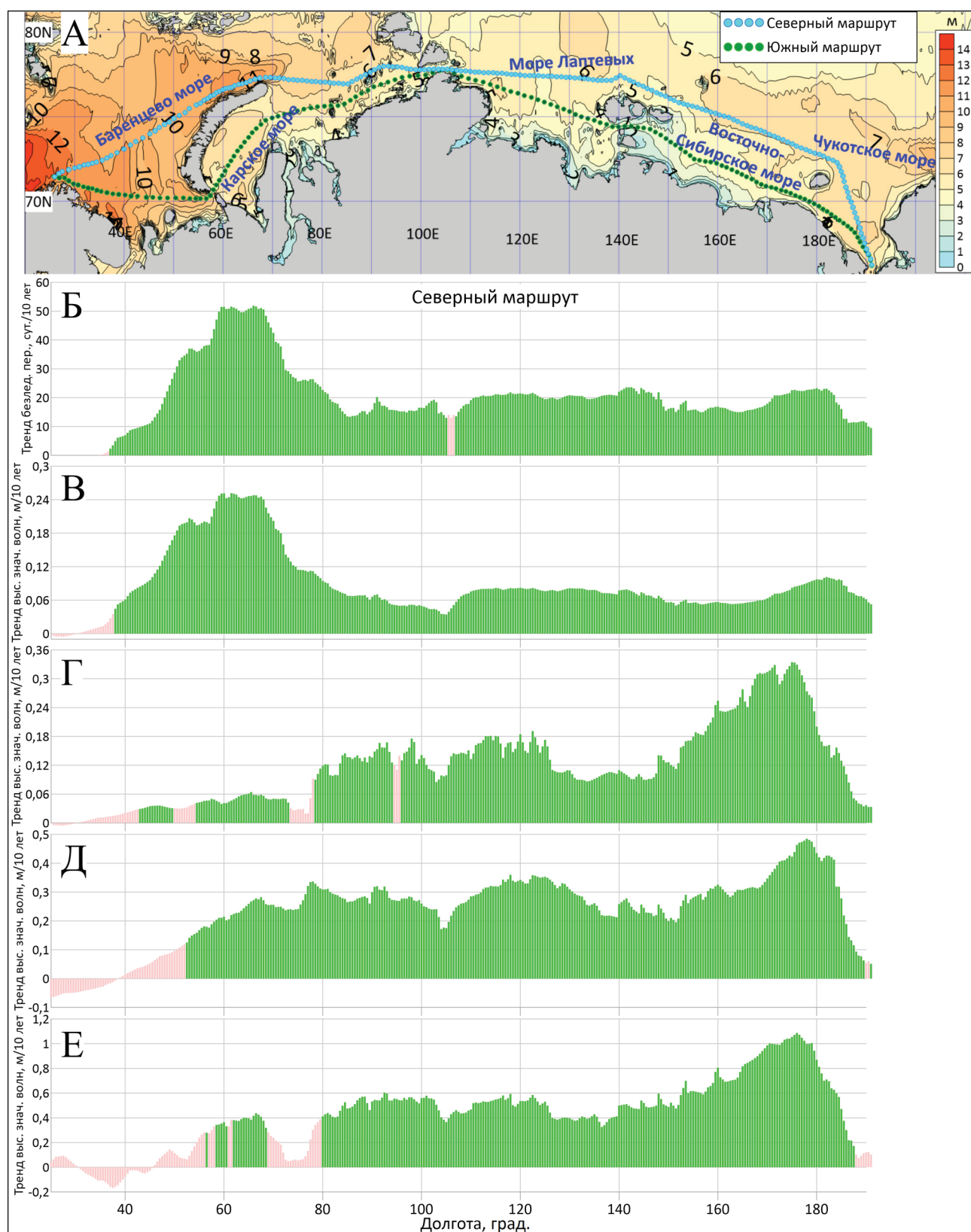


Рис. 3. Тренды параметров ветрового волнения вдоль северного маршрута Северного морского пути:

А – максимальная высота волн на акватории Арктических морей; Б – продолжительность безледного периода; В – среднеегодовная высота волн; Г – среднеегодовная высота волн в безледный период; Д – 95-ый перцентиль высоты волн; Е – максимальная высота волн. Зелеными столбцами обозначены значимые тренды ($p\text{-value} < 0,05$), розовыми – незначимые

Fig. 3. Trends in wind wave parameters along the northern variant of the North Sea Route:

A – maximum wave height in the Arctic Seas; Б – ice-free period; В – average annual wave height; Г – average wave height during the ice-free period; Д – 95th percentile of wave height; Е – maximum wave height. The green columns indicate significant trends ($p\text{-value} < 0,05$), the pink ones – insignificant

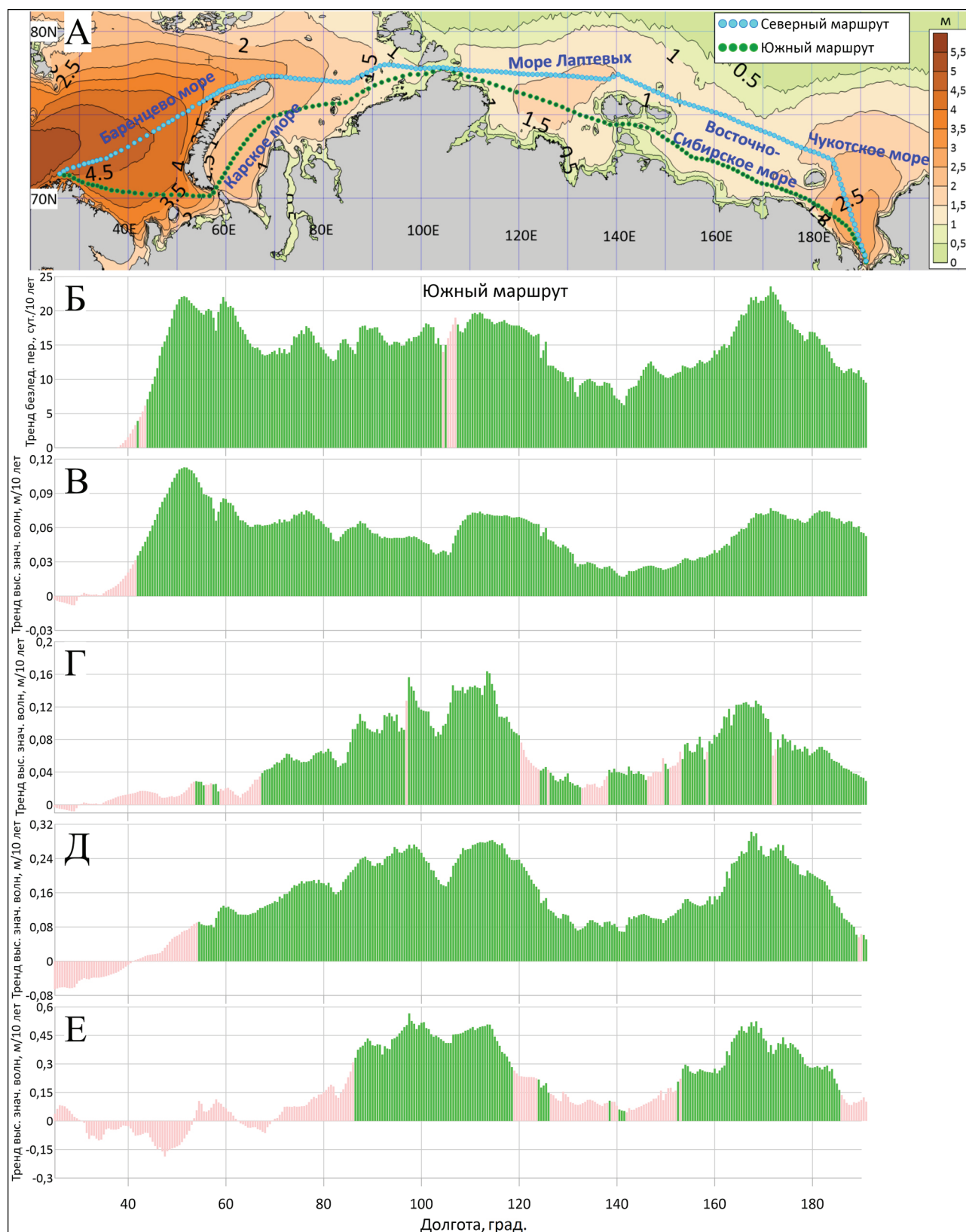


Рис. 4. Тренды параметров ветрового волнения вдоль южного маршрута Северного морского пути:

А – 95-й перцентиль высоты волн на акватории Арктических морей; Б – продолжительность безледного периода; В – среднегодовая высота волн; Г – среднегодовая высота волн в безледный период; Д – 95-й перцентиль высоты волн; Е – максимальная высота волн. Зелеными столбцами обозначены значимые тренды ($p\text{-value} < 0,05$), розовыми – незначимые

Fig. 4. Trends in wind wave parameters along the southern variant of the North Sea Route:

А – 95th percentile of wave height in the Arctic Seas; Б – ice-free period; В – average annual wave height; Г – average wave height during the ice-free period; Д – 95th percentile of wave height; Е – maximum wave height. The green columns indicate significant trends ($p\text{-value} < 0,05$), the pink ones – insignificant

в 3 раза меньше, чем для северного маршрута, и составляет 0,12 м за 10 лет. Тренды для максимальной высоты волн и 95-го перцентиля на южном маршруте также существенно меньше, чем на северном.

Результаты оценки значимости трендов в виде цветовой заливки присутствуют на рис. 3–4. Для ПБП все тренды значимы и для северного, и для южного маршрутов, кроме области в проливе Вилькицкого (и незамерзающей части Баренцева моря, где тренды отсутствуют). Тренды для максимальной высоты волн на северном маршруте незначимы с 25 по 58° с. ш., а также на границе Баренцева и Карского морей и на юге Чукотского моря. Тренды для высоты волн в безледный период на северном маршруте практически везде значимы, кроме западной части Баренцева моря и области в Карском море между 73–78° с. ш. Тренды для максимальной высоты волн на южном маршруте незначимы к западу от 85° с. ш., а также к югу от Новосибирских островов. Тренды для высоты волн в безледный период на южном маршруте незначимы к западу от 78° с. ш., а также к югу от Новосибирских островов.

В целом все основные максимумы в трендах для ПБП и для высоты волн в безледный период, найденные для моря Лаптевых, Восточно-Сибирского моря и к северо-западу от Новой Земли, оказались значимы.

ВЫВОДЫ

На основе спектральной волновой модели и метеорологического реанализа получены оценки среднесуточных значений для параметров ветровых волн и продолжительности безледного периода для акватории Северного морского пути. Для северного и южного маршрутов СМП получены оценки трендов для волновых параметров и ПБП за 43 года.

Среднее значение ПБП в Карском море составляет от 150 суток на границе с Баренцевым морем до 50 суток в районе пролива Вилькицкого. Минимальные значения ПБП около 30 суток наблюдаются на северном маршруте СМП в Восточно-Сибирском море. На южном маршруте в Восточно-Сибирском море ПБП приблизительно в 2 раза больше, чем на северном маршруте.

Среднесуточная высота волн в безледный период превышает 2 м в Баренцевом море, 1,6 м в Чукотском и не превышает 1,2 м на остальном протяжении маршрута. Максимальная высота волн и 95-й перцентиль высоты волн на северном маршруте существенно больше, чем на южном.

Практически все тренды для параметров волн и ПБП положительны на акватории СМП, кроме 95-го перцентиля и максимальной высоты волн на западе Баренцева моря. На всем протяжении СМП тренды ПБП составляют 15–20 суток за 10 лет, а максимальные значения тренда – 52 дня за 10 лет – наблюдаются к северу от Новой Земли. Минимальные значения трендов ПБП наблюдаются в районе пролива Вилькицкого и в северо-восточной части Карского моря. Максимальный тренд для высоты волн в безледный период наблюдается в восточной части Восточно-Сибирского моря и достигает 0,33 м за 10 лет.

Максимальные значения тренда на северном маршруте наблюдаются в восточной части Восточно-Сибирского моря и достигают 0,48 м за 10 лет для 95-го перцентиля и 1,1 м за 10 лет для максимальной высоты волн. Тренд для высоты волн в безледный период на южном маршруте в Восточно-Сибирском море приблизительно в 3 раза меньше, чем для северного маршрута, и составляет 0,12 м за 10 лет.

Благодарность. Работа выполнена за счет гранта РНФ (проект № 23-27-00239).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И. и др. Изменения климата Арктики при глобальном потеплении // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 1(103). С. 33–41.
- Воронина С.А., Порфирьев Б. Н., Семикашев В.В. и др. Последствия изменений климата для экономического роста и развития отдельных секторов экономики Российской Арктики // Арктика: экология и экономика. 2017. № 4(28). С. 4–17. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-4-4-17.
- Вражский А.Н. Режим волнения морей восточной Арктики в начале XXI столетия // Труды ДВНИГМИ. 2017. Вып. 155. С. 164–177.
- Гурлев И.В., Макоско А.А., Малыгин И.Г. Анализ состояния и развития транспортной системы Северного морского пути // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12. № 2(46). С. 258–270. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-258-270.
- Зеленков М.Ю. Транспортно-логистическая система Северного морского пути: перспективы, проблемы и пути их решения // Арктика: экология и экономика. 2019. № 4(36). С. 131–140. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-131-140.
- Кибанова О.В., Хон В.Ч., Мохов И.И., Елисеев А.В. Изменения продолжительности навигационного периода Северного морского пути в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей: байесовские оценки // Доклады РАН. 2018. Т. 481. № 1. С. 89–94.
- Мохов И.И., Хон В.Ч. Продолжительность навигационного периода и ее изменения для Северного морского

- пути: модельные оценки // Арктика: экология и экономика. 2015. № 2(18). С. 88–95.
- Мохов И.И., Хон В.Ч., Прокофьева М.А. Новые модельные оценки изменений продолжительности навигационного периода для Северного морского пути в XXI веке // Доклады РАН. Науки о Земле. 2016. Т. 468. № 6. С. 699–704.
- Мохов И.И., Погарский Ф.А. Изменения режимов морского волнения в Арктическом бассейне при изменениях климата в XXI веке по модельным расчетам // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 2. С. 189–193. DOI: 10.31857/S2686739721020134.
- Мысленков С.А. Моделирование ветрового волнения в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 1(387). С. 87–101. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-1-87-101.
- Нестеров Е.С. Ветровое волнение в Арктических морях (обзор) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 3(377). С. 19–41.
- Огородов С.А., Шабанова Н.Н., Кессель А.С. и др. Изменение гидрометеорологического потенциала термоабразии берегов морей Российской Арктики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: Геогр. 2022. № 1. С. 26–42.
- Осипова Е.Э., Смирнов С.В., Хаирова Т.А. Предпосылки развития экспорта Российской Арктики, каботажных перевозок и проектных грузов для арктических проектов // Арктика и Север. 2019. № 37. С. 5–21. DOI: 10.17238/issn2221-2698.2019.37.5.
- Плотников В.В., Вражский А.Н., Мезенцева Л.И. и др. Изменчивость гидрометеорологического режима морей восточного сектора Арктики (Восточно-Сибирское, Чукотское) в современный период // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 7. С. 103–115.
- Правила разработки и проведения морских операций НД № 2-090601-010. Российский морской регистр судоходства. СПб., 2022. 142 с.
- Ростов И.Д., Ростова Е.В., Воронцов А.А. Тенденции климатических изменений термических условий моря Лаптевых за последние 37 лет // Вестник Дальневосточного отделения РАН. 2019. № 1. С. 97–107.
- Тойменцева И.А., Федоренко Р.В. Перспективы развития транспортно-логистической инфраструктуры Северного морского пути в рамках программы «один пояс, один путь» // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2023. Т. 2. № 1(51). С. 140–149. DOI: 10.51965/2076-7919_2023_2_1_140.
- Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Сарафанов М.И. Изменения ледовых условий плавания по маршруту Обская губа – Берингов пролив за 1998–2018 гг. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12. № 3. С. 65–75.
- Шабанов П.А. Изменения продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря по спутниковым данным // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 518–531.
- Шалина Е.В. Изменение ледовитости Северных морей России и оценка доступности Северного морского пути по данным спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 67. DOI: 10.7868/S0205961415040090.
- Cabral I.S., Young I.R., Toffoli A. Long-Term and Seasonal Variability of Wind and Wave Extremes in the Arctic Ocean, *Front. Mar. Sci.*, 2022, vol. 9, p. 80, DOI: 10.3389/fmars.2022.802022.
- Chiroșcă A.-M., Rusu L. Characteristics of the Wind and Wave Climate along the European Seas Focusing on the Main Maritime Routes, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10(1), p. 1–22, DOI: 10.3390/jmse10010075.
- Ivanov V. Arctic Sea Ice Loss Enhances the Oceanic Contribution to Climate Change, *Atmosphere*, 2023, vol. 14, 409, DOI: 10.3390/atmos14020409.
- Khon V.C., Mokhov I.I., Semenov V.A. Transit Navigation through Northern Sea Route from Satellite Data and CMIP5 Simulations, *Environ. Res. Lett.*, 2017, vol. 12, 024010.
- Li J., Ma Y., Liu Q. et al. Growth of wave height with retreating ice cover in the Arctic, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2019, vol. 164, p. 102790, DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102790.
- Myslenkov S., Platonov V., Kislov A. et al. Thirty-Nine-Year Wave Hindcast, Storm Activity, and Probability Analysis of Storm Waves in the Kara Sea, Russia, *Water*, 2021, vol. 13(5), 648, DOI: 10.3390/w13050648.
- Myslenkov S., Samsonov T., Shurygina A. et al. Wind waves web atlas of the Russian seas, *Water*, 2023, vol. 15(11), 2036, DOI: 10.3390/w15112036.
- Myslenkov S., E. Kruglova, A. Medvedeva et al. Number of storms in several Russian seas: Trends and connection to large-scale atmospheric indices, *Russian Journal of Earth Sciences*, 2023, vol. 23, no. 3, p. ES3002.
- Sharmar V., Markina M. Evaluation of interdecadal trends in sea ice, surface winds and ocean waves in the Arctic in 1980–2019, *Russian Journal of Earth Sciences*, 2021, vol. 21(2), p. 1–11, DOI: 10.2205/2020ES000741.
- Soomere T., Eelsalu M. On the wave energy potential along the eastern Baltic Sea coast, *Renewable Energy*, 2014, vol. 71, p. 221–233.
- Tolman H. The WAVEWATCH III Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 6.07, Tech. Note 333, March 2019, NOAA/NWS/NCEP/MMAB 2019.
- Waseda T., Webb A., Sato K. et al. Correlated increase of high ocean waves and winds in the ice-free waters of the Arctic ocean, *Sci. Reports*, 2018, vol. 8, 4489.

Поступила в редакцию 30.10.2023

После доработки 12.11.2023

Принята к публикации 04.12.2023

ANALYSIS OF THE WIND WAVES HEIGHT AND THE DURATION OF ICE-FREE PERIOD ALONG THE NORTHERN SEA ROUTE FROM 1979 TO 2021

S.A. Myslenkov

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography Department of Oceanology,
Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Physics and Mathematics; e-mail: stasocean@gmail.com*

The study deals with the analysis of wind waves in the Arctic seas of Russia along the Northern Sea Route. Data on wind wave parameters were obtained on the basis of the WAVEWATCH III spectral model, and data on wind and sea ice concentration for the period from 1979 to 2021 – from the NCEP/CFSR/CFSv2 reanalysis. Estimates of the distribution of the average, maximum and 95th percentile height of significant waves and the duration of ice-free period along two variants of the route along the Northern Sea Route (NSR) have been obtained with a space resolution of ~20 km. Trends of the parameters under consideration were also estimated for 43 years.

The minimum duration of ice-free period is about 30 days on the northern route of the NSR in the East Siberian Sea. The minimum duration on the southern route is never less than 65 days. The average annual wave height during the ice-free period exceeds 2 m in the Barents Sea, 1,6 m in the Chukchi Sea and is no more than 1,2 m for the rest of the route. The maximum wave height and the 95th percentile of wave height are significantly lower on the southern route.

The trends for the duration of the ice-free period are positive all along the NSR, and amount to 15–20 days per 10 years. The maximum trend values of 52 days per 10 years are observed north of the Novaya Zemlya Archipelago. The minimum values of trends for the ice-free period are observed in the area of the Vilkitsky Strait and in the northeastern part of the Kara Sea. The maximum trend for wave height during the ice-free period is observed in the eastern part of the East Siberian Sea reaching 0,33 m in 10 years on the northern and 0,12 m in 10 years on the southern route of the NSR.

Keywords: wind waves, Arctic, WAVEWATCH III

Acknowledgements. The research was financially supported by the Russian Science Foundation (project 23-27-00239).

REFERENCES

- Alekseev G.V., Radionov V.F., Aleksandrov E.I. et al. *Izmeneniya klimata Arktiki pri global'nom potepnenii* [Arctic climate change under global warming], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2015, no. 1(103), p. 33–41. (In Russian)
- Cabral I.S., Young I.R., Toffoli A. Long-Term and Seasonal Variability of Wind and Wave Extremes in the Arctic Ocean, *Front. Mar. Sci.*, 2022, vol. 9, p. 80, DOI: 10.3389/fmars.2022.802022.
- Chiroșcă A.-M., Rusu L. Characteristics of the Wind and Wave Climate along the European Seas Focusing on the Main Maritime Routes, *J. Mar. Sci. Eng.*, 2022, 10.
- Gurlev I.V., Makosko A.A., Malygin I.G. Analiz sostojaniya i razvitiya transportnoj si-stemy Severnogo morskogo puti [Analysis of the state and development of the transport system of the Northern Sea Route], *Arktika: jekologija i jekonomika*, 2022, t. 12, no. 2(46), p. 258–270. (In Russian)
- Ivanov V. Arctic Sea Ice Loss Enhances the Oceanic Contribution to Climate Change, *Atmosphere*, 2023, 14, 409, DOI: 10.3390/atmos14020409.
- Khon V.C., Mokhov I.I., Semenov V.A. Transit Navigation through Northern Sea Route from Satellite Data and CMIP5 Simulations, *Environ. Res. Lett.*, 2017, vol. 12, 024010.
- Kibanova O.V., Hon V.Ch., Mohov I.I., Eliseev A.V. *Izmeneniya prodolzhitel'nosti navi-gacionnogo perioda Severnogo morskogo puti v XXI veke po raschetam s ansamblem klimaticheskikh modelej: bajesovskie ocenki* [Climate model-based changes of the navigation period duration at the north sea route in the 21st century: bayesian estimates], *Doklady Akademii nauk*, 2018, t. 481, vol. 1, p. 89–94. (In Russian)
- Li J., Ma Y., Liu Q., Zhang W., Guan C. Growth of wave height with re-treating ice cover in the Arctic, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2019, vol. 164, p. 102790, DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102790.
- Mohov I.I., Hon V.Ch. *Prodolzhitel'nost' navigacionnogo perioda i ee izmeneniya dlja Severnogo morskogo puti: model'nye ocenki* [The duration of the navigation period and changes for the northern sea route: model estimates], *Arktika: jekologija i jekonomika*, 2015, vol. 2(18), p. 88–95. (In Russian)
- Mohov I.I., Hon V.Ch., Prokof'eva M.A. New model estimates of changes in the duration of the navigation period for the northern sea route in the 21st century, *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 468, no. 2, p. 641–645.
- Mohov I.I., Pogarskij F.A. Variations in the characteristics of sea waves in the arctic basin caused by climate changes in the 21st century based on model simulations, *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 496, no. 2, p. 164–167.
- Myslenkov S.A. Modelirovanie vetrovogo volneniya v more Laptevych, Vostochno-Sibirskom i Chukotskom morjah [Modeling of the wind waves in the Laptev, East Siberian and Chukchi seas], *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2023, no. 1(387), p. 87–101. (In Russian)
- Myslenkov S., Platonov V., Kislov K. et al. Thirty-Nine-Year Wave Hindcast, Storm Activity, and Probability Analysis of Storm Waves in the Kara Sea, Russia, *Water*, 2021, 13(5), 648, DOI: 10.3390/w13050648.

- Myslenkov S., Samsonov T., Shurygina A. et al. Wind waves web atlas of the Russian seas, *Water*, 15, 11(2023), 2036.
- Myslenkov S., Kruglova E., Medvedeva A. et al. Number of storms in several Russian seas: Trends and connection to large-scale atmospheric indices, *Russian Journal of Earth Sciences*, 2023, vol. 23, no. 3, p. ES3002.
- Nesterov E.S. Vetrovoe volnenie v Arkticheskikh morjah (obzor) [Wind waves in the arctic seas (review)], *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2020, no. 3(377), p. 19–41. (In Russian)
- Ogorodov S.A., Shabanova N.N., Kessel' A.S. et al. Izmenenie gidrometeorologicheskogo potentsiala termoabrazii beregov morej rossijskoj Arktiki [Changes of hydrometeorological potential of thermoabrasion on the russian arctic coasts], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2022, no. 1, p. 26–42. (In Russian)
- Osipova E.Je., Smirnov S.V., Hairnova T.A. Predposylki razvitiya jeksporta rossijskoj Arktiki, kabotazhnyh perevozok i proektnykh gruzov dlja arkticheskikh proektov [Preconditions for the development of russian arctic export, coastal (cabotage) transportation and project cargo for the arctic demand], *Arktika i Sever*, 2019, no. 37, p. 5–21. (In Russian)
- Plotnikov V.V., Vrazhkin A.N., Mezenceva L.I. et al. Izmenchivost' gidrometeorologicheskogo rezhima morej vostochnogo sektora Arktiki (Vostochno-Cibirskoe, Chukotskoe) v sovremennyj period [Variability of Hydrometeorological regime of seas of east Arctic sector (east Siberian, Chukchi) in the modern period], *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta, Inzhiniring georesursov*, 2020, vol. 331, no. 7, p. 103–115. (In Russian)
- Rules for the development and conduct of maritime operations ND no. 2-090601-010. Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2022, 142 p. (In Russian)
- Rostov I.D., Rostova E.V., Voroncov A.A. Tendencii klimaticheskikh izmenenij ter-micheskikh uslovij morja Laptevyyh za poslednie 37 let [Tendencies of climatic changes for thermal condition of the laptev sea in the last 37 years], *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk*, 2019, no. 1, p. 97–107. (In Russian)
- Shabanov P.A. Changes in the ice-free period duration in the Kara sea coastal zone from satellite data, *Oceanology*, 2022, vol. 62, no. 4, p. 447–457.
- Shalina E.V. Izmenenie ledovitosti Severnykh morej Rossii i ocenka dostupnosti Severnogo morskogo puti po dannym sputnikovogo monitoringa [Ice Retreat in the Seas of the Russian Arctic and Increased Availability of the Northern Sea Route from Satellite Passive Microwave Observations], *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, no. 4, p. 67. (In Russian)
- Sharmar V.M. Markina Evaluation of interdecadal trends in sea ice, surface winds and ocean waves in the Arctic in 1980–2019, *Russian Journal of Earth Sciences*, 2021, 21(2), 1–11, DOI: 10.2205/2020ES000741.
- Soomere T., Eelsalu M. On the wave energy potential along the eastern Baltic Sea coast, *Re-newable Energy*, 2014, 71, 221–233.
- Tojmenceva I.A., Fedorenko R.V. Perspektivy razvitiya transportno-logisticheskoy infrastruktury Severnogo Morskogo puti v ramkah programmy “odin pojas, odin put'” [Prospects for the development of the transport and logistics infrastructure of the northern sea route within the framework of the program “one belt, one road”], *Vestn. Volzhskogo un-ta im. V.N. Tatishheva*, 2023, vol. 2, no. 1(51), p. 140–149. (In Russian)
- Tret'jakov V.Ju., Frolov S.V., Sarafanov M.I. Izmeneniya ledovykh uslovij plavanija po marshrutu Obskaja guba – Beringov proliv za 1998–2018 gody, *Fundamental'naja i prikladnaja gidrofizika*, 2019, vol. 12, no. 3, p. 65–75. (In Russian)
- Tolman H. The WAVEWATCH III Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 6.07, Tech. Note 333, March 2019, NOAA/NWS/NCEP/MMAB 2019.
- Voronina S.A., Porfir'ev B. N., Semikashev V.V. et al. Posledstviya izmenenij klimata dlja jekonomicheskogo rosta i razvitiya ot-del'nykh sektorov jekonomiki rossijskoj Arktiki [Climate change impact on economic growth and specific sectors' development of the Russian Arctic], *Arktika: jekologija i jekonomika*, 2017, no. 4(28), p. 4–17. (In Russian)
- Vrazhkin A.N. Rezhim volnenija morej vostochnoj Arktiki v nachale XXI stoletija [The Eastern Arctic seas wave climate in the beginning of the 21st century], *Trudy DVNIGMI*, 2017, vyp. 155, p. 164–177. (In Russian)
- Waseda T., Webb A., Sato K. et al. Correlated increase of high ocean waves and winds in the ice-free waters of the Arctic Ocean, *Sci. Reports*, 2018, vol. 8, no. 4489.
- Zelenkov M.Ju. Transportno-logisticheskaja sistema Severnogo morskogo puti: perspektivy, problemy i puti ih reshenija [Transport and logistics system of the northern sea route: prospects, problems and solutions], *Arktika: jekologija i jekonomika*, 2019, no. 4(36), p. 131–140. (In Russian)

Received 30.10.2023

Revised 12.11.2023

Accepted 04.12.2023

МИГРАЦИЯ МОЛОДЕЖИ В ГОРНОМ ЛЕВАШИНСКОМ РАЙОНЕ ДАГЕСТАНА

Л.Р. Имангулов¹, Д.А. Корюхин²

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра экономической и социальной географии России*

¹ *Аспирант; e-mail: linar.imangulov.1999@mail.ru*

² *Магистр; e-mail: di-koru@yandex.ru*

В статье на основе результатов экспедиционного обследования одного горного сельского района Дагестана выявлены локальные особенности миграционного поведения сельской молодежи. Источники информации: официальная и школьная статистика и результаты интервью с местным населением. В Левашинском районе наблюдается существенный постсоветский рост численности населения, обусловленный в том числе низким миграционным оттоком сельского населения. Обнаружено, что значительная часть молодежи остается жить в сельской местности. Причины – наличие сравнительно доходных мест приложения труда в агросекторе, торговле и других экономических видах деятельности. Наиболее распространенные варианты миграционного поведения сельской молодежи: «Учился до 9 класса, остался работать в селе», «Учился до 9/11 класса, уехал на заработки». Наименее распространенные: «Учился до 11 класса, уехал учиться и вернулся». Миграционное поведение сельской молодежи в районе не только отличается от России в целом и региона в частности, но и различается в зависимости от поселений. На примере четырех сел Левашинского района – Леваши, Кутиша, Наскент и Уллуая – отражены различия в миграционных установках обследованных сельских сообществ. Обнаружено, что каждая локальная поселенческая общность Левашинского района имеет свою специфику миграционной ситуации, которая, например, не связана напрямую с этнической структурой населения.

Ключевые слова: сельская местность, сельские сообщества, образовательная миграция, этническая структура населения, горные территории

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.12

ВВЕДЕНИЕ

В постсоветский период с разрушением колхозно-совхозной системы и кризисом на локальных рынках труда, миграционные потоки в сельской местности приобрели еще более выраженный центростремительный характер: население из более мелких населенных пунктов мигрирует в более крупные [Краснослободцев, Савоскул, 2004].

В регионах РФ миграционные потоки из сельской местности, направленные преимущественно в крупные города, получили как временный характер, так и постоянный.

В отходничестве по оценкам разных экспертов ежегодно участвует от 3 млн до 10–20 млн трудоспособного населения преимущественно из сельской местности и малых городов. Основная причина – ограниченность мест приложения труда в сельской местности. Например, отходничество сельского населения широко распространено в Центральной России и республиках Северного Кавказа [Нефедова, 2015].

В результате длительной миграции сельского населения на постоянное место жительства в города сформировались устойчивые зоны миграционного оттока населения в сельской местности.

Положительный миграционный баланс имеют преимущественно муниципалитеты в пригородной, полупригородной и в меньшей степени полупериферийной зонах регионов России [Карачурина, Мкртчян, 2016].

Наиболее высокие масштабы механического выбытия населения в возрастном отношении в сельской местности характерны для молодежи, которая после обучения в учебных заведениях (в средне-профессиональных и высших) стремится закрепиться в городах или районных центрах еще с советского периода [Зайончковская, 1988; Катровский, 2001; Миграция, 1970; Переведенцев, 1975].

Одной из главных мотиваций сложившегося миграционного поведения сельской молодежи в регионах РФ, связанной с миграцией выпускников школ из сельской местности, малых и средних городов в более крупные города – региональные центры и столицу, является желание сельской молодежи изменить в будущем свое благосостояние, закрепившись в городе [Катровский, 2001; Нефедова, Мкртчян, 2017; Карачурина, Флоринская, 2019].

В данном отношении образовательный канал миграции является одним из основных механизмов

изменения социального статуса сельской молодежи посредством перемещения.

Масштабы миграционного оттока и возвратной миграции сельской молодежи между территориями в РФ все же различаются, и действие центр-периферийной модели, в которой периферия (сельская местность и малые города) отдает население центру (крупным городам), местами ослабевает. Например, на юге страны в районах Краснодарского края с положительной постсоветской динамикой развития возвратная миграция сельской молодежи после получения образования оценивается в 50–70% [Имангулов, Куксин, 2023].

В национальных республиках миграционные процессы в сельской местности тесно связаны с урбанизацией (в первую очередь, с ростом региональных центров) в настоящее время неиндустриального характера (например, в Республике Бурятия [Бреславский, 2013], в республиках Северного Кавказа [Белозеров и др., 2016]).

В дифференциации особенностей миграционного поведения сельских сообществ значимая роль отводится этнической структуре населения (исторический опыт мобильности этнической группы, сила социального капитала и т. д.). Вместе с позиционным фактором и финансовыми возможностями, этническая структура населения сельских населенных пунктов определяет множественность вариантов миграционного поведения сельской молодежи в полиэтничном регионе [Имангулов, 2023].

В Республике Дагестан в постсоветский период происходит усиление миграции населения, в частности молодежи. Основными донорами населения выступают горные территории и сельская местность, реципиентами – города республики. Отмечается последовательное сокращение зоны притока населения, главным образом за счет горных и равнинных районов, в том числе полупериферийного (пригородного) положения [Абидов, Абдулманатов, 2015].

Вместе с этим разнообразие сельской местности горно-предгорного Дагестана и направлений ее трансформации в постсоветский период обуславливают актуальность исследования миграционного поведения сельской молодежи, которое на внутрирегиональном и локальном уровнях существенно различается и определяет ареалы депопуляции или роста сельского населения.

Целью статьи является выявление преобладающих вариантов миграционного поведения сельской молодежи¹ на примере Левашинского района Республики Дагестан.

¹ Под объектом исследования – сельской молодежью – авторы подразумевают социально-возрастную группу населения (с 14–16 до 30–35 лет), проживающую в сельской местности.

Район исследования. Левашинский район располагается в горно-предгорной зоне Республики Дагестан. В системе отношений «центр – периферия» район относится к полупериферии (расстояние от районного центра до Махачкалы – 93 км). В период 1989–2021 гг. численность населения района удвоилась (в целом по Дагестану рост населения составил 1,8 раза).

Левашинский район сохранил свою специализацию с советского периода: животноводческо-садоводческую, развито овощеводство. Район известен в республике и России «капустной специализацией»: здесь выращивается, по оценкам разных источников, до 0,5–1% валового сбора белокочанной капусты в мире. В свою очередь, для района это означает наличие сравнительно высокооплачиваемых мест приложения труда и соответственно сохранение аграрной занятости населения в переходный период.

Вместе с этим в пределах Левашинского района есть и другие места приложения труда, не связанные с выращиванием капусты: добывающий сектор (добыча строительных материалов: камень, песок), тепличное хозяйство (выращивание помидоров и огурцов), садоводство (выращивание плодовых косточковых культур: персик, абрикос), животноводство (разведение мелкого и крупного рогатого скота), торговля и т. д.

Спецификой развития Левашинского района является высокая внутрирайонная неоднородность, обусловленная дифференциацией горных условий и этнической структурой населения (на 2021 г.: даргинцы – 78,2%, аварцы – 21,5%). Следствием этого является формирование целостно выраженных районов в сознании населения: Леваша, Охли-Урминская, Мекегинская, Уллуаяская, Куппа-Хаджалмахинская и Цудахарская стороны.

Например, Охли-Урминская сторона ассоциируется жителями с особенностями этнической структуры населения (в ней проживают аварцы) и преобладающим хозяйственным укладом (животноводство). Это одна из крупнейших горных территорий Дагестана по откорму овец и крупного рогатого скота после Кадарской зоны, расположенной в Буйнакском районе.

В Мекегинской стороне проживают даргинцы, структура занятости населения более разнообразная: значительная часть населения занята в добывающем секторе (вблизи Мекеги находится один из крупнейших карьеров в Дагестане по добыче облицовочного камня). Это целый кластер, в котором заняты не только жители селения, но и приезжие иностранные рабочие (в целом до 1–1,5 тыс. человек).

Уллуаяская сторона ассоциируется жителями не только с позиции этнической структуры населения (даргинцы), но и с позиции закрытости и традицио-

нализма сельских сообществ в сравнении с остальной частью Левашинского района. Внутрирайонная специализация селений связана с повсеместным выращиванием белокочанной капусты в личных подсобных хозяйствах и грузоперевозками.

На среднероссийском уровне специфика территории исследования обусловлена особенностями демографического развития Левашинского района: более молодой возрастной структурой населения. По результатам интервью, в районе отмечается преобладание расширенного воспроизводства населения, что имеет отражение, например, в средних значениях размера семей (средний размер частного домохозяйства, 2010 г.: в районе – 3,2, в РФ – 2,6).

В Левашинском районе насчитывается 43 общеобразовательных учреждения. Среди них начальных общеобразовательных школ (1–4 классы) – 4 (9%), основных образовательных школ (5–9 классы) – 9 (21%), средних общеобразовательных школ (10–11 классы) – 30 (70%). Общая численность учащихся в 2022/23 учебном году составляла – 10 216 чел., учеников 9 классов – 988 чел., учеников 11-х – 277 чел.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В статье использованы две группы материалов. Первая включает данные школьных учреждений (2019–2022), данные Всероссийских переписей населения 2010 и 2021 гг., а также официальные статистические данные муниципальных образований Дагестана.

Вторая группа материалов – результаты глубинных и экспертных интервью с местным населением и представителями местных властей (районных и сельских администраций) на предмет миграционных установок сельского населения. В ходе интервьюирования была получена информация о направлениях и масштабах образовательной² и возвратной миграций молодежи и миграционных установках обследованных сельских сообществ (около 30 глубинных и 15 экспертных интервью).

Доля сельской молодежи, оставшейся в сельской местности, в Левашинском районе, Республике Дагестан и РФ рассчитывается на основе сопоставления численности сельского населения в возрасте 15–19 лет в 2010 г. и 25–29 лет в 2021 г. По различиям значения расчетного показателя можно судить о масштабах оттока сельского населения, в частности сельской молодежи, в рамках разных административно-территориальных единиц.

Для выявления вариантов миграционного поведения сельской молодежи анализировались показатель перехода школьников из 9 класса в 10, на-

правления образовательной миграции, масштабы возвратной миграции, а также особенности возрастнo-половой пирамиды населения. Для анализа миграционного поведения подробно описана ситуация в сельских населенных пунктах с большим количеством выпускников, но с разной миграционной ситуацией – Левашин, Кутиша, Наскент и Уллуя.

В статье используются сравнительно-географический, экспедиционный и математико-статистический методы, глубинного и экспертного интервью и передвижки возрастов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В начале 1990-х гг. отмечается «взрывной рост» численности населения Левашинского района, обусловленный незавершенностью демографического перехода и небольшой механической убылью населения.

Согласно результатам расчетов с использованием метода передвижки возрастов, из возрастной когорты сельского населения (15–19 лет) в 2010 г. в Левашинском районе спустя 10 лет осталось жить 93% населения. Этот показатель выше, чем в сельской местности Республики Дагестан (91,1%) и в сельской местности РФ (90,6%).

Вместе с этим значения показателей для района, региона и страны в целом завышены. Миграциологические исследования фиксируют более высокий отток молодежи из сельской местности страны, что не всегда отражает официальная статистика [Кашницкий и др., 2016]. Занижение оттока сельской молодежи связано с плохим статистическим учетом молодежной (в первую очередь образовательной) миграции.

Для Республики Дагестан неполный учет статистики о миграции сельской молодежи связан в целом с плохим качеством региональной и муниципальной статистики, с одной стороны, и с региональными особенностями учета населения – с другой (в числе причин – формирование особой территориальной системы хозяйствования [Абидов, Абдулманапов, 2015], бюджетная заинтересованность властей по завышению численности населения [Зубаревич, 2012]).

В реальности в Республике Дагестан доля молодежи, оставшейся жить в сельской местности, ниже [Абидов, Абдулманапов, 2015; Белозеров и др., 2016] и это напрямую связано с постсоветским развитием урбанизации в регионе (городское население в Республике Дагестан увеличилось почти в два раза в 1989–2021 гг.).

Внутрирегиональная миграционная ситуация существенно различается на районном уровне. Например, в Левашинском районе, несмотря на общий

² Под образовательной миграцией авторы понимают перемещение населения (чаще молодежи) в целях получения профессионального образования.

республиканский тренд сравнительно высокого оттока молодежи из сельской местности, наблюдается совершенно иная ситуация.

И статистика, вопреки ее качеству (занижения реальных масштабов оттока сельской молодежи), отражает это: относительное превышение показателя Левашинского района над республиканским и российским уровнями составляет 2–3 процентных пункта.

Рассмотрим специфику миграции сельской молодежи в Левашинском районе.

В Левашинском районе существует несколько вариантов миграционного поведения у выпускников сельских школ. Выделяются два направления деятельности (обучение и работа) и четыре варианта выбора мест для дальнейшей жизни (Левашинский район, города Дагестана, столичные города – Москва и Санкт-Петербург, другие регионы РФ).

У выпускников 9 классов существует несколько вариантов: продолжить обучение в школе в селе, поступить в учреждения среднего профессионального образования за пределами Левашинского района или остаться в районе и начать трудовую деятельность, связанную чаще с сельским хозяйством или торговлей.

У выпускников 11 классов существуют варианты уехать за пределы Левашинского района для продолжения образования в учреждениях среднего профессионального и высшего образования или с целью поиска работы, либо остаться в селе.

Выбор жизненной траектории выпускником после окончания школы зависит от многих факторов: уровня образования родителей, уровня материального благополучия семьи, наличия родственников в городах потенциальной миграции, наличия семейного дела (например, наличия земельных наделов, теплиц, бизнеса по перевозке грузов и т.д.), пола выпускника (количество уезжающих за пределы района выпускников мужского пола значительно выше, чем женского).

Наиболее распространенные варианты миграционного поведения сельской молодежи в Левашинском районе: «Учился до 9 класса, остался работать в селе», «Учился до 9/11 класса, уехал на заработки», наименее распространенные: «Учился до 11 класса, уехал учиться и вернулся».

Распределение вариантов миграционного поведения молодежи определяется экономическим фактором (иначе экономической базой района). Это проявляется в наличии мест приложения труда внутри селения или за его пределами в Левашинском районе.

Зачастую выпускники и их родители не видят явных преимуществ в продолжении образования и получении профессии в связи с низкой заработной платой по совокупности специальностей при наличии сравнительно высоких доходов в семейном

бизнесе. К тому же на выбор трудоустройства в бизнесе влияет наличие доступного опыта (т. е. бизнес ведется по аналогии с тем, как его вели родители, родственники и знакомые).

Цитата из интервью: «А зачем ему продолжать учиться? Он будет выращивать капусту и получать доход в разы больше специалистов с образованием».

Цитата из интервью: «У нас дети с детства помогают родителям в поле, на ферме на добровольной основе, после занятий в школе. Они хотят зарабатывать деньги».

В целом реальный миграционный отток сельской молодежи в Левашинском районе в сравнении с горными районами республики невысокий. В разных селах Левашинского района наблюдается различное соотношение вариантов миграционного поведения сельской молодежи. Рассмотрим ситуацию в селах с разными характеристиками.

Село Левашин является административным центром Левашинского района. Селение имеет транзитное положение, через него проходят дороги в высокогорные районы Дагестана. Левашин претерпевает бурное развитие с середины XX в.

Селение, которое по размерам уже соответствует малому городу, является главным центром торговли восточной части горного Дагестана (в нем имеются не только функционирующий еженедельно рынок, но и крупные магазины, торговые центры).

В структуре занятости населения преобладает занятость в торговле, бюджетной сфере и сфере услуг. Аграрные практики (выращивание капусты) в селе сохраняются, но постепенно вытесняются неаграрными (торговля и др.).

В Левашин 50% выпускников продолжают обучение после 9 класса в школах, и значительная часть из них поступает в вузы и уезжает из района (табл.). Выпускники больше нацелены на поступление в вузы после 11 класса и переезд из района в города Дагестана или другие регионы России. Возвращение в селение после окончания учебных заведений за пределами наблюдается крайне редко.

Цитата из интервью: «Жизнь в Левашин становится как в городе. Кто хочет работать – без работы не останется. Но мало кто после университета возвращается в село».

Особенностью Левашин является отсутствие миграционного притока в село из других населенных пунктов района, что нарушает иерархию миграции населения. Причины: высокая стоимость земли и недвижимости, транспортная доступность села и выраженная поселенческая идентичность населения. В связи с этим распространена маятниковая миграция населения в Левашин из соседних сел: рабочие поездки, покупки и т. д.

Село Кутиша является центром одноименного сельского поселения, в нем проживают аварцы. Кутиша примыкает к административному центру района: застройка селений практически срослась. Жители села Кутиша заняты выращиванием капусты, часть жителей участвует в отходничестве или работает в административном центре (фактор близости).

Юноши и девушки после 9 и 11 классов уезжают для получения образования в учреждения среднего профессионального и высшего образования, как в республике, так и за ее пределы. Несмотря на то что всего треть выпускников 9 класса переходят в 10-й (см. табл.), большая часть выпускников 11 класса продолжают обучение.

Таблица

Некоторые характеристики обследованных сел Левашинского района

Характеристика поселения	Леваши	Кутиша	Наскент	Уллуая
Географическое положение	Центральное	Полупериферийное	Полупериферийное	Периферийное
Административный статус	Центр поселения	Центр поселения	Центр поселения	Центр поселения
Численность населения на 2021 г., чел.	11 128	1958	3254	7127
Динамика людности, 2021 к 1989 г., %	+82	+95	+202	+223
Этническая структура населения	Даргинцы	Аварцы	Даргинцы	Даргинцы
Структура занятости населения	Торговля, бюджетная сфера, сельское хозяйство	Сельское хозяйство, бюджетная сфера	Сельское хозяйство, бюджетная сфера	Сельское хозяйство, грузоперевозки, торговля, бюджетная сфера
Численность учащихся на 2021 г., чел.	1673	279	584	782
Переход школьников из 9 класса в 10-й, %	50	33	82	9
Варианты миграционного поведения сельской молодежи	Разнообразные	Разнообразные	«Учился, остался работать в селе»	«Учился, остался работать в селе»
Направления миграции сельской молодежи	Дагестан (Махачкала и др.) и другие регионы России	Дагестан (Махачкала и др.) и другие регионы России	Дагестан (Махачкала и др.)	—
Масштабы оттока сельской молодежи	Средние	Значительные	Незначительные	Незначительные

Источник: составлено авторами по данным интервью и Всесоюзных и Всероссийских переписей населения по Республике Дагестан 1989, 2010 и 2021 гг.

Отчасти это связано со сравнительно ранним активным вовлечением сельского населения в миграции еще в советский период (миграция «село – город», отходничество). Интересно, что часть родителей целенаправленно приобретают для своих детей жилье в городах, что не совсем стандартно для других селений в районе.

Цитата из интервью: «Многие хотят уехать, чтобы самореализоваться, и родители не настаивают, чтобы они остались жить в селе. Половина может вернуться, чаще девушки».

Цитата из интервью: «В университеты поступают не только в Махачкалу, например, в провинциальных городах России обучение дешевле и баллы по ЕГЭ ниже».

Село Уллуая располагается вдали от районного центра (расстояние до Леваши – 11 км). Селение в постсоветский период удвоило численность населения (см. табл.). Это связано с сохранением традиции большой семьи. Средний размер частного домохозяйства в селе составляет 3,9 чел. (2-е место в Левашинском районе). В селе распространена занятость аграрными практиками и грузоперевозками.

В селении абсолютное большинство учеников (91%) уходят из школы после 9 класса. Юноши чаще начинают участвовать в семейном бизнесе (сельское хозяйство, грузоперевозки, торговля) и остаются жить в селе. Девушки также редко покидают село. Распространена стратегия сравнительно раннего заключения брака.

Помимо крепких семейных связей большую роль играет высокий уровень религиозности и традиционные установки населения. Отмечена высокая устойчивость социокультурной традиции, поселенческая общность отличается замкнутостью в сравнении с другими селениями района. Миграционный отток сельской молодежи из села практически отсутствует, не считая отходников (в основном мужчины).

Цитата из интервью: «Пока остальные учатся еще два года в школе и четыре в университете, наши ребята за эти шесть лет могут заработать и на машину, и дом начать строить, и завести семью».

Село Наскент располагается к югу от районного центра. Как и село Уллуая, в Наскенте численность населения в постсоветский период удвоилась (размер частного домохозяйства составляет 3,4 чел.). Вместе с соседними селениями Наскент образует ареал сплошной сельской застройки, в которой границы между населенными пунктами стираются из-за внушительных по размерам сельскохозяйственных наделов вблизи индивидуальных домов.

Основной специализацией селения является выращивание капусты. Этим занято более половины всего трудоспособного населения.

В селе Наскент выбор выпускников 9 класса противоположный: более 80% идут в 10 класс (см. табл.). Но при этом миграционная картина требует разъяснений. Окончив 11 класс, большинство выпускников остаются жить в селе и чаще всего включаются в семейный бизнес. Лишь 5–6 выпускников 11 классов поступают в высшие учреждения образования и уезжают из села.

Цитата из интервью: «Зачем нашим выпускникам ехать в город? Здесь в селе и работа, и деньги. Конечно, работа непростая, не каждый захочет».

ВЫВОДЫ

В Левашинском районе Республики Дагестан складывается нестандартная для большинства сельских районов РФ ситуация – «взрывной рост» численности сельского населения в переходный период, что связано со сравнительно высоким уровнем рождаемости и сравнительно более поздним включением сельского населения во внутрирегиональную и межрегиональную миграцию.

Обследование сельского низового района в горном Дагестане выявило наличие локальных отклонений одной из основных тенденций внутренней миграции

сельского населения в РФ – миграции сельской молодежи в города. Доля молодежи, остающейся жить в сельской местности, в Левашинском районе выше, чем в среднем по Республике Дагестан и РФ.

Специфика миграционной ситуации в Левашинском районе авторами связывается с факторами двух групп: географическими характеристиками территории (полупериферийное топологическое и экономическое положение в Республике Дагестан, относительно благоприятные условия для жизни и хозяйствования), социокультурными и религиозными особенностями постсоветского развития сельских сообществ (традиционализм, консервативность и религиозность).

Например, миграционное поведение сельской молодежи, напрямую зависящее от экономического благополучия Левашинского района, выраженного в положительной динамике развития агросектора в постсоветский период (преимущественно экстенсивный характер), в скором будущем может измениться в связи с земельными, водными и экологическими ограничениями. В некоторых селах они уже существенны, а в условиях роста населения данная ситуация может создать напряжение на локальных рынках труда.

Различия в миграционном поведении сельских сообществ района главным образом определяются поселенческой дифференциацией сельского населения. Иначе – каждая локальная поселенческая общность имеет свою специфику миграции сельской молодежи, которая может не совпадать с другими общностями со схожими характеристиками. Например, в районе в селах с одной и той же этнической структурой населения (даргинцы/аварцы) отмечаются зачастую полярные ситуации.

Вместе с этим в миграции сельского населения и, в частности, сельской молодежи прослеживается действие центр-периферийных различий. В периферийных (как в транспортном, так и экономическом отношении) населенных пунктах молодежь чаще остается в селах вследствие низкой конкурентоспособности выпускников за пределами родного селения (сравнительно низкое качество образования) и наличия более доходных мест приложения труда.

В центральных населенных пунктах (например, в административном центре) доля сельской молодежи, склонной к внутрирегиональной и межрегиональной миграции, выше.

Наши выводы, сделанные на основе обследования лишь одного горного сельского района, нельзя полностью распространять на другие, в том числе горно-предгорные, сельские районы Республики Дагестан в связи с высоким разнообразием сельской местности региона и направлений ее развития. Это подтверждают экспедиционные обследования

авторов в других районах республики с иной миграционной ситуацией.

В качестве рекомендаций для представителей местной власти предлагается учет специфики миграции молодежи при стратегировании развития

Левашинского района (динамика населения, рынок труда и т. д.), для образовательных учреждений – в целях проведения профориентационных мероприятий и учета существующего опыта при работе со школьниками.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-17-00107. Авторы выражают благодарность Магомедову Асхабу Алиевичу и главе администрации Левашинского района Республики Дагестан Халалмагомедову Мухтару Абдулаевичу за помощь в организации поле- вой части исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абидов М.Х., Абдулманапов П.Г. Современная миграционная картина Республики Дагестан // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. С. 259–268.
- Белозеров В.С., Чичихин В.В., Глущенко И.В. Региональные особенности этнических миграций на Северном Кавказе // Наука. Инновации. Технологии. 2016. № 1. С. 71–92.
- Бреславский А.С. Субурбанизация в постсоветской Бурятии и особенности внутренних миграционных потоков // Ойкумена. Регионоведческие исследования. 2013. № 3. С. 68–74.
- Зайончковская Ж.А. Миграция и урбанизация в СССР в послеоктябрьский период // Население СССР за 70 лет. М.: Наука, 1988. С. 37–74.
- Зубаревич Н.В. «Лукавые цифры» на карте Родины // ЭКО. 2012. № 4(454). С. 74–85.
- Имангулов Л.Р. Этнические аспекты сельской миграции в Федоровском районе Республики Башкортостан // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. № 2. С. 129–140.
- Имангулов Л.Р., Кукин К.Я. Новые функции приморской сельской местности юга России: пример Темрюкского района Краснодарского края // Крестьяноведение. 2023. № 1. С. 104–130.
- Карачурина Л.Б., Мкртчян Н.В. Роль миграции в усилении контрастов расселения на муниципальном уровне в России // Известия РАН. Сер. геогр. 2016. № 5. С. 46–59. DOI: 10.15356/0373-2444-2016-5-46-59.
- Карачурина Л.Б., Флоринская Ю.Ф. Миграционные намерения выпускников школ малых и средних городов России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 6. С. 82–89.
- Катровский А.П. Трудовая и учебная миграция в Центральной России // Миграционная ситуация и миграционная политика в Центральной России. Смоленск: Универсум, 2001. С. 61–67.
- Кашицкий И.С., Мкртчян Н.В., Лешуков О.В. Межрегиональная миграция молодежи в России: комплексный анализ демографической статистики // Вопросы образования. 2016. № 3. С. 169–203.
- Краснослободцев В.П., Савоскул М.С. Территориальная подвижность сельского населения: изменение направлений и мотивов поездок // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2004. № 4. С. 53–56.
- Миграция сельского населения / под ред. чл.-корр. АН СССР Т.И. Заславской. М.: Мысль, 1970. 312 с.
- Нефедова Т.Г. Миграционная подвижность населения и отходничество в современной России // Известия РАН. Сер. геогр. 2015. № 3. С. 41–56. DOI: 10.15356/0373-2444-2015-3-41-56.
- Нефедова Т.Г., Мкртчян Н.В. Миграция сельского населения и динамика сельскохозяйственной занятости в регионах России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 5. С. 58–68.
- Переведенцев В.И. Методы изучения миграции населения. М.: Наука, 1975. 231 с.

Поступила в редакцию 10.10.2023

После доработки 25.11.2023

Принята к публикации 04.12.2023

YOUTH MIGRATION IN THE MONTANE LEVASHINSKY DISTRICT OF DAGESTAN

L.R. Imangulov¹, D.A. Koryuhin²

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Economic and Social Geography of Russia

¹ Post-graduate student; e-mail: linar.imangulov.1999@mail.ru

² Master; e-mail: di-koru@yandex.ru

The article discusses local features of the migration behavior of rural youth based on the results of an expedition survey of a mountainous rural district of Dagestan. Among the sources of information were official and

school statistics and the results of interviews with the local population. There is a significant post-Soviet population growth in the Levashinsky district, among other things, due to the low emigration of the rural population. It was found that a significant part of young people remain in rural areas. The reasons are the presence of relatively profitable places of employment in the agricultural sector, trade and other economic activities. The most common variants of migration behavior of rural youth are: “Studied until grade 9, and stayed in the village to work”, and “Studied until grade 9/11, and left for work”, while the least common is: “Studied until grade 11, went to study and returned”. The migration behavior of rural youth in the district differs both from Russia as a whole and the region, and for particular settlements. The differences in migration attitudes of the surveyed rural communities are described for four villages of the Levashinsky district, i.e. Levashi, Kutish, Naskent and Ulluaya. It was found that each local settlement community of the Levashinsky district has its own specifics of migration situation, which, for example, is not directly related to the ethnic structure of the population.

Keywords: rural areas, rural communities, educational migration, ethnic structure of the population, mountainous territories

Acknowledgments. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 24-17-00107). The authors express their gratitude to Magomedov Askhab Alievich and to Khalalmagomedov Mukhtar Abdulayevich, the head of the Levashinsky district administration of the Dagestan Republic, for their help in organizing the field part of the study.

REFERENCES

- Abidov M.H., Abdulmanapov P.G. Sovremennaja migracionnaja kartina respubliki Dagestan [Modern migration picture of the Republic of Dagestan], *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*, 2015, no. 2, p. 259–268. (In Russian)
- Belozerov V.S., Chichihin V.V., Glushhenko I.V. Regional'nye osobennosti jetnicheskikh migracij na Severnom Kavkaze [Regional peculiarities of ethnic migrations in the North Caucasus], *Nauka. Innovacii. Tehnologii*, 2016, no. 1, p. 71–92. (In Russian)
- Breslavskij A.S. Suburbanizacija v postsovetsoj Burjatii i osobennosti vnutrennih migracionnyh potokov [Suburbanization in post-Soviet Buryatia and features of internal migration flows], *Ojkumena. Regionovedcheskie issledovanija*, 2013, no. 3, p. 68–74. (In Russian)
- Zaionchkovskaja Zh.A. [Migration and urbanization in the USSR in the post-October period], *Naselenie SSSR za 70 let* [Population of the USSR over 70 years], Moscow, Nauka Publ., 1988, p. 37–74. (In Russian)
- Zubarevich N.V. “Lukavye cifry” na karte Rodiny [“Crafty figures” on the map of the Motherland], *JeKO*, 2012, no. 4(454), p. 74–85. (In Russian)
- Imangulov L.R. Etnicheskie aspekty sel'skoj migracii v Fedorovskom rajone respubliki Bashkortostan [Ethnic aspects of rural migration in the Fedorovsky district of the Republic of Bashkortostan], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2023, no. 2, p. 129–140. (In Russian)
- Imangulov L.R., Kuksin K.Ja. Novye funkcii primorskoj sel'skoj mestnosti juga Rossii: primer Temryukskogo rajona Krasnodarskogo kraja [New functions of the primorsky rural area of the South of Russia: an example of the Temryuksky district of Krasnodar Krai], *Krest'janovedenie*, 2023, no. 1, p. 104–130. (In Russian)
- Karachurina L.B., Mkrtschan N.V. Rol' migracii v usilenii kontrastov rasselenija na municipal'nom urovne v Rossii [The role of migration in enhancing the contrasts of settlement at the municipal level in Russia], *Izv. RAN, Ser. geogr.*, 2016, no. 5, p. 46–59. DOI: 10.15356/0373-2444-2016-5-46-59. (In Russian)
- Karachurina L.B., Florinskaja Ju.F. Migracionnye namerenija vypusnikov shkol malyh i srednih gorodov Rossii [Migration intentions of school graduates of small and midsize towns of Russia], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2019, no. 6, p. 82–89. (In Russian)
- Katrovskij A.P. [Labor and educational migration in Central Russia], *Migracionnaja situacija i migracionnaja politika v Central'noj Rossii* [Migration situation and migration policy in Central Russia], Smolensk, Universum Publ., 2001, p. 61–67. (In Russian)
- Kashnickij I.S., Mkrtschan N.V., Leshukov O.V. Mezhtsejonal'naja migracija molodezhi v Rossii: kompleksnyj analiz demograficheskoi statistiki [Interregional migration of youth in Russia: a comprehensive analysis of demographic statistics], *Voprosy obrazovanija*, no. 3, p. 169–203. (In Russian)
- Krasnoslobodcev V.P., Savoskul M.S. Territorial'naja podvizhnost' sel'skogo naselenija: izmenenie napravlenii i motivov poezdok [Territorial mobility of rural population: changes in directions and motivations of trips], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2004, no. 4, p. 53–56. (In Russian)
- Nefedova T.G. Migracionnaja podvizhnost' naselenija i otkhodничество v sovremennoj Rossii [Migration mobility of population and otkhodничество in modern Russia], *Izvestija RAN, Ser. geogr.*, 2015, no. 3, p. 41–56. DOI: 10.15356/0373-2444-2015-3-41-56. (In Russian)
- Nefedova T.G., Mkrtschan N.V. Migracija sel'skogo naselenija i dinamika sel'skohozjajstvennoj zanjatosti v regionah Rossii [Migration of rural population and dynamics of agricultural employment in the regions of Russia], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2017, no. 5, p. 58–68. (In Russian)
- Perevedencev V.I. Metody izuchenija migracii naselenija [Methods of studying population migration], Moscow, Nauka Publ., 1975, 231 p. (In Russian)

Received 10.10.2023

Revised 25.11.2023

Accepted 04.12.2023

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 5. ГЕОГРАФИЯ»

Общие требования к статье

Журнал «Вестник Московского университета. Серия 5. География» публикует результаты оригинальных исследований в различных областях географической науки, теоретические, методические и обзорные статьи, представляющие интерес для мирового научного сообщества. Представленные 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

УЧРЕДИТЕЛИ:

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
географический факультет МГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

С.А. ДОБРОЛЮБОВ, доктор географических наук, профессор, академик РАН (главный редактор)
В.С. ТИКУНОВ, доктор географических наук, профессор (зам. главного редактора)
Е.А. ЕРЕМЕНКО, кандидат географических наук (ответственный секретарь)
А.И. АЛЕКСЕЕВ, доктор географических наук, профессор
С.И. БОЛЫСОВ, доктор географических наук, профессор
А.Н. ГЕННАДИЕВ, доктор географических наук, профессор
К.Н. ДЬЯКОНОВ, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН
С.С. ЗИЛИТИНКЕВИЧ, доктор географических наук, профессор (Метеорологический институт Финляндии)
О.Г. ЗОЛИНА, профессор (Университет Ж. Фурье, г. Гренобль, Франция)
В.Ю. ИВАНОВ, профессор (Мичиганский университет, США)
Н.С. КАСИМОВ, доктор географических наук, профессор, академик РАН
А.В. КИСЛОВ, доктор географических наук, профессор
В.А. КОЛОСОВ, доктор географических наук, профессор
К.П. КОЛТЕРМАНН, профессор
М. КОНЕЧНЫ, профессор (Университет г. Брно, Чешская Республика)
С.Б. КРООНЕНБЕРГ, профессор (Технологический университет г. Делфт, Нидерланды)
С.М. МАЛХАЗОВА, доктор географических наук, профессор
Г. МОУРИ, профессор (Университет г. Токио, Япония)
С.А. СОКРАТОВ, кандидат географических наук, PhD
П.Е. ТАРАСОВ, доктор наук, профессор (Берлинский Свободный университет, Германия)
Н.Л. ФРОЛОВА, доктор географических наук, профессор
В.Е. ШУВАЛОВ, кандидат географических наук, доцент
Т.А. ЯНИНА, доктор географических наук, профессор
В.В. ЯНКО-ХОМБАХ, доктор геолого-минералогических наук, профессор (Институт прикладных исследований Авалон, г. Виннипег, Канада)

EDITORIAL BOARD:

S.A. DOBROLUBOV, doctor of science, Academician 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
А.И.АЛЕКСЕЕВ, А.В. КИСЛОВ

Редактор **Е.С. Повалишникова**

Адрес редколлегии:

119992, Москва, Ленинские горы, МГУ,
географический факультет, комн. 2108а. Тел. 7(495) 939-29-23

Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ.
Свидетельство о регистрации № 1552 от 14 февраля 1991 г.

Подписано в печать 00.00.2016. Формат 60×90/8.
Гарнитура Times New Roman. Бумага офсет. № 1. Офсетная печать. Усл. печ. л.
Уч.-изд. л. 00. Тираж экз. Изд. № 00000. Заказ №

Типография МГУ.
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 15.