

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ И ИСТОРИКО-ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИКУ ЧИСЛЕННОСТИ СЕЛЬСКОГО НАСЕЛЕНИЯ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

© 2021 г. Д. В. Житин^a, *, Ю. Н. Курочкин^a, **,
К. В. Чистяков^a, ***, А. В. Шендрек^a, ****

^aСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: zhitin_dv@mail.ru

**E-mail: y.kurochkin@spbu.ru

***E-mail: k.chistyakov@spbu.ru

****E-mail: shen@mail.ru

Поступила в редакцию 06.05.2021 г.

После доработки 15.06.2021 г.

Принята к публикации 25.06.2021 г.

Рассматривается влияние различных природно-географических и историко-демографических факторов на динамику численности сельского населения Красноярского края. Учитывая размер территории, разнообразие природно-климатических и социально-экономических условий, характер протекания демографических процессов, регион можно назвать модельным для изучения процессов трансформации системы сельского расселения в России. В работе освещены основные исторические этапы заселения и формирования системы расселения края, начиная с XVII в. Подробно исследуется динамика численности сельского населения на современном этапе – с 1989 по 2020 гг. на разных территориальных уровнях: регион – субрегион – район – населенный пункт. Представлен ряд оригинальных авторских картосхем. В качестве основных факторов, определяющих устойчивость сельских населенных пунктов и динамику численности сельского населения, для детального анализа авторами отобраны четыре ключевых показателя: 1) расстояние от сельского населенного пункта до районного или субрегионального центра; 2) размер (людность) населенного пункта; 3) возраст (время основания); 4) тип ландшафта, в котором расположен населенный пункт. Проведенный анализ подтверждает влияние всех указанных факторов на темпы депопуляции сельских населенных пунктов, однако в отдельных субрегионах и районах края они имеют различное значение. Фактор расстояния наиболее отчетливо проявляется в Центральном субрегионе края. Размер населенного пункта является значимым фактором в Восточном, но теряет свое значение в Центральном, Южном и Северном субрегионах. Анализ периода основания и типа ландшафта позволяет отметить в качестве наиболее устойчивых сельские населенные пункты, основанные в XVIII в. в лесостепных ландшафтах.

Ключевые слова: история освоения, система расселения, сельское население, сельский населенный пункт, динамика численности населения, депопуляция, градиент центр-периферия, ландшафт

DOI: 10.31857/S0869607121040042

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Процесс урбанизации, наиболее бурно проявивший себя в глобальном масштабе во второй половине XX в., привнес глубокие изменения и в характер системы расселения населения на территории Российской Федерации. Если весь предшествующий исторический период сельская форма расселения была доминирующей, то в середине прошлого века удельный вес городского населения перевалил за 50% и продолжает увеличиваться. Тогда же, с конца 1950-х гг., начинается абсолютное сокращение численности сельских жителей в Российской Федерации, как вследствие их миграции в города, так и в результате административных преобразований сельских населенных пунктов (СНП) в городские. С конца 1980-х гг. в большинстве российских регионов на отрицательную динамику численности сельского населения начинает влиять и естественная убыль, возникшая вследствие сложившейся неблагоприятной половозрастной структуры населения и снижения общей интенсивности деторождения.

Тем не менее, и сегодня сельские населенные пункты количественно преобладают в абсолютном большинстве региональных систем расселения, а их людность, характер пространственного размещения и функциональный тип определяют уровень хозяйственной освоенности территории. В этой связи, общая депопуляция сельской местности, продолжающаяся в России в течение нескольких десятилетий, влечет за собой и целый шлейф негативных социальных и экономических последствий. Как отмечает А.А. Фомкина, “в современных условиях на фоне общего сжатия освоенного пространства и деградации сети СНП происходит дезорганизация систем расселения, когда оставшиеся центры немногочисленны, а зона их влияния становится преимущественно сезонно обитаемой” [29].

ОБЗОР ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Нельзя сказать, что процессы происходящей трансформации систем сельского расселения оставались на периферии внимания российских ученых. Среди научных исследований, посвященных данной тематике, необходимо отметить работы Т.Г. Нефедовой [22], А.И. Алексеева, С.Г. Сафонова [1], Д.О. Егорова, В.С. Шурупиной [13], О.С. Рудневой, А.А. Соколовой [25], в которых рассматриваются особенности динамики численности населения СНП различной людности. В публикациях А.Г. Манакова, В.С. Дементьева, С.П. Клейменова [12, 20], Р.А. Галина [9], В.О. Вихрева, А.А. Ткаченко, А.А. Фомкиной [8], И.П. Смирнова [27], В.П. Петрищева, Ю.В. Черкасовой, П.А. Косых [24], Р.А. Хайрова [30], С.В. Уставщиковой [28], Н.В. Чугуновой, Т.А. Поляковой [31] уделяется внимание эволюции в течение последних десятилетий сельских систем расселения отдельных российских регионов. Пространственный анализ поляризации системы сельских населенных пунктов Нечерноземной зоны России выступает темой исследования И.А. Валяева и А.Г. Вознесенской [7]. Влиянию топологических свойств сети населенных пунктов Тюменской области на динамику их людности посвящена работа А.В. Шелудкова и М.А. Орлова [32], рассматривающих положение СНП в поселенческой сети. Оригинальный метод оценки устойчивости систем сельского расселения на материалах Чувашской Республики предложен Ю.Р. Архиповым [5]. Большое внимание в исследованиях, посвященных сельскому расселению, уделяется и разработке новой типологии СНП [2, 3], отличающейся от используемой ранее, в советский период [19].

Проблемы демографического и социально-экономического развития сельской местности находят свое отражение и в работах ученых из стран СНГ. Так, факторам, определяющим развитие сельского расселения, посвящена работа белорусского исследователя Е.В. Горбенковой [10], вопросам развития сельского расселения в Республике Казахстан – статья Т.Е. Карбозова и Ж.К. Шакеновой [18]. Методологиче-

ские аспекты историко-географического изучения расселения рассматриваются в работе украинских ученых В.В. Яворьской и А.Е. Калетинской [33].

Демографическое развитие сельской местности также регулярно освещается и в работах европейских и американских географов и демографов. В США проблемы сокращения сельского населения и миграции сельских жителей особенно актуальны для региона Великих равнин [37, 41, 44].

В Европе тема депопуляции периферийных и горных сельских территорий поднимается исследователями практически в каждой стране. Чаще всего можно встретить публикации, в которых данные вопросы рассматриваются на примере региона Альп [35, 42], Испании [38, 39, 47, 53], Скандинавии [45, 46], Шотландии [50, 51], стран Восточной Европы [40, 43, 54].

В последнее время особо актуальным становится изучение феномена возобновления роста сельского населения в некоторых регионах — так называемой “репопуляции” сельской местности и факторов, влияющих на этот процесс [36, 48, 49, 52].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Динамика численности населения служит одним из важнейших и, в то же время, наиболее заметных индикаторов устойчивости сельских систем расселения. Изменение людности сельских населенных пунктов (в любом направлении) неизбежно приводит и к их социально-экономической трансформации. При этом имеются существенные различия в скорости изменения численности населения СНП, как между регионами Российской Федерации, так и на внутрирегиональном уровне.

В целом, перечень факторов, определяющих устойчивость СНП, достаточно подробно описан в современной научной литературе. Это и различие природных условий [1], и место населенного пункта в локальной системе расселения [11, 27], и центр-периферийные различия [16, 21], и специфика современной пространственной организации сельского хозяйства [23]. Но то, в какой мере та или иная причина влияет на демографическое развитие СНП, часто имеющих сходные характеристики, до настоящего времени остается не вполне выясненным.

Анализу факторов, влияющих на динамику численности населения СНП на современном этапе развития российского общества, посвящена данная работа.

Географическим объектом исследования выбран Красноярский край, численность сельского населения которого за последние 30 лет сократилась на 22%. По обширности территории, разнообразию природно-климатических и социально-экономических условий, характеру протекания демографических процессов регион является своего рода уменьшенной копией всей Российской Федерации. Наличие обширной сети сельских населенных пунктов, распадающейся на ряд локальных сообществ, позволяет рассматривать территорию Красноярского края в качестве полигона изучения процессов трансформации системы сельского расселения. Единственным, но существенным отличием от Европейской России является то, что система постоянных населенных пунктов на современной территории Красноярского края начала формироваться сравнительно недавно — чуть более четырех веков назад, когда в начале XVII в. в Восточную Сибирь пришли первые переселенцы с запада. Если испанских конкистадоров в Новый Свет влекло золото, то русских казаков и поморов Сибирь манила “мягкой рухлядью” — мехами соболя, песца, черно-буровой лисицы. Основными (и единственными) дорогами в этой малонаселенной стране в тот период были реки, по которым и проникали отряды первоходцев. Эти два фактора — разветвленная речная сеть и обилие пушного зверя, обитающего в таежной и лесотундровой зонах, — и обусловили особенности системы расселения Восточной Сибири, в целом, и Красноярского края, в частности, на первом этапе ее формирования.

Первое поселение на территории современного Красноярского края возникает уже в 1605 г., когда в среднем течении Енисея, недалеко от впадения в него реки Сым казаками строится острог, ставший впоследствии селом *Ярцево* (Енисейский район). Через два года (1607 г.) в нижнем течении Енисея, у впадения в него реки Турухан, основывается *Туруханский острог* (*Новая Мангазея*) (сегодня – село *Старотуруханск*), ставший впоследствии уездным центром Сибирской губернии, крупным торговым центром, специализировавшимся на пушнине.

Вслед за Туруханском в 1619 г. на Енисее, чуть ниже его слияния с Ангарой возникает *Енисейский острог* (город Енисейск), ставший, благодаря своему выгодному географическому положению, почти на два столетия главным экономическим и административным центром Восточной Сибири. В 1628 г. для защиты Енисейска от набегов кочевников южнее его на левом берегу реки на “высоком и красном яру” основывается *Красноярский острог* – будущий административный центр края город Красноярск [6]. В последующие годы к западу и востоку от Красноярска возникают города Ачинск и Канск. К концу XVII в. на территории Красноярского края насчитывалось уже более 60 населенных пунктов (острогов и селений), сохранившихся до нашего времени.

Постепенно значение пушного промысла снижается, и центр экономической жизни смещается на юг, на территории лесостепной зоны, пригодные для земледелия. Лесостепная зона в Восточной Сибири имеет не сплошной, а очаговый характер. В Красноярском крае есть четыре основных ареала лесостепи: западный – в районе Ачинска и Назарово, центральный – к северу от Красноярска, восточный – в районе Канска, южный – в Минусинской котловине.

Определяющим фактором при формировании системы расселения на территории современного Красноярского края становится проведение в первой половине XVIII в. Сибирского (Московского) тракта – сухопутного торгового пути, связавшего европейскую часть России с Китаем через территорию Забайкалья. Изменение направления прохождения основных транспортных путей в регионе привело к упадку Енисейска и других населенных пунктов, расположенных в таежной зоне, и дало толчок к развитию территории вдоль Сибирского тракта и расположенных здесь поселений. Собственно, прохождение главного торгового пути по лесостепной зоне и было, в значительной степени, обусловлено более высокой сельскохозяйственной продуктивностью этой территории и ее интенсивным заселением переселенцами из Европейской части России, в период, когда экспорт пушнины стал терять свое значение для российской внешней торговли.

В 1822 г. в составе Иркутского генерал-губернаторства образуется Енисейская губерния с центром в Красноярске. Обслуживание Сибирского тракта (извозный промысел, ямщина) способствует развитию ремесленных и торгово-транспортных функций городов, пришедших на смену их военно-оборонительным функциям. В этот период усиливается поток переселенцев в Минусинский, Ачинский и Красноярский округа как наиболее благоприятные для земледелия. Следующий этап в развитии территории современного Красноярского края связан со строительством в конце XIX – начале XX вв. Транссибирской железнодорожной магистрали, ускорившей рост городов и поселков, через которые она прошла. Строительство Транссиба подстегнуло переселение в Сибирь крестьян из губерний Европейской России – за период с 1881 по 1916 гг. на территории края возникают сотни новых сел и деревень. Интересно, что отвечавшие за выбор мест для создания новых поселений Переселенческие управления сибирских губерний старались выбирать ландшафты, аналогичные тем, откуда прибывали колонисты. Основными территориями вселения становились речные долины и межгорные котловины (на юге края), отличавшиеся выгодным разнообразием сельскохозяйственных угодий.

В советский период появились новые пространственные векторы социально-экономического развития территории края. Это было связано с интенсивным развитием

лесозаготовительной, а впоследствии и деревообрабатывающей промышленности в Нижнем Приангарье, где было создано 22 леспромхоза [26]. В 1930-е гг. начинается активная добыча угля Канско-Ачинского буроугольного бассейна и уникальных месторождений цветных металлов на Таймыре, где начинается строительство Норильского горно-металлургического комбината и города Норильска. В этот же период открывается судоходство по Северному морскому пути с созданием портовых комплексов в Дудинке, Диксоне, Хатанге.

Со второй половины 1950-х гг. начинается сокращение абсолютной численности сельского населения Красноярского края. За период с 1959 по 1988 гг. количество сельских жителей в регионе снизилось более чем на 1/4. Данный процесс продолжился и после распада СССР и перехода от плановой советской системы к рыночной экономике. Несмотря на то, что в период с 1991 по 2013 гг. 17 поселков городского типа с общей численностью населения более 50 тыс. человек было переведено в категорию сельских населенных пунктов (СНП), количество сельских жителей в регионе продолжало уменьшаться. За период с 1989 по 2019 гг. численность сельского населения Красноярского края сократилась на 21.4%¹ и составляет сегодня 644.6 тыс. чел., проживающих в 1700 населенных пунктах, из которых 89 (5.2% от общего количества СНП региона) не имеет постоянного населения.

Рассматривая темпы сокращения численности сельского населения Красноярского края в постсоветский период, необходимо отметить, что они характеризуются значительной пространственной изменчивостью. Наибольшая депопуляция сельского населения наблюдается на Красноярском Севере (Таймыр, Эвенкия, Туруханский район) и в Приангарье² (рис. 1). За период 1989–2019 гг. количество сельских жителей в этих субрегионах сократилось (без учета административных преобразований – перевода ряда поселков городского типа в категорию сельских населенных пунктов) почти в два раза, соответственно, на 45 и 43%.

В меньшей степени – на 35.4% от уровня 1989 г. – сократилась численность сельского населения в Восточном субрегионе Красноярского края³. В Западном⁴ и Южном субрегионах депопуляция имела значительно меньшие масштабы: за последние три десятилетия сельское население сократилось здесь, соответственно, на 26 и 18.4%. Только в Центральном субрегионе – районах, расположенных в непосредственной близости от Красноярска⁵ – за период с 1989 по 2019 гг. численность сельских жителей практически не изменилась (рис. 2–4).

Если же взглянуть на динамику численности сельского населения на уровне муниципальных районов, то пространственная обусловленность данного процесса не так очевидна, как это может показаться, если исходить из представления о его концентрации вокруг наиболее крупных городов и на территориях с более благоприятными климатическими условиями (рис. 5).

Как и в большинстве других регионов России, в Красноярском крае существующие пространственные различия в динамике численности населения обусловлены, прежде всего, разной интенсивностью миграционных потоков, связанных с продолжающимся оттоком населения из сельской местности. Различия в темпах естественного прироста (убыли) имеют здесь второстепенное значение и вызваны диспропорциями поло-

¹ Без учета административных преобразований (перевода в 1991–2013 гг. 17 поселков городского типа в категорию сельских населенных пунктов) сокращение численности сельского населения в Красноярском крае в 1989–2019 гг. составило бы 28% от уровня 1989 г.

² Енисейский, Северо-Енисейский, Казачинский, Пирровский, Мотыгинский, Богучанский и Кежемский районы.

³ Абанский, Дзержинский, Иланский, Ирбейский, Канский, Нижнеингашский, Партизанский, Рыбинский, Саянский, Тасеевский и Уярский районы.

⁴ Ачинский, Бирюлусский, Большегульский, Боготольский, Балахтинский, Новоселовский, Козульский, Назаровский, Тюхтетский, Ужурский и Шарыповский районы.

⁵ Березовский, Большемуртинский, Емельяновский, Манский и Сухобузимский районы.

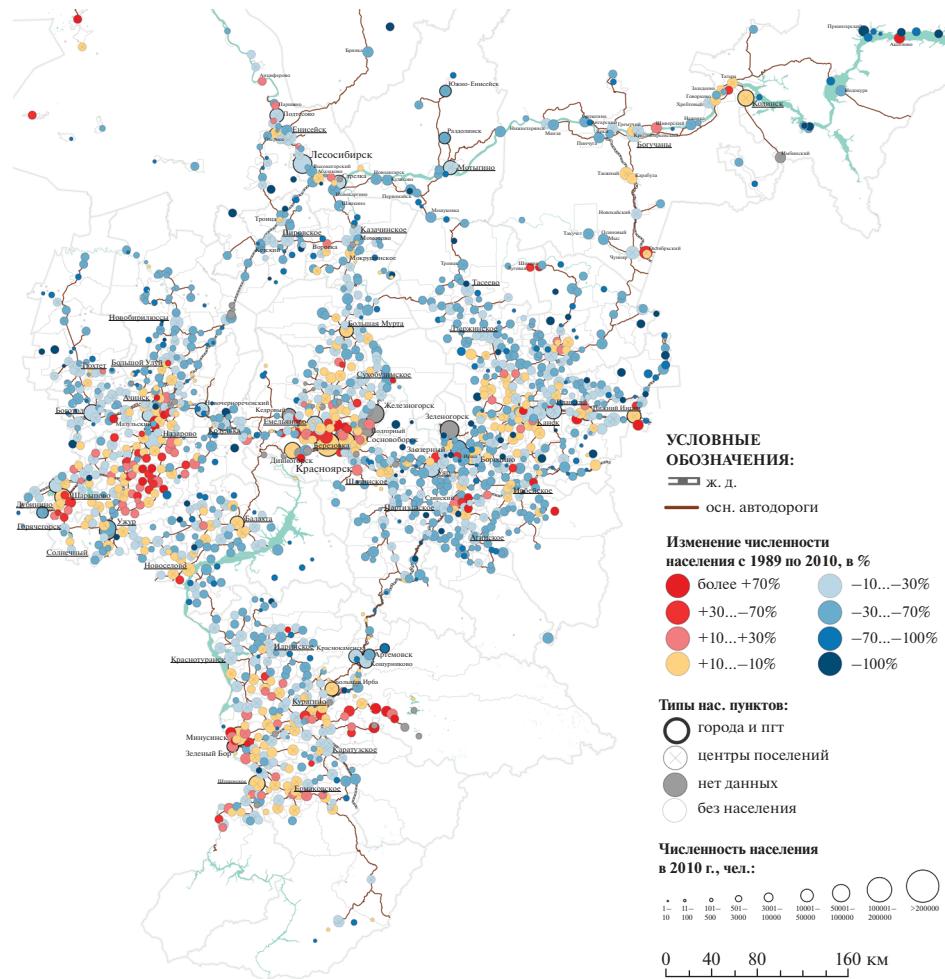


Рис. 1. Динамика численности населения населенных пунктов южной части Красноярского края в 1989–2010 гг. (составлено авторами по данным Росстата [34]).

Fig. 1. Population dynamics of the southern part of Krasnoyarsk region settlements in 1989–2010 (compiled by the authors using Rosstat data [34]).

возрастной структуры населения. Последние, впрочем, также являются следствием территориальной неравномерности миграционных процессов.

В этой связи, представляется актуальным рассмотреть, в какой мере те или иные причины влияют на динамику численности жителей сельских населенных пунктов (СНП) Красноярского края. После предварительного анализа были выбраны следующие природно-географические и историко-демографические факторы: 1) расстояние от СНП до районного/субрегионального центра; 2) размер (людность) СНП; 3) возраст (время основания) СНП; 4) тип ландшафта, в котором расположен СНП.

Для анализа динамики численности населения сельских населенных пунктов был выбран временной интервал между переписями населения 1989 и 2010 гг. Нижняя граница диапазона исследования, почти совпадающая по времени с переходом к совре-

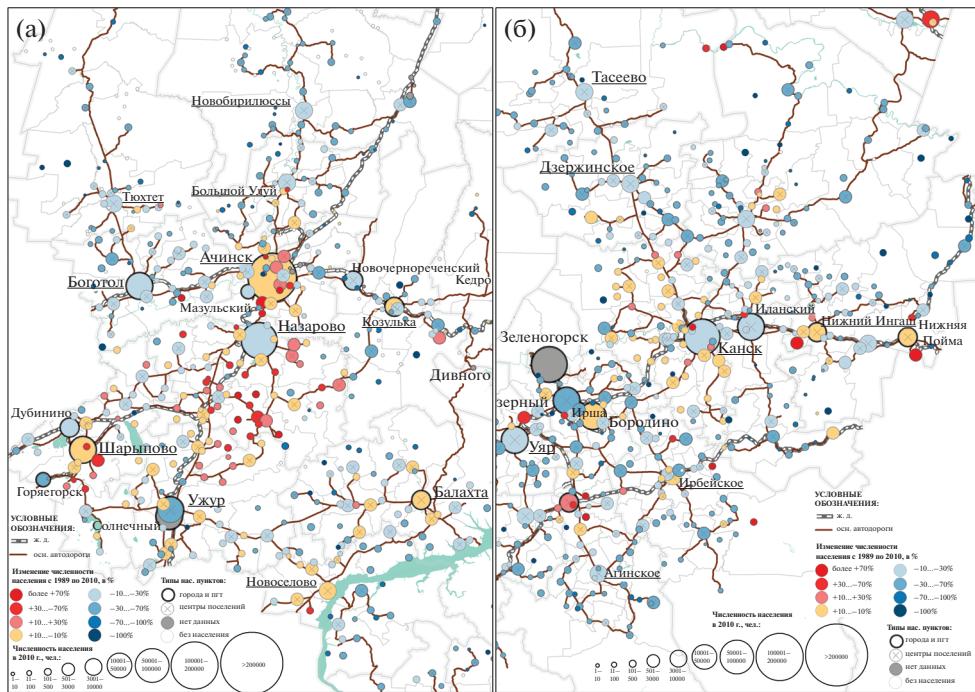


Рис. 2. Динамика количества жителей в населенных пунктах Западного (а) и Восточного (б) субрегионов Красноярского края в 1989–2010 гг. (составлено авторами по данным Росстата [34]).

Fig. 2. Population dynamics in the settlements of West (a) and East (b) subregions of Krasnoyarsk region in 1989–2010 (compiled by the authors using Rosstat data [34]).

менной системе экономических и социальных отношений в Российской Федерации, обусловлена тем, что характер социально-экономических и демографических процессов в сельской местности в советский период существенно отличался от наблюдаемых в последние десятилетия. В условиях плановой экономики советского типа административно-командные методы управления социальными процессами часто шли в разрез с объективным характером трансформации системы сельского расселения⁶. Верхняя граница выбранного временного интервала – 2010 г. – определяется отсутствием доступных данных о численности населения каждого сельского населенного пункта в межпереписной период⁷.

По данным переписи населения 2010 г. на территории Красноярского края располагалось 1700 сельских населенных пунктов различной плотности. Ранее 7 из них (по состоянию на 1989 г.) имели статус поселков городского типа. В 24 юридически существовавших СНП уже в 1989 г. не было населения. По 59 СНП отсутствуют данные о численности населения в 1989 г. Таким образом, рассматривалась динамика числен-

⁶ Можно вспомнить одну лишь “политику селения неперспективных деревень”, послужившую своего рода детонатором процесса ускоренной деградации системы сельского расселения в российском Нечерноземье.

⁷ Такие данные будут получены только в ходе следующей переписи населения 2021 г. и станут доступны не ранее конца 2022 г.

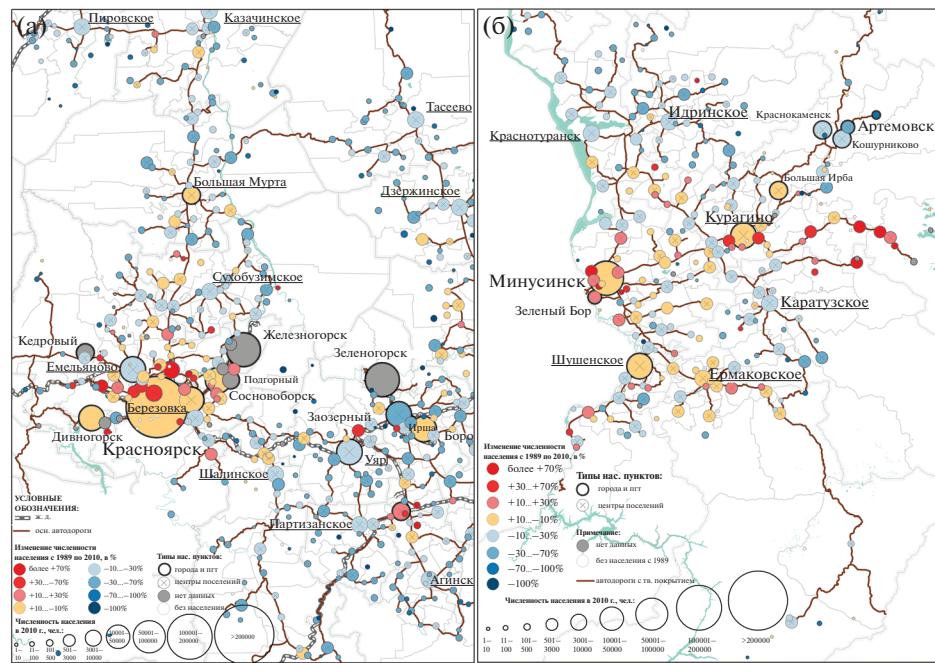


Рис. 3. Динамика количества жителей в населенных пунктах Центрального (а) и Южного (б) субрегионов Красноярского края в 1989–2010 гг. (составлено авторами по данным Росстата [34]).

Fig. 3. Population dynamics in the settlements of Central (a) and South (b) subregions of Krasnoyarsk region in 1989–2010 (compiled by the authors using Rosstat data [34]).

ности населения в 1610 населенных пунктах Красноярского края⁸, на которые приходится 94.4% сельских жителей региона.

РАССТОЯНИЕ ОТ СНП ДО РАЙОННОГО/СУБРЕГИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА

Довольно распространено мнение, что по мере удаленности от районно-организующих центров регионального и локального уровней скорость депопуляции в сельской местности увеличивается [13, 16, 32]. Предполагается, что недоступность базовых социальных услуг, мест досуга и отдыха и (главное!) мест приложения труда являются основными причинами миграционного оттока населения из сельской местности и превращения ранее освоенной территории в “антропопустыню” [14]. Рассмотрим, в какой степени динамика численности населения СНП Красноярского края зависит от их удаленности от субрегиональных и районных центров.

Сегодня в крае имеется 6 субрегиональных центров, которые не только выступают логистическими центрами для окружающих их муниципальных районов, но и выполняют важные социально-экономические функции. Для Западного субрегиона таким центром служит г. Ачинск, для Восточного – Канск. Семь муниципальных районов, расположенных в Минусинской котловине, замыкаются на крупнейший город Южного субрегиона – Минусинск. Для населения центральной части юга Красноярского края (включает пять районов) центром притяжения является столица региона – город

⁸ 95% общего количества СНП Красноярского края в 2010 г.

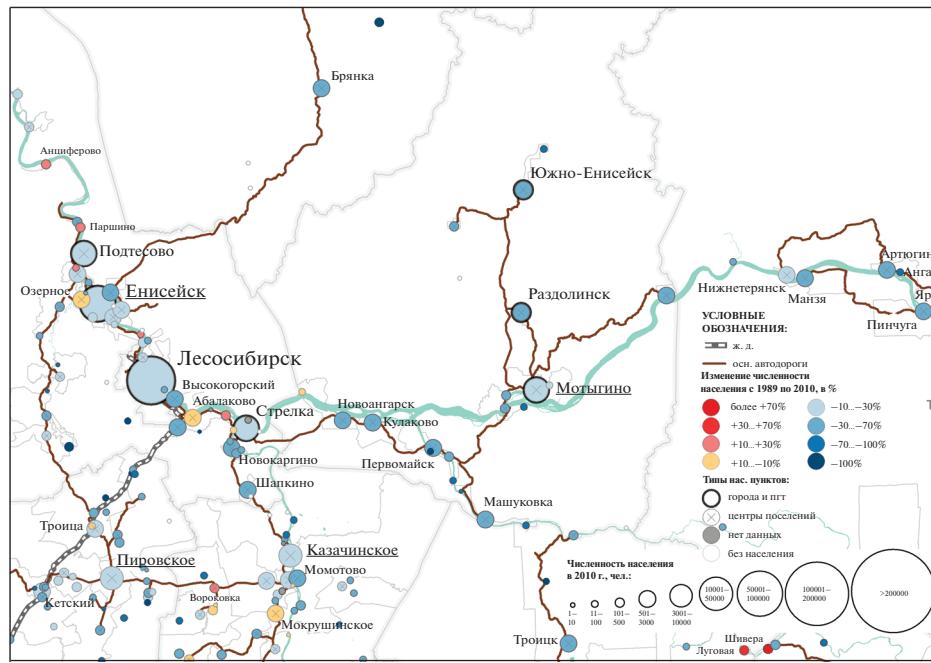


Рис. 4. Динамика количества жителей в населенных пунктах Западного Приангарья в 1989–2010 гг. (составлено авторами по данным Росстата [34]).

Fig. 4. Population dynamics in the settlements of West Angara subregion in 1989–2010 (compiled by the authors using Rosstat data [34]).

Красноярск, выполняющий одновременно функции регионального и субрегионального центров. Центром Западного Приангарья служит г. Лесосибирск. Восточное Приангарье (Богучанский и Кежемский районы) территориально обособлено от других частей Красноярского края и пока не имеет своего субрегионального центра. Отсутствие связности наземными видами транспорта не позволяет рассматривать удаленность сельских населенных пунктов Туруханского, Эвенкийского и Таймырского районов от центра Северного субрегиона – г. Норильска. По той же причине отсутствия автомобильного и/или железнодорожного сообщения для трех названных выше муниципальных районов невозможно рассчитать и удаленность сельских населенных пунктов от районных центров.

Для определения тесноты и знака взаимосвязи между расстоянием в километрах от СНП до субрегионального/районного центра и темпом изменения численности населения (в % к показателям 1989 г.) использовался непараметрический подход с расчетом рангового коэффициента корреляции Спирмена и его качественной интерпретацией по шкале Чеддока. Такой подход обеспечивает большую объективность в оценке связей, учитывая вид распределения, качество и длину исследуемых рядов данных, а также различие в шкалах измерений этих рядов. Во многих областях исследований трактовка качественной шкалы Чеддока сводится к таким определениям: *умеренные* показатели (0.3–0.5) позволяют предполагать наличие весомости данного фактора, особенно при отсутствии других, может даже равнодействующих; *заметные* показатели (0.5–0.7) уже требуют их обязательного учета в моделях или выводах, а *высокие* показатели (более 0.7) очень часто говорят о главенствующем положении этого фактора.

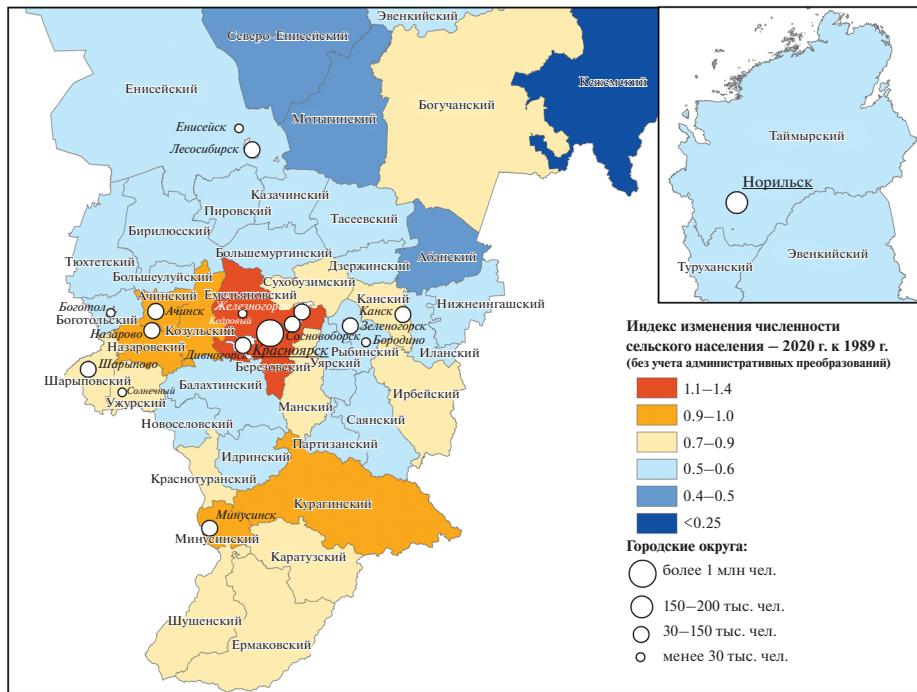


Рис. 5. Динамика численности сельского населения муниципальных районов Красноярского края в 1989–2020 гг. (составлено авторами по данным Росстата [34]).

Fig. 5. Rural population dynamics in municipalities of Krasnoyarsk region in 1989–2020 (compiled by the authors using Rosstat data [34]).

Анализ табл. 1 показывает, что Центральный субрегион значительно отличается от остальных заметной (по шкале Чеддока) теснотой субрегиональной и районной отрицательной корреляционной связи (при увеличении расстояния от субрегионального/районного центра увеличивается темп убыли населения). Самый высокий районный показатель КК Спирмена зарегистрирован в Березовском (Центр), а также в Кежемском (Восточное Приангарье) районах. Только в этих двух районах Красноярского края качественную оценку силы корреляционной связи между темпами депопуляции сельских населенных пунктов и расстоянием до районного центра можно охарактеризовать как высокую. При этом Кежемский район занимает здесь особое место – в связи с созданием Богучанского водохранилища, в 1988–1992 и в 2008–2012 гг. с территории, попавшей в зону затопления, было переселено в общей сложности более 13 тыс. чел., что существенно изменило естественный ход демографических процессов.

Южный и Восточный субрегионы Красноярского края также имеют статистически значимую корреляционную связь между расстоянием в километрах от СНП до субрегионального центра и темпом изменения численности населения, но эта связь может быть оценена как умеренная ($-0.3\dots-0.5$). В Западном субрегионе взаимосвязь статистически незначима, но он отличается большим количеством заметных районных связей (за исключением Боготольского и Назаровского районов). При этом, в Ужурском районе зарегистрирован единственный случай статистически значимой положительной корреляции между удаленностью СНП от районного центра и динамикой изменения численности населения (при увеличении расстояния уменьшается темп убыли на-

Таблица 1. Коэффициенты корреляции Спирмена между расстоянием и темпом изменения численности населения СНП на субрегиональном и районном уровнях (составлено авторами по данным Росстата [34])

Table 1. Spearman correlation coefficients between distance and the rate of population change of rural settlements at the sub-regional and district levels (compiled by the authors using Rosstat data [34])

Субрегион/регион (число районов)	КК Спирмена расстояние от субрегионального центра vs изменение численности населения, %	Район	КК Спирмена расстояние от районного центра vs изменение численности населения, %
Красноярский край			
Центральный (5)	-0.21*	Березовский Большемуртинский Емельяновский Манский Сухобузимский	-0.74 -0.43 -0.61 -0.56 -0.41
Восточный (11)	-0.52 -0.37	Абанский Дзержинский Иланский Ирбейский Канский Нижнеингашский Партизанский Рыбинский Саянский Тасеевский Уярский	-0.48 -0.18 -0.25 -0.49 -0.38 -0.47 -0.21 0.07 -0.19 0.08 -0.41
Западный (11)	-0.23	Ачинский Балахтинский Бирюлюсский Боготольский Большеулуйский Козульский Назаровский Новоселовский Тюхтетский Ужурский Шарыповский	-0.63 -0.59 -0.33 -0.14 -0.64 -0.33 0.08 -0.60 -0.41 0.40 -0.44
Южный (7)	-0.41	Ермаковский Идринский Каратузский Краснотуренский Курагинский Минусинский Шушенский	-0.62 -0.38 -0.11 -0.38 -0.09 -0.36 0.22
Западное Приангарье (5)	-0.14	Енисейский Казачинский Мотыгинский Пирровский Северо-Енисейский	0.02 -0.14 0.01 -0.29 -0.28
Восточное Приангарье (2)	-	Богучанский Кежемский	-0.14 -0.78

* Курсивом выделены статистически незначимые КК Спирмена, определенные при $\alpha = 0.05$.

селения). В Западном Приангарье корреляционных связей между исследуемыми характеристиками не обнаружено. Следует отметить, что в 23 из 41 рассматриваемого муниципального района региона наблюдается высокая (2 района), заметная (7 районов) и умеренная (14 районов) корреляционная связь между темпами депопуляции сельского населения и расстоянием от СНП до районного центра. В региональном масштабе по всему Красноярскому краю коэффициент корреляции Спирмена между рассматриваемыми показателями не имеет статистической значимости.

ЛЮДНОСТЬ СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

Для городского населения России в последние десятилетия характерна неравномерность демографического развития: крупные города имеют, в целом, лучшую динамику, чем средние и малые [4]. В какой мере аналогичные процессы присущи сельским системам расселения Красноярского края в условиях общей депопуляции? Происходит ли концентрация сельских жителей в наиболее крупных населенных пунктах рассматриваемого региона?

Если рассматривать динамику групп СНП Красноярского края различной плотности в период с 1989 по 2010 гг., то может показаться, что тезис о возрастании скорости депопуляции с уменьшением плотности населенных пунктов находит подтверждение. Так, доля СНП с плотностью менее 100 человек в рассматриваемый период увеличилась в регионе с 21.4 до 32.5% от их общего количества, а доля СНП, вообще, не имеющих населения — с 1.9 до 5.2%. В то же время, удельный вес крупных сельских населенных пунктов (с численностью населения более 1000 жителей) в общем количестве СНП Красноярского края за два десятилетия снизился с 11.2 до 8.6%. И это при том, что в разряд крупных СНП в исследуемый период было переведено семь поселков городского типа.

Для определения тесноты и знака взаимосвязи между плотностью СНП и темпом изменения численности населения (в процентах к показателям 1989 г.) также использовался непараметрический подход с расчетом КК Спирмена.

Анализ результатов (табл. 2) показывает определенное наличие статистически значимых положительных связей между плотностью и темпом изменения численности населения (в данном случае положительный коэффициент корреляции Спирмена указывает на уменьшение темпов убыли населения с ростом плотности). На субрегиональном уровне выделяется Восточный субрегион с умеренным общим показателем связи 0.43, в районном масштабе имеющий заметную связь (КК Спирмена от 0.5 до 0.7) в 5 из 11 районов, причем максимальный показатель зарегистрирован в Тасеевском районе с коэффициентом корреляции 0.68.

Умеренные связи исследуемых характеристик на субрегиональном и районном уровнях наблюдаются также в Западном и Восточном Приангарье, хотя в последнем, вероятно, только за счет Богучанского района. Практически отсутствуют статистически значимые корреляционные связи на обоих уровнях в Центральном, Южном (кроме Идринского района) и Северном субрегионах. При этом следует отметить, что на региональном уровне выявлена умеренная взаимосвязь (КК Спирмена 0.34) между плотностью СНП и темпом изменения численности населения. Из всех 44 муниципальных районов Красноярского края в восьми выявлена заметная корреляционная связь между темпами изменения численности населения СНП и их плотностью, а в 14 — умеренная. Показателей КК Спирмена более 0.7 (высокая связь) между рассматриваемыми показателями не зафиксировано ни в одном из районов региона.

ПЕРИОД ОСНОВАНИЯ СНП

Из 1610 рассматриваемых в данной работе сельских населенных пунктов Красноярского края удалось установить время основания только для 519 (32%). Данные СНП

Таблица 2. Коэффициенты корреляции Спирмена между людностью СНП и темпом изменения численности населения на субрегиональном и районном уровнях (составлено авторами по данным Росстата [34])

Table 2. Spearman correlation coefficients between the population of rural settlements and the rate of population change at the sub-regional and district levels (compiled by the authors using Rosstat data [34])

Субрегион/регион (количество районов)	КК Спирмена людность СНП vs изменение численности населения, %	Район	КК Спирмена людность СНП vs изменение численности населения, %
Красноярский край	0.34	—	—
Центральный (5)	<i>0.28*</i>	Березовский Большемуртинский Емельяновский Манский Сухобузимский	0.23 0.18 0.21 0.48 0.03
Восточный (11)	0.43	Абанский Дзержинский Иланский Ирбейский Канский Нижнеингашский Партизанский Рыбинский Саянский Тасеевский Уярский	0.20 0.36 0.55 0.31 0.17 0.33 0.59 0.62 0.34 0.68 0.65
Западный (11)	0.32	Ачинский Балахтинский Бирюлуский Боготольский Большеулуйский Козульский Назаровский Новоселовский Тюхтетский Ужурский Шарыповский	0.35 0.45 0.21 0.59 0.29 0.27 -0.02 0.18 0.42 0.31 0.01
Южный (7)	0.22	Ермаковский Идринский Каратузский Краснотуренский Курагинский Минусинский Шушенский	0.06 0.61 0.32 0.21 0.28 0.05 0.22
Западное Приангарье (5)	0.34	Енисейский Казачинский Мотыгинский Пировский Северо-Енисейский	0.22 0.50 0.34 0.44 0.45
Восточное Прианга- рье (2)	0.32	Богучанский Кежемский	0.37 -0.14
Северный (3)	<i>0.19</i>	Таймырский Туруханский Эвенкийский	0.11 0.10 -0.27

* Курсивом выделены статистически незначимые КК при $\alpha = 0.05$.

были разделены на 5 групп по периодам их возникновения. В первую группу вошло 48 сел и деревень, возникших в начальный период освоения края – в XVII в. Большинство из этих сел расположено по левому берегу Енисея, в его среднем течении (от Красноярска до Ярцево), а также в Нижнем Приангарье. Ко второй группе относятся деревни и села, возникшие в XVIII в., когда пушной промысел как главный вид занятий русских переселенцев сменился хлебопашеством. Удалось выявить 84 СНП, основанных в этот период в лесостепной части региона, преимущественно в Минусинском, Назаровском, Сухобузимском и Канском районах. Села и деревни, возникшие с 1801 по 1880 гг., отнесены к третьей группе. Большинство из 82 СНП, относящихся к этой группе, расположено в Минусинской котловине (35 – Ермаковский, Карагатуский, Курагинский, Минусинский, Шушенский районы) и в Назаровском районе (9) (рис. 6–8). На конец XIX–начало XX вв., ознаменовавшиеся для Сибири и Дальнего Востока проведением активной переселенческой политики, приходится наибольшее количество сел и деревень, основанных на территории Красноярского края [15]. Из 174 СНП, чье возникновение зафиксировано в период 1881–1917 гг., 105 приходится на Восточный субрегион (в основном это Абанский, Канский и Саянский районы). К последней, пятой группе, относятся населенные пункты, основанные в советский период (1917–1991 гг.). Для 131 выявленного СНП советского периода характерно более равномерное размещение по территории региона. Это связано с тем, что наряду с крестьянской колонизацией, еще продолжавшейся в 1920–1950-е гг., в таежной и лесостепной частях Красноярского края в этот же период началось создание и несельскохозяйственных сельских поселений – поселков лесозаготовителей, золотодобытчиков, а также переводимых на оседлый образ жизни, ранее кочевавших по тайге и тундре эвенков, кетов, долган и нганасан.

Сопоставление скорости изменения людности СНП Красноярского края и периода их основания позволило выявить определенные закономерности. Так, если в среднем по 519 рассматриваемым СНП численность населения за 1989–2010 гг. сократилась на 22%, то для сел и деревень, основанных в XVIII в., данный показатель составил 14.3%. При этом для СНП, возникших в наиболее ранний период освоения региона (XVII в.), характерна наибольшая людность, в среднем – 1562 человека. Но эти же населенные пункты, основанные преимущественно в таежной и лесотундровой зонах, отличаются и максимальными темпами сокращения численности населения: за 1989–2010 гг. оно уменьшилось в среднем на 29.2%. Высокая скорость депопуляции (27% в рассматриваемый период) характерна и для СНП, образованных в советскую эпоху. В то же время, для населенных пунктов, основанных в XIX–начале XX вв., наблюдаются существенные различия в динамике численности населения. Так, если для СНП, возникших в 1801–1880 гг., суммарная численность населения между переписями 1989 и 2010 гг. сократилась лишь на 16.3%, то для сел и деревень, организованных в период проведения активной переселенческой политики (1881–1917 гг.), количество сельских жителей уменьшилось на 21.7%. Группа СНП, возникших в этот исторический период, оказалась одной из наименее устойчивых в демографическом отношении в период постсоветской трансформации системы сельского расселения Красноярского края (табл. 3).

ПРИУРОЧЕННОСТЬ СЕЛЬСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ К ТИПАМ ЛАНДШАФТОВ

Территория Красноярского края расположена в пределах нескольких ландшафтных зон, в которых на различной литогенной основе и формах рельефа сформированы различные виды ландшафтов. С помощью наложения СНП края на ландшафтную карту СССР масштаба 1 : 4 000 000 было определено расположение сельских населенных пунктов в конкретных видах ландшафтов. В соответствии с классификацией, разработанной под руководством А.Г. Исаченко [17], в пределах Красноярского края бы-

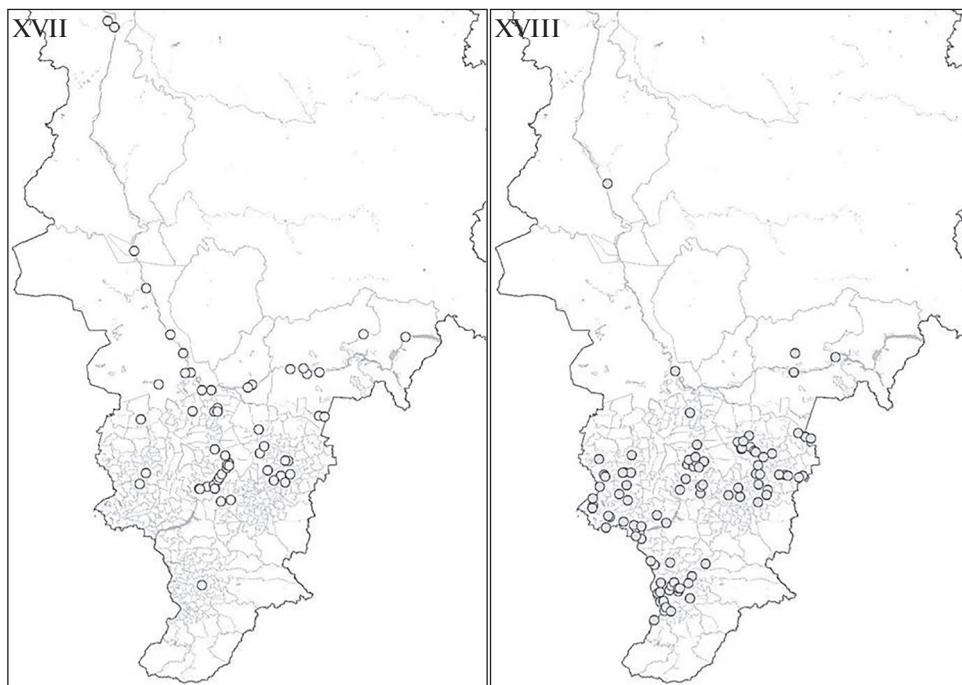


Рис. 6. Сельские населенные пункты Красноярского края, возникшие в XVII–XVIII вв. (составлено авторами по данным Росстата [34]).

Fig. 6. Rural settlements of Krasnoyarsk region, founded in XVII–XVIII centuries (compiled by the authors using Rosstat data [34]).

Таблица 3. Динамика численности сельских населенных пунктов Красноярского края по времени их основания (составлено авторами)

Table 3. Dynamics of the number of rural settlements of the Krasnoyarsk region by the time of their foundation (compiled by authors)

Период основания	Количество СНП	Средняя людность (2010 г.), чел.	Динамика численности населения в 1989–2010 гг., % к показателю 1989 г.
XVII век	48	1568	70.8
XVIII век	84	1145	85.7
1801–1880	82	726	83.7
1881–1917	174	373	78.3
1918–1991	131	449	73.0
Всего	519	683	78.3

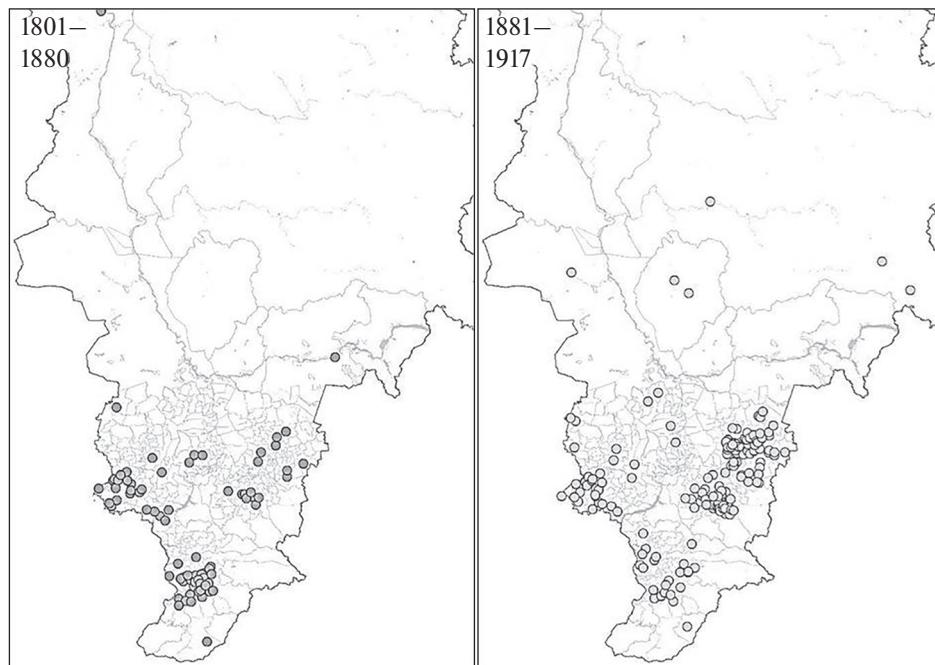


Рис. 7. Сельские населенные пункты Красноярского края, возникшие в XIX–начале XX вв. (составлено авторами по данным Росстата [34]).

Fig. 7. Rural settlements of Krasnoyarsk region, founded in XIX and beginning of XX century (compiled by the authors using Rosstat data [34]).

ло выделено 110 видов ландшафтов, относящихся к 14 зонально-секторным типам, пяти высотным ярусам и 29 видовым группам (табл. 4). Несмотря на большое разнообразие имеющихся на территории региона видов ландшафтов, сельские населенные пункты расположены только в 68 из них. При этом на пять видов ландшафтов приходится 52% всех СНП Красноярского края и более половины сельского населения региона (табл. 5).

Больше всего сельских населенных пунктов расположено в ландшафтах возвышенных равнин, относящихся к западносибирским лесостепным (41.3% от всех СНП Красноярского края), а также к восточносибирским южнотаежным и подтаежным (10.4%) и западносибирским подтаежным (9.6%) типам. Естественно, что большинство СНП Красноярского края находится в ландшафтных зонах, наиболее благоприятных для ведения сельского хозяйства. Но обращает на себя внимание тот факт, что при всем разнообразии вариантов подстилающей поверхности, почти 3/4 всех сельских населенных пунктов региона расположено только в трех видовых группах возвышенных равнин: эрозионных лессовых (324 СНП), эрозионных пластовых на кайнозойских или мезозойских песчано-глинистых отложениях (370) и эрозионно-денудационных цокольных на палеозойских осадочных, эфузивных и интрузивных породах (259), и в одной видовой группе низменных платформенных равнин – древнеаллювиальных, озерно-аллювиальных и озерных глинистых и суглинистых (139 СНП) (см. табл. 5).

Для оценки возможной связи динамики численности населения СНП Красноярского края с видом ландшафтов, в которых они расположены, были рассмотрены виды ландшафтов, в пределах каждого из которых размещено более 40 населенных пунк-

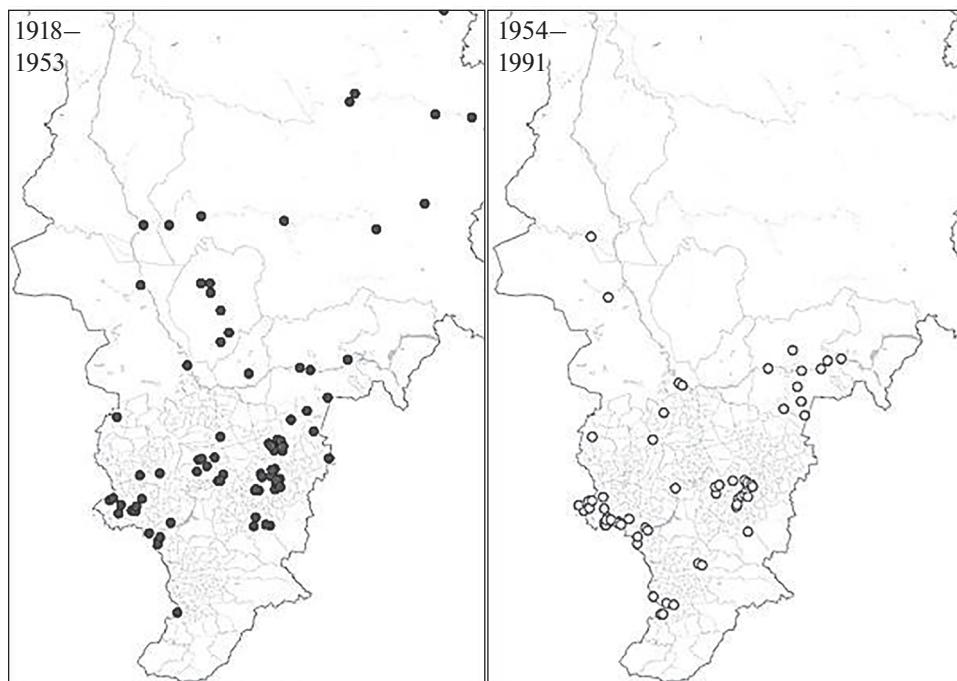


Рис. 8. Сельские населенные пункты Красноярского края, возникшие в советский период (составлено авторами по данным Росстата [34]).

Fig. 8. Rural settlements of Krasnoyarsk region, founded in Soviet period (compiled by the authors using Rosstat data [34]).

тов⁹. Таких видов ландшафтов набралось 12. Они включают 78% от общего количества СНП региона и 72% сельского населения региона и относятся к лесостепной, южнотаежной и подтаежной зонам (см. табл. 5).

Во всех рассматриваемых ландшафтах численность сельского населения в период 1989–2010 гг. сократилась, но скорость депопуляции варьировалась в широком диапазоне. Наименьшее сокращение численности (от 6 до 21%) характерно для лесостепных ландшафтов. Среди ландшафтов бореальной зоны наиболее устойчивыми оказались СНП, расположенные на лесовых и пластовых возвышенных эрозионных равнинах западносибирского подтаежного типа. В СНП Красноярского края, находящихся на низменных равнинах восточносибирского и западносибирского южнотаежных типов, сокращение численности населения было максимальным (31–39%) (см. табл. 5). Обращает на себя внимание то, что в ландшафтах с наименьшей убылью численности населения СНП имеют наибольшую плотность.

Для снижения фактора зависимости динамики людности СНП Красноярского края от близости к субрегиональному/региональному центру из рассмотрения были исключены населенные пункты, расположенные в зоне часовой доступности автомобильным и/или железнодорожным транспортом от Красноярска, Ачинска, Канска, Минусинска и Лесосибирска. Распределение оставшихся 1220 СНП по группам ланд-

⁹ Виды ландшафтов с меньшим количеством СНП не рассматривались в связи с большой вероятностью влияния случайных факторов.

Таблица 4. Виды ландшафтов Красноярского края (по [17])
Table 4. Types of landscape of Krasnoyarsk region (according [17])

Зональная группа	Зонально-секторный тип	Высотный ярус	Видовые группы ландшафтов
Арктические (I)*	Полярнопустынные (1)	Низменные (а)	Аккумулятивно-морские четвертичные песчаные и песчано-глинистые (01)
Субарктические (II)	Арктоундровые (2)	Возвышенные (б)	Древнеаллювиальные, озерно-аллювиальные и озерные глинистые и суглинистые (03)
Бореальные (III)	Сибирские тундровые типичные (1)	Низкогорные (в)	Древнеаллювиальные (04)
Суб boreальные северные (IV)	Сибирские тундровые южные (2)	Среднегорные (г)	Древнеаллювиальные, древнедельтовые, аллювиально-зандровые песчаные (04)
Суббореальные типичные (V)	Сибирские лесотундровые (3)	Высокогорные (д)	Эоловые (05)
	Западносибирские северотаежные (1)		Озерно-ледниковые песчаные (07)
	Восточносибирские среднетаежные (2)		Озерно-аллювиальные и аллювиальные с покровом лессов или леско-видных суглинков, местами эоловально-дельвиальные ("сыртвые") (08)
	Западносибирские среднетаежные (3)		Моренные в области верхнечетвертичного оледенения (10)
	Восточносибирские южнотаежные и полтаежные (5)		Зандровые (местами возвышенные) (15)
	Восточносибирские южнотаежные и полтаежные (6)		Моренные, моренно-эрозионные, ледово-морские в области среднечетвертичного оледенения, часто с покровными суглинками и супесями (17)
	Западносибирские подтаежные (7)		Холмистые моренные участками камов в области верхнечетвертичного оледенения, частично на известняковом пластовом основании (18)
	Западносибирские лесостепные (1)		Полого-холмистые моренные и ледово-морские в области среднечетвертичного оледенения часто с покровными суглинками (19)
	Центральноазиатские степные и сухостепные с фрагментами полупустынь (1)		Эрозионные лесовые (20)
			Эрозионные пластовые на кайнозойских или мезозойских песчано-глинистых отложениях (22)
			Эрозионно-денудационные цокольные на палеозойских осадочных, эффеузивных и интрузивных породах (29)
			Кряжи на дислокированных палеозойских и протерозойских породах (31)

Таблица 4. Окончание

Зональная группа	Зонально-секторный тип	Высотный ярус	Видовые группы ландшафтов
			Докембрийские шиты, местами с грядами и глыбовыми холмогорьми, ледниковой обработкой (32)
		На триасовой тuffогенно-осадочной толще (33)	
		На верхнепалеозойских терригенных породах (34)	
		На нижнепалеозойских молассоидных и терригенных породах (35)	
		На нижнепалеозойских территенно-карбонатных и карбонатных породах (36)	
		На траппах (37)	
		На древних мезозойских лавах (38)	
		Наклонные подгорные аллювиальные, проливильные, делювиальные (местами лессовые) (39)	
		Высокие тряждово-увалистые на палеозойских осадочных, эфузивных и интрузивных породах, местами с лессовидными суплинками (44)	
		Холмистые на палеозойских и мезозойских складчатых структурах с ледниковой и волно-ледниковой аккумуляцией (45)	
		Складчатые и складчато-глыбовые на мезозойских и палеозойских карбонатных породах (51)	
		Складчато-глыбовые на герцинских и калеонских структурах, сложенных сильноцементированными и метаморфизированными осадочными, эфузивными и интрузивными породами (52)	
		Складчатые и складчато-глыбовые на докембрийских, палеозойских, редже мезозойских, структурах, сложенных метаморфизованными породами и интрузиями (преимущественно кислыми) (53)	
		Вулканические нагорья и хребты, сложенные неогеновыми и четвертичными лавами и туфами (54)	

* В скобках буквенные и цифровые индексы, присвоенные для колификации.

Таблица 5. Распределение сельских населенных пунктов по видам ландшафтов Красноярского края (составлено авторами по [17])
Table 5. Distribution of rural settlements by types of landscapes of the Krasnoyarsk region (compiled by the authors using [17])

Ландшафты				Коли-чество СНП	Числен-ность населения в 2010 г., тыс. чел.	Средняя плотность, чел. (2010 г.)	все СНП	Динамика численности 1989–2010 гг. (% к 1989 г.)
зональная группа	зонально-секторный тип	высотный ярус	видовые группы	код вида ландшафта	СНП за пределами часовой доступности			
Бореаль-ные	Западносибир-ский южнотаеж-ный	Низменные	Древнеаллювиальные, озерно-аллювиальные и озерные глинистые и сульнистые	III.5.А.03	73	15.3	210	61.2
		Возвышенные	Эрозионные пластовые на кайнозойских или мезозойских песчано-глинистых отложениях	III.5.Б.22	62	17.3	279	62.4
	Восточносибир-ский южнотаеж-ный и подтаеж-ный	Низменные	Древнеаллювиальные, озерно-аллювиальные и озерные глинистые и сульнистые	III.6.А.03	66	18.9	286	68.6
		Возвышенные	Эрозионные лесовые	III.6.Б.20	49	22.5	450	79.2
		Возвышенные	Эрозионные пластовые на кайнозойских или мезозойских песчано-глинистых отложениях	III.6.Б.22	64	15.8	247	63.7
Западносибир-ский полтаеж-ный		Возвышенные	Эрозионные лесовые	III.7.Б.20	95	30.0	316	76.3
		Возвышенные	Эрозионные пластовые на кайнозойских или мезозойских песчано-глинистых отложениях	III.7.Б.22	60	19.8	330	72.7

Таблица 5. Окончание

Ландшафты						Динамика численности 1989–2010 гг. (% к 1989 г.)	
Зональная группа	Зонально-секторный тип	Высотный ярус	Видовые группы	Количество СНП	Численность населения в 2010 г., тыс. чел.	Средняя плотность, чел. (2010 г.)	СНП за пределами часовой доступности
Зональные группы	Западносибирский лесостепной	Возвышенные	Эрозионные лесовые	IV.1.Б.20	172	70.2	408
		Возвышенные	Эрозионные пластовые на кайнозойских или мезозойских тесчано-глинистых отложениях	IV.1.Б.22	184	77.9	423
		Возвышенные	Эрозионно-денудационные цокольные на палеозойских осадочных, эфрузивных и интрузивных породах	IV.1.Б.29	259	101.0	390
		Возвышенные	Наклонные подгорные аллювиальные, пролювиальные, делювиальные (местами лессовые)	IV.1.Б.39	43	27.3	634
	Низкогорные		Складчато-глыбовые на герцинских и каледонских структурах, сложенных сильносцепментированными и метаморфизированными осадочными, эфузивными и интрузивными породами	IV.1.Б.52	124	39.9	322
					1610	632.2	393
						772	73.4

В целом по Красноярскому краю

шафтов показало несколько иную их устойчивость к процессам депопуляции, нежели для всей совокупности СНП края. Для селений, расположенных в 7 из 12 рассматриваемых видов ландшафтов (III.5.А.03; III.5.Б.22; III.6.А.03; III.7.Б.20; IV.1.Б.20; IV.1.Б.29; IV.1.Б.39), разница в скорости депопуляции в 1989–2019 гг. между всеми СНП и СНП, расположенными за пределами часовой доступности от крупнейших городов края, составила менее 3 процентных пунктов. В то же время, для остальных 5 видов ландшафтов (III.6.Б.20; III.6.Б.22; III.7.Б.22; IV.1.Б.22; IV.1.Б.52) итоговый показатель снизился более чем на 5 процентных пунктов (см. табл. 5). В результате мы имеем следующую последовательность ландшафтов по мере возрастания темпов депопуляции СНП региона: IV.1.Б.39 – IV.1.Б.29 – IV.1.Б.22 – IV.1.Б.20 – III.6.Б.20 – III.7.Б.20 – III.6.А.03 – III.7.Б.22 – IV.1.Б.52 – III.5.А.03 – III.5.Б.22 – III.6.Б.22 (см. табл. 5).

Таким образом, наиболее устойчивыми в демографическом отношении сельскими населенными пунктами Красноярского края являются селения, расположенные на возвышенных равнинах западносибирского лесостепного типа.

Рассматривая вопрос о соотношении возраста СНП Красноярского края и ландшафтов, в которых они возникли, можно отметить наличие некоторых закономерностей. Если для селений, основанных в XVII в., на раннем этапе освоения территории края, характерно довольно равномерное распределение по наиболее населенным ландшафтам, то СНП, возникшие в 1801–1880 гг., имеют значительную концентрацию в четырех из них. Почти 2/3 СНП, основанных в данный исторический период, расположены на возвышенных равнинах западносибирского лесостепного типа в следующих видовых группах: эрозионные лессовые (IV.1.Б.20), эрозионные пластовые на кайнозойских или мезозойских песчано-глинистых отложениях (IV.1.Б.22), эрозионно-денудационные цокольные на палеозойских осадочных, эффузивных и интрузивных породах (IV.1.Б.29) и наклонные подгорные аллювиальные, пролювиальные, делювиальные (*местами лессовые*) (IV.1.Б.39). Концентрация СНП, основанных в 1801–1880 гг., в этих четырех видах ландшафтов, в 1.6 раза выше, чем для всей совокупности сельских населенных пунктов Красноярского края (рис. 9)¹⁰. При этом 22% всех СНП, основанных в этот период, относятся к *наклонным подгорным аллювиальным, пролювиальным, делювиальным (местами лессовым)* ландшафтам, превышая долю всех селений, расположенных в этом виде ландшафтов (2.7%), более чем в 8 раз!

Среди групп селений, возникших в другие исторические периоды, распределение СНП по ландшафтам, в целом, не сильно отличается от общего распределения для населенных пунктов Красноярского края. Более чем двукратная положительная “избирательность” наблюдается лишь для сел и деревень, возникших в конце XIX–начале XX вв. (1881–1917 гг.) на возвышенных эрозионных пластовых равнинах на кайнозойских или мезозойских песчано-глинистых отложениях восточносибирского южно-таежного и подтаежного типа (III.6.Б.22). Если в целом по региону в данном виде ландшафтов размещается лишь 4% от общего количества СНП, то для селений, основанных в 1881–1917 гг., данный показатель составляет 8.6%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Депопуляция сельского населения Красноярского края, начавшаяся еще в советский период, продолжилась и в конце ХХ–начале ХХI вв. За 1989–2010 гг. численность сельского населения региона, несмотря на административные преобразования (перевод ряда поселков городского типа в разряд СНП), сократилась на 18.5%. На основе проведенного анализа связи между скоростью депопуляции сельских населен-

¹⁰ Столбцы на рис. 9 соответствуют общему количеству СНП Красноярского края, основанных в тот или иной исторический период. Цветом в каждом столбце выделена доля СНП, расположенных в определенном виде ландшафта (буквенно-цифровые коды видов ландшафтов приведены в табл. 5).

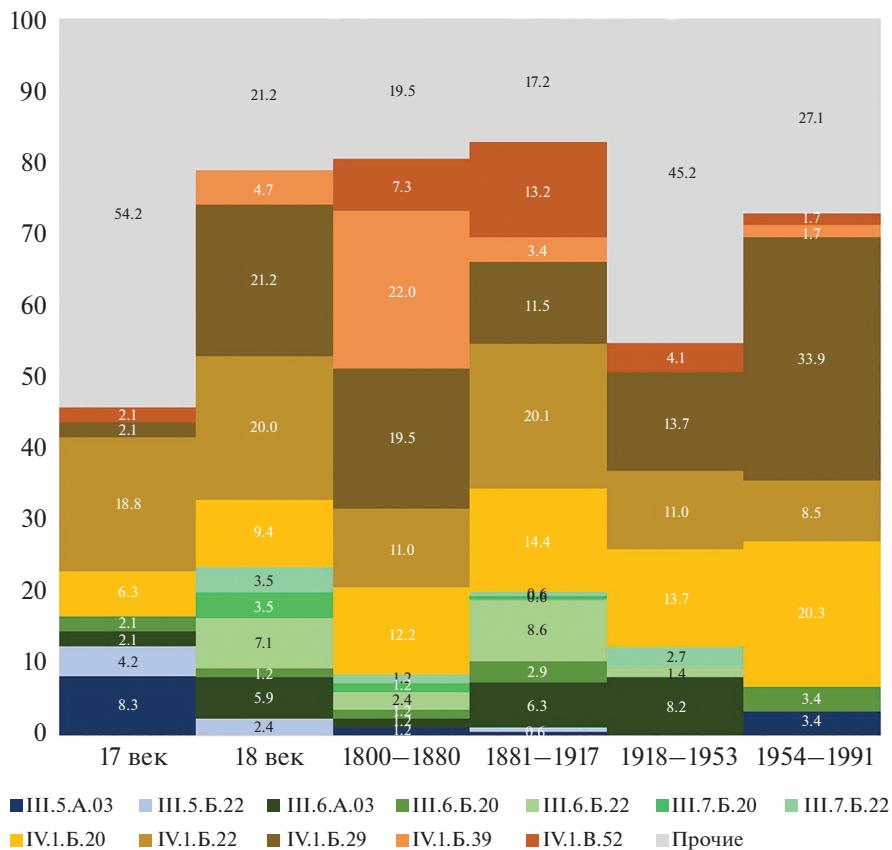


Рис. 9. Распределение сельских населенных пунктов Красноярского края по видам ландшафтов (%) и периоду основания. Составлено авторами по [17, 34]). Пояснения в тексте.

Fig. 9. Rural settlements of Krasnoyarsk region grouped by the type landscape (%) and period of foundation (compiled by the authors, based on [17, 34]). Explanations are in the text.

ных пунктов края и их удаленностью от субрегиональных и районных центров можно сделать вывод о том, что центр-периферийный градиент в обоих случаях частично присутствует. Так, коэффициенты корреляции Спирмена между темпами сокращения численности населения СНП и их транспортной доступностью в двух из пяти субрегионов Красноярского края находятся в пределах $-0.3\dots-0.5$ и позволяют предполагать наличие умеренной связи, а в Центральном субрегионе эта связь находится на уровне заметной. Для 55% муниципальных районов края существует заметная или умеренная зависимость между близостью к районному центру и динамикой людности СНП.

Предположение о том, что крупные населенные пункты более устойчивы в демографическом отношении, также частично подтвердилось на субрегиональном уровне. Так, в Восточном субрегионе характер связи между людностью СНП и скоростью их депопуляции можно охарактеризовать как умеренную (КК Спирмена = 0.43). Причем в этом же субрегионе на районном уровне отмечена заметная корреляционная связь для 45% районных систем расселения и умеренная связь для 36% систем расселения.

На региональном уровне по всему Красноярскому краю между данными показателями также выявлена умеренная связь, хотя и с низким диапазонным значением (0.34). При этом следует отметить, что внутрирайонные умеренные связи составляют 32% от общего количества в крае, а заметные – 18%, т.е. половина этих связей имеет статистическую значимость.

В целом проведенный корреляционный анализ позволяет сделать вывод, что в ряде случаев достаточно действенными факторами, влияющими на темпы изменения численности населения СНП Красноярского края, можно считать и людность населенных пунктов, и их удаленность от районаобразующих и субрегиональных центров.

В то же время, для селений региона, у которых установлена дата (период) их основания, существует зависимость между возрастом СНП и темпами их депопуляции. Наименее демографически устойчивыми поселениями оказались самые старые и самые молодые СНП. Быстрая депопуляция в последние десятилетия сел и деревень, основанных в XVII в., преимущественно в таежной и тундровой зонах, и имевших, как правило, несельскохозяйственный характер, вполне объяснима: избыточность населения российского Севера в советский период привела к массовому оттоку населения в условиях перехода к экономике рыночного типа. Те же факторы обуславливают и слабую резистентность СНП, возникших в советский период, на территориях с не самыми благоприятными природными условиями. В наименьшей степени сократилась численность сельских населенных пунктов, возникших в XVIII–первых трех четвертях XIX вв. – начальном периоде сельскохозяйственного освоения южной части Красноярского края. В ходе переселенческой политики конца XIX–начала XX вв. (1881–1917 гг.) заселение проходило уже по остаточному принципу: все самые плодородные и удобные для использования земли были заняты более ранними поселенцами. По этой причине темпы депопуляции СНП, основанных в 1881–1917 гг., были выше, чем у возникших в предшествующий период.

В ходе проведенного исследования удалось не только установить связь между размещением СНП и конкретными ландшафтами, представленными в регионе, но и выявить особенности динамики людности селений, расположенных в различных видах ландшафтов. Из 110 видов ландшафтов, выделенных на территории Красноярского края согласно ландшафтной карте СССР масштаба 1 : 4000000 [17], населенные пункты располагаются только в 68 видах, а более 3/4 всех СНП приходится на 12 из них. При всем разнообразии зонально-секторных типов и видовых групп ландшафтов региона более 90% СНП приходится всего на 4 зонально-секторных типа и 6 видовых групп ландшафтов. Наиболее устойчивыми в демографическом отношении являются СНП, расположенные на возвышенных равнинах западносибирского лесостепного типа.

Проведенный анализ депопуляции СНП Красноярского края продемонстрировал многофакторный характер процесса, в котором в разных субрегионах по-разному ранжируются природные, историко-географические и современные социально-экономические факторы, которые интерпретируются достаточно отчетливо. Их сочетание в современной ситуации Красноярского края позволяет говорить об устойчивости выявленных закономерностей и трендов в динамике людности СНП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А.И., Сафонов С.Г. Изменение сельского расселения в России в конце ХХ–начале ХХI века // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2015. № 2. С. 66–76.
2. Алексеев А.И., Сафонов С.Г. Типология сельских населенных пунктов Европейской части России в современной демографической и социально-экономической ситуации // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2017. № 6. С. 55–61.
3. Алексеев А.И., Сафонов С.Г., Савоскул М.С., Кузнецова Г.Ю. Основные тенденции эволюции сельского расселения России в ХХ–начале ХХI вв. // ЭКО. 2019. № 4(538). С. 26–49.

4. Анохин А.А., Житин Д.В., Краснов А.И., Лачининский С.С. Современные тенденции динамики численности населения городов России // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2014. № 4. С. 167–179.
5. Архипов Ю.Р. Устойчивость системы сельского расселения // Национальная ассоциация ученых. 2015. № 2–10(7). С. 130–132.
6. Безруких В.А., Быкова Г.Ф., Фёдорова В.И. Иллюстрированная история Красноярья (XVI–начало XX века). Красноярск: РАСТР, 2012. 240 с.
7. Валяев И.А., Вознесенская А.Г. Пространственный анализ поляризации системы сельских населенных пунктов Нечерноземной зоны России // Региональные исследования. 2016. № 1(51). С. 88–95.
8. Вихрёв О.В., Ткаченко А.А., Фомкина А.А. Системы сельского расселения и их центры (на примере Тверской области) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2016. № 2. С. 30–37.
9. Галин Р.А. Расселение сельского населения как фактор развития сельского хозяйства // Экономика и управление: научно-практический журн. 2015. № 5(127). С. 28–33.
10. Горбенкова Е.В. Факторы, определяющие развитие сельского расселения // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 7. С. 805–818.
11. Гунько М.С., Глазер О.Б. Малые районные центры и окружающие территории в Центральной России в 1970–2010 гг.: динамика и распределение населения // Изв. РАН. Серия географическая. 2015. № 1. С. 64–76.
12. Дементьев В.С., Клейменов С.П. Изменения в сельском расселении на территории Псковской области в начале ХХI в. Псковский регионологический журн. 2018. № 2(34). С. 40–55.
13. Егоров Д.О., Шурупина В.С. Сельское расселение России: типология территорий по плотности сельских населенных пунктов // Региональные исследования. 2018. № 4(62). С. 4–16.
14. Житин Д.В., Морачевская К.А. Опыт оценки внутренней транспортной связности муниципальных образований Красноярского края // География и природные ресурсы. 2021. № 3 (в печати).
15. Житин Д.В., Шендрек А.В. Характеристика системы сельского расселения Красноярского края // Современные тенденции пространственного развития и приоритеты общественной географии (Материалы международной научной конференции в рамках IX Ежегодной научной ассамблеи Ассоциации российских географов-обществоведов). 2018. С. 142–147.
16. Зубаревич Н.В. Трансформация сельского расселения и сети услуг в сельской местности // Изв. РАН. Серия географическая. 2013. № 3. С. 26–38.
17. Исаченко А.Г., Шляпников А.А., Робозерова О.Д., Филиппецкая А.З. Ландшафтная карта СССР (масштаб 1 : 4000000). М.: ГУГК, 1988.
18. Карбозов Т.Е., Шакенова Ж.К. Вопросы развития сельского расселения в Республике Казахстан // Путь науки. 2016. Т. 2. № 5(27). С. 64–66.
19. Ковалев С.А. Географическое изучение сельского расселения. М.: Географический ф-т МГУ им М.В. Ломоносова, 1960. 340 с.
20. Манаков А.Г., Дементьев В.С. Динамика сельского расселения Псковской области 1959–2010 гг. // Региональные исследования. 2017. № 1(55). С. 55–63.
21. Нефедова Т.Г. Основные тенденции изменения социально-экономического пространства сельской России // Изв. РАН. Серия географическая. 2012. № 3. С. 5–21.
22. Нефедова Т.Г. Факторы и тенденции изменения сельского расселения в России // Социально-экономическая география. Вестник Ассоциации российских географов-обществоведов. 2018. № 7. С. 1–12.
23. Нефедова Т.Г. Развитие постсоветского аграрного сектора и поляризация сельского пространства Европейской части России // Пространственная экономика. 2019. Т. 15. № 4. С. 36–56.
24. Петрищев В.П., Черкасова Ю.В., Косых П.А. Историко-географические аспекты формирования системы сельского расселения в Оренбургской области // Проблемы региональной экологии. 2016. № 5. С. 140–145.
25. Руднева О.С., Соколов А.А. Структурная эволюция сети сельского расселения в регионах степной зоны России // Russian economic bulletin. 2019. Т. 2. № 6. С. 280–285.
26. Схема территориального планирования Красноярского края. Основные направления территориального планирования. ФГУП Российской государственный НИИ Урбанистики. СПб., 2008.
27. Ткаченко А.А., Смирнов И.П., Смирнова А.А. Трансформация сети центров сельского расселения в низовом районе Центральной России // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2019. № 2. С. 78–85.
28. Уставщикова С.В. Основные черты трансформации сельского расселения Саратовской области в 1959–2015 гг. // Изв. Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2016. Т. 16. № 2. С. 86–92.

29. Фомкина А.А. Трансформация сельских систем расселения в староосвоенном Нечерноземье с конца XIX до начала XXI в. // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2017. № 5. С. 68–75.
30. Хаиров Р.А. Трансформация системы сельского расселения Новгородской области со второй половины XX века по начало XXI века // Псковский регионологический журн. 2018. № 2(34). С. 56–68.
31. Чугунова Н.В., Полякова Т.А. Современное сельское расселение как зеркало центр-периферийного градиента развития региона // Социально-экономическая география. Вестник Ассоциации российских географов-обществоведов. 2015. № 4. С. 114–124.
32. Шелудков А.В., Орлов М.А. Топология сети населенных пунктов как фактор динамики сельского расселения (на примере Тюменской области) // Изв. РАН. Серия географическая. 2019. № 4. С. 46–62.
33. Яворська В.В., Калетинська А.Е. Методологічні аспекти історико-географичного дослідження населення // Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки. 2012. Т. 1. № 2(15). С. 116–120.
34. Федеральная служба государственной статистики: <https://rosstat.gov.ru/>
35. Bätzing W., Perlik M., Dekleva M. Urbanization and depopulation in the Alps // Mountain Research and Development. 1996. V. 16. Iss. 4. P. 335–350.
36. Bender O., Kanitscheider S. New immigration into the European Alps: Emerging research issues // Mountain Research and Development. 2021. V. 32. Iss. 2. P. 235–241.
37. Brooks M.M. Countering Depopulation in Kansas: An Assessment of the Rural Opportunity Zone Program // Population Research and Policy Review. 2021. V. 40. Iss. 2. P. 137–148.
38. Collantes F., Pinilla V. Extreme depopulation in the Spanish rural mountain areas: A case study of Aragon in the nineteenth and twentieth centuries // Rural History. 2004. V. 15. Iss. 2. P. 149–166.
39. Collantes F., Pinilla V. Reducing depopulation in rural Spain: The impact of immigration // Population, Space and Place. 2014. V. 20. Iss. 7. P. 606–621.
40. Ilcsikné Makra Z., Bajmócy P., Balogh A. Villages on the edge of extinction: The Hungarian situation // J. Settlements and Spatial Planning. 2018. V. 9. Iss. 1. P. 35–45.
41. Johnson K.M., Lichter D.T. Rural Depopulation: Growth and Decline Processes over the Past Century // Rural Sociology. 2019. V. 84. Iss. 1. P. 3–27.
42. MacDonald D., Crabtree J.R., Wiesinger G., Dax T., Stamou N., Fleury P., Gutierrez Lazpita J., Gibon A. Agricultural abandonment in mountain areas of Europe: Environmental consequences and policy response // J. Environmental Management. 2000. V. 59. Iss. 1. P. 47–69.
43. Mladenov C., Ilieva M. The depopulation of the Bulgarian villages // Bulletin of Geography. 2012. V. 17. P. 99–107.
44. Nickels C.R., Day F.A. Depopulation of the rural Great Plains counties of Texas // Great Plains Research. 1997. V. 7. Iss. 2. P. 225–250.
45. Niedomysl T., Amcoff J. Is There Hidden Potential for Rural Population Growth in Sweden? // Rural Sociology. 2011. V. 76. Iss. 2. P. 257–279.
46. Rye J.F. Leaving the countryside: An analysis of rural-to-Urban migration and long-term capital accumulation // Acta Sociologica. 2006. V. 49. Iss. 1. P. 47–65.
47. Serra P., Vera A., Tulla A.F., Salvati L. Beyond urban-rural dichotomy: Exploring socioeconomic and land-use processes of change in Spain (1991–2011) // Applied Geography. 2014. V. 55. P. 71–81.
48. Steinicke E., Čede P., Löffler R. In-migration as a new process in demographic problem areas of the Alps. Ghost towns vs. Amenity settlements in the Alpine border area between Italy and Slovenia // Erdkunde. 2012. V. 66. Iss. 4. P. 329–344.
49. Steinicke E., Čede P., Löffler R., Jelen I. “Newcomers” in the Alpine peripheral regions. A case study in the Julian Alps (Italy and Slovenia) // Rivista Geografica Italiana. 2014. V. 121. Iss. 1. P. 1–20.
50. Stockdale A. Out-migration from rural Scotland: The importance of family and social networks // Sociologia Ruralis. 2002. V. 42. Iss. 1. P. 41–64.
51. Stockdale A. Migration: Pre-requisite for rural economic regeneration? // J. Rural Studies. 2006. V. 22. Iss. 3. P. 354–366.
52. Stockdale A. Contemporary and ‘Messy’ Rural In-migration Processes: Comparing Counterurban and Lateral Rural Migration // Population, Space and Place. 2016. V. 22. Iss. 6. P. 599–616.
53. Viñas C.D. Depopulation processes in European Rural Areas: A case study of Cantabria (Spain) // European Countryside. 2019. V. 11. Iss. 3. P. 341–369.
54. Wojewo'dzka-Wiewo'rska A. Depopulation in rural areas in Poland – Socio-economic local perspective // Research for Rural Development. 2019. V. 2. P. 126–132.

Influence of Natural-Geographic and Historical-Demographic Factors on Rural Population Dynamics of Krasnoyarsk Region

D. V. Zhitin^{1,*}, Yu. N. Kurochkin^{1,**}, K. V. Chistyakov^{1,***}, and A. V. Shendrik^{1,****}

¹Saint-Petersburg state university, Saint-Petersburg, Russia

*E-mail: zhitin_dv@mail.ru

**E-mail: y.kurochkin@spbu.ru

***E-mail: k.chistyakov@spbu.ru

****E-mail: shen@mail.ru

The article examines the influence of various natural-geographical and historical-demographic factors on rural population dynamics of Krasnoyarsk region. Considering the area size, the variety of climatic and socio-economic conditions, the nature of demographic processes, this region could serve as a model territory for studying the transformation processes of rural settlement system in Russia. The paper highlights the main historical stages of settling and formation of regional settlement system since 17th century. For modern period, from 1989 to 2020 years, rural population dynamics is investigated in depth at different scales: region – subregion – district – settlement. Original author's population maps are attached. Among the main factors that determine rural population dynamics and rural settlements stability, the authors select four key indicators for detailed analysis: 1) distance from rural settlement to district center or sub-regional center; 2) population size of settlement; 3) age of settlement (date of foundation); 4) type of landscape where the settlement is located. The results confirm the influence of all these factors on the rate of rural settlements depopulation; however, the importance of these factors varies in certain subregions and districts. The distance factor is most significant in the Central subregion. The population size of settlement is a significant factor in the East, but loses its importance in the Central, South and North subregions. Analysis of the age of settlement and the type of landscape made it possible to highlight the most stable rural settlements – those that were founded in the 18th century in forest-steppe landscapes.

Keywords: history of development, settlement system, rural population, rural settlement, population dynamics, depopulation, center-periphery gradient, landscape

REFERENCES

1. Alekseev A.I., Safronov S.G. Izmenenie sel'skogo rasseleniya v Rossii v konce XX–nachale XXI veka // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. 2015. № 2. S. 66–76.
2. Alekseev A.I., Safronov S.G. Tipologiya sel'skih naselennyh punktov Evropejskoj chasti Rossii v sovremennoj demograficheskoy i social'no-ekonomicheskoy situacii // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. 2017. № 6. S. 55–61.
3. Alekseev A.I., Safronov S.G., Savoskul M.S., Kuzneczova G.Yu. Osnovnye tendencii evolyuciis sel'skogo rasseleniya Rossii v XX–nachale XXI vv. // EKO. 2019. № 4(538). S. 26–49.
4. Anohin A.A., Zhitin D.V., Krasnov A.I., Lachininskij S.S. Sovremennye tendencii dinamiki chislennosti naseleniya gorodov Rossii // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya. 2014. № 4. S. 167–179.
5. Arhipov Yu.R. Ustojchivost' sistemy sel'skogo rasseleniya // Nacional'naya associaciya uchenyh. 2015. № 2–10(7). S. 130–132.
6. Bezrukih V.A., Bykonya G.F., Fyodorova V.I. Illyustrirovannaya istoriya Krasnoyaryya (XVI–nachalo XX veka). Krasnoyarsk: RASTR, 2012. 240 s.
7. Valyaev I.A., Voznesenskaya A.G. Prostranstvennyj analiz poliarizacii sistemy seskih naselennyh punktov Nechernozemnoj zony Rossii // Regional'nye issledovaniya. 2016. № 1(51). S. 88–95.
8. Vixryov O.V., Tkachenko A.A., Fomkina A.A. Sistemy sel'skogo rasseleniya i ih centry (na primere Tverskoj oblasti) // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. 2016. № 2. S. 30–37.
9. Galin R.A. Rasselenie sel'skogo naseleniya kak faktor razvitiya sel'skogo hozyajstva // Ekonomika i upravlenie: nauchno-prakticheskij zhurnal. 2015. № 5(127). S. 28–33.
10. Gorbenkova E.V. Faktory, opredelyayushchie razvitiye sel'skogo rasseleniya // Vestnik MGSU. 2019. V. 14. № 7. S. 805–818.

11. *Gun'ko M.S., Glezer O.B.* Malye rajonnye centry i okruzhayushchie territorii v Central'noj Rossii v 1970–2010 gg.: dinamika i raspredelenie naseleniya // Izv. RAN. Seriya geograficheskaya. 2015. № 1. S. 64–76.
12. *Dement'ev V.S., Klejmenov S.P.* Izmeneniya v sel'skom rasselenii na territorii Pskovskoj oblasti v nachale XXI veka. Pskovskij regionologicheskij zhurn. 2018. № 2(34). S. 40–55.
13. *Egorov D.O., Shurupina V.S.* Sel'skoe rasselenie Rossii: tipologiya territorij po lyudnosti sel'skih naselennyh punktov // Regional'nye issledovaniya. 2018. № 4(62). S. 4–16.
14. *Zhitin D.V., Morachevskaya K.A.* Opyt ocenki vnutrennej transportnoj svyaznosti municipal'nyh obrazovanij Krasnoyarskogo kraja // Geografiya i prirodyne resursy. 2021. № 3 (v pechati).
15. *Zhitin D.V., Shendrik A.V.* Xarakteristika sistemy sel'skogo rasseleniya Krasnoyarskogo kraja // Sovremennye tendencii prostranstvennogo razvitiya i prioritety obshhestvennoj geografii (Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii v ramkah IX Ezhegodnoj nauchnoj assamblei Asociacii rossijskikh geografov-obshhestvovedov). 2018. S. 142–147.
16. *Zubarevich N.V.* Transformaciya sel'skogo rasseleniya i seti uslug v sel'skoj mestnosti // Izv. RAN. Seriya geograficheskaya. 2013. № 3. S. 26–38.
17. *Isachenko A.G., Shlyapnikov A.A., Robozerova O.D., Filipeczkaya A.Z.* Landshaftnaya karta SSSR (masshtab 1 : 4000 000). M.: GUGK, 1988.
18. *Karbozov T.E., Shakenova Zh.K.* Voprosy razvitiya sel'skogo rasseleniya v Respublike Kazahstan // Put' nauki. 2016. T. 2. № 5(27). S. 64–66.
19. *Kovalev S.A.* Geograficheskoe izuchenie sel'skogo rasseleniya. M.: Geograficheskij f-t MGU im M.V. Lomonosova, 1960. 340 s.
20. *Manakov A.G., Dement'ev V.S.* Dinamika sel'skogo rasseleniya Pskovskoj oblasti 1959–2010 gg. // Regional'nye issledovaniya. 2017. № 1(55). S. 55–63.
21. *Nefedova T.G.* Osnovnye tendencii izmeneniya social'no-ekonomiceskogo prostranstva sel'skoj Rossii // Izv. RAN. Seriya geograficheskaya. 2012. № 3. S. 5–21.
22. *Nefedova T.G.* Faktory i tendencii izmeneniya sel'skogo rasseleniya v Rossii // Social'no-ekonomiceskaya geografiya. Vestnik Asociacii rossijskikh geografov-obshhestvovedov. 2018. № 7. S. 1–12.
23. *Nefedova T.G.* Razvitie postsovetskogo agrarnogo sektora i polyarizaciya sel'skogo prostranstva Evropejskoj chasti Rossii // Prostranstvennaya ekonomika. 2019. V. 15. № 4. S. 36–56.
24. *Petrishhev V.P., Cherkasova Yu.V., Kosyx P.A.* Istoriko-geograficheskie aspekty formirovaniya sistemy sel'skogo rasseleniya v Orenburgskoj oblasti // Problemy regional'noj ekologii. 2016. № 5. S. 140–145.
25. *Rudneva O.S., Sokolov A.A.* Strukturnaya evolyuciya seti sel'skogo rasseleniya v regionah stepnoj zony Rossii // Russian economic bulletin. 2019. V. 2. № 6. S. 280–285.
26. Shema territorial'nogo planirovaniya Krasnoyarskogo kraja. Osnovnye napravleniya territorial'nogo planirovaniya. SPb.: FGUP Rossijskij gosudarstvennyj NII Urbanistiki, 2008.
27. *Tkachenko A.A., Smirnov I.P., Smirnova A.A.* Transformaciya seti centrov sel'skogo rasseleniya v nizovom rajone Central'noj Rossii // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. 2019. № 2. S. 78–85.
28. *Ustavshikova S.V.* Osnovnye cherty transformacii sel'skogo rasseleniya Saratovskoj oblasti v 1959–2015 godax // Izv. Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Nauki o Zemle. 2016. V. 16. № 2. S. 86–92.
29. *Fomkina A.A.* Transformaciya sel'skih sistem rasseleniya v staroosvoennom Nechernozem'e s koncza XIX do nachala XXI v. // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. 2017. № 5. S. 68–75.
30. *Xairov R.A.* Transformaciya sistemy sel'skogo rasseleniya Novgorodskoj oblasti so vtoroj poloviny XX veka po nachalo XXI veka // Pskovskij regionologicheskij zhurn. 2018. № 2(34). S. 56–68.
31. *Chugunova N.V., Polyakova T.A.* Sovremennoe sel'skoe rasselenie kak zerkalo centr-periferijnogo gradienta razvitiya regiona // Social'no-ekonomiceskaya geografiya. Vestnik Asociacii rossijskikh geografov-obshhestvovedov. 2015. № 4. S. 114–124.
32. *Sheludkov A.V., Orlov M.A.* Topologiya seti naselennyx punktov kak faktor dinamiki sel'skogo rasseleniya (na primere Tyumenskoj oblasti) // Izv. RAN. Seriya geograficheskaya. 2019. № 4. S. 46–62.
33. *Yavor'skaya V.V., Kaledinskaya A.E.* Metodologicheskie aspekty istoriko-geograficheskogo izuchenija rasseleniya naseleniya // Visnik Odess'kogo naciona'l'nogo universitetu. Geografichni ta geologichni nauki. 2012. V. 1. № 2(15). S. 116–120.
34. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki: <https://rosstat.gov.ru/>
35. *Bätzing W., Perlk M., Dekleva M.* Urbanization and depopulation in the Alps // Mountain Research and Development. 1996. V. 16. Iss. 4. P. 335–350.
36. *Bender O., Kanitscheider S.* New immigration into the European Alps: Emerging research issues // Mountain Research and Development. 2021. V. 32. Iss. 2. P. 235–241.
37. *Brooks M.M.* Counteracting Depopulation in Kansas: An Assessment of the Rural Opportunity Zone Program // Population Research and Policy Review. 2021. V. 40. Iss. 2. P. 137–148.
38. *Collantes F., Pinilla V.* Extreme depopulation in the Spanish rural mountain areas: A case study of Aragon in the nineteenth and twentieth centuries // Rural History. 2004. V. 15. Iss. 2. P. 149–166.

-
39. *Collantes F., Pinilla V.* Reducing depopulation in rural Spain: The impact of immigration // Population, Space and Place. 2014. V. 20. Iss. 7. P. 606–621.
 40. *Ilsíkné Makra Z., Bajmócy P., Balogh A.* Villages on the edge of extinction: The Hungarian situation // J. Settlements and Spatial Planning. 2018. V. 9. Iss. 1. P. 35–45.
 41. *Johnson K.M., Lichter D.T.* Rural Depopulation: Growth and Decline Processes over the Past Century // Rural Sociology. 2019. V. 84. Iss. 1. P. 3–27.
 42. *MacDonald D., Crabtree J.R., Wiesinger G., Dax T., Stamou N., Fleury P., Gutierrez Lazpita J., Gibon A.* Agricultural abandonment in mountain areas of Europe: Environmental consequences and policy response // J. Environmental Management. 2000. V. 59. Iss. 1. P. 47–69.
 43. *Mladenov C., Ilieva M.* The depopulation of the Bulgarian villages // Bulletin of Geography. 2012. V. 17. P. 99–107.
 44. *Nickels C.R., Day F.A.* Depopulation of the rural Great Plains counties of Texas // Great Plains Research. 1997. V. 7. Iss. 2. P. 225–250.
 45. *Niedomysl T., Amcoff J.* Is There Hidden Potential for Rural Population Growth in Sweden? // Rural Sociology. 2011. V. 76. Iss. 2. P. 257–279.
 46. *Rye J.F.* Leaving the countryside: An analysis of rural-to-Urban migration and long-term capital accumulation // Acta Sociologica. 2006. V. 49. Iss. 1. P. 47–65.
 47. *Serra P., Vera A., Tulla A.F., Salvati L.* Beyond urban-rural dichotomy: Exploring socioeconomic and land-use processes of change in Spain (1991–2011) // Applied Geography. 2014. V. 55. P. 71–81.
 48. *Steinicke E., Čede P., Löffler R.* In-migration as a new process in demographic problem areas of the Alps. Ghost towns vs. Amenity settlements in the Alpine border area between Italy and Slovenia // Erdkunde. 2012. V. 66. Iss. 4. P. 329–344.
 49. *Steinicke E., Čede P., Löffler R., Jelen I.* “Newcomers” in the Alpine peripheral regions. A case study in the Julian Alps (Italy and Slovenia) // Rivista Geografica Italiana. 2014. V. 121. Iss. 1. P. 1–20.
 50. *Stockdale A.* Out-migration from rural Scotland: The importance of family and social networks // Sociologia Ruralis. 2002. V. 42. Iss. 1. P. 41–64.
 51. *Stockdale A.* Migration: Pre-requisite for rural economic regeneration? // J. Rural Studies. 2006. V. 22. Iss. 3. P. 354–366.
 52. *Stockdale A.* Contemporary and “Messy” Rural In-migration Processes: Comparing Counterurban and Lateral Rural Migration // Population, Space and Place. 2016. V. 22. Iss. 6. P. 599–616.
 53. *Viñas C.D.* Depopulation processes in European Rural Areas: A case study of Cantabria (Spain) // European Countryside. 2019. V. 11. Iss. 3. P. 341–369.
 54. *Wojewo'dzka-Wiewiórska A.* Depopulation in rural areas in Poland – Socio-economic local perspective // Research for Rural Development. 2019. V. 2. P. 126–132.

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ТЕРРИТОРИИ МУНИЦИПАЛЬНЫХ РАЙОНОВ НА ЛАНДШАФТНОЙ ОСНОВЕ

© 2021 г. А. К. Черкашин^{a,*}, С. И. Лесных^{a, **}

^aИнститут географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

*E-mail: akcherk@irnok.net

**E-mail: tyara@irigs.irk.ru

Поступила в редакцию 14.08.2020 г.

После доработки 18.05.2021 г.

Принята к публикации 25.05.2021 г.

Взаимодополняющие инструменты управления территорией – геоинформационный мониторинг (ГИМ) и геоинформационные системы (ГИС) – в единстве обеспечивают сбор, хранение, обработку, представление и визуализацию географических данных. ГИС – часть информационного блока организационной системы территориального управления, а ГИМ решает задачи связи наблюдаемой ситуации с ГИС, наполняет инвариантную базу данных ГИС для решения многочисленных задач. Особое место в ГИМ занимает мониторинг старых и новых источников, пространственно-распределенных данных разного происхождения. Технология ГИМ-ГИС разрабатывалась и реализовалась на примере муниципальных районов Иркутской области и Республики Бурятия при решении различных проблем с использованием данных космического мониторинга и корректирующих наземных исследований. В системном анализе по технологии ГИМ-ГИС районы рассматриваются в качестве обновляющегося геоинформационного объекта территориального планирования и управления в конкретной ландшафтной среде для обеспечения безопасности и эффективности жизнедеятельности. Для обработки локальной информации определены триадные схемы формального синтеза данных на основе групповых операций. Организован сбор, подготовка и картографическая визуализация данных в ГИМ-ГИС о заражении местного населения клещевым энцефалитом в Прибайкалье.

Ключевые слова: геоинформационный мониторинг, геоинформационная система, муниципальный район, обработка пространственных данных, ландшафтная ГИС

DOI: 10.31857/S0869607121040029

ВВЕДЕНИЕ

Важным этапом на путях практического использования географических знаний стало создание геоинформационных систем (ГИС) и геоинформатики как науки о методах преобразования пространственных данных. Геоинформатика рассматривается в единстве с дистанционным зондированием и картографированием, которые связаны с формированием и обработкой разного рода геоизображений – распознаванием графических образов, их количественным и качественным анализом [1]. Появляется возможность рассматривать геоинформатику как высшую форму организации и проведения географических исследований и научного преобразования данных и знаний [24, 25].

Геоинформационная система воспринимается в разных масштабах не только как компьютерное программное обеспечение или база пространственно-распределенных данных, но и как сложная система регулирования информационных потоков в обще-

стве, начиная от сбора данных до потребления геоизображений в геологистических процессах [3]. Геоинформационная система формируется на нескольких уровнях: информационном, программном, интегрированном, технологическом, сетевом, организационном. В последнем случае ГИС рассматривается в качестве важной части территориального управления взаимодействием природы, хозяйства, населения и органов власти, становящимися источниками и потребителями информации [31].

Десятилетия геоинформационная география формируется как прикладная наука, что имеет важное значение для существования самой географии [36]. Особенно это важно для мониторинга состояния участков территории и их границ на фоне природных и социально-экономических процессов разной интенсивности и направленности с последующим формированием баз данных ГИС из разных источников. Современное дистанционное зондирование для наполнения базы данных ГИС о земной поверхности использует различные платформы, включая спутниковые, бортовые, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), воздушные и наземные транспортные средства, а также пространственные данные реанализа для оценки изменения среды изучаемых районов [34]. БПЛА занимают промежуточное место между инструментами наземных и спутниковых наблюдений в системе комплексного экологического мониторинга [33]. Для оценки изменений в землепользовании привлекаются исторические карты для формирования сетки границ кадастровых земельных участков путем их оцифровки, геопривязки, векторизации и сравнения с помощью ГИС [16, 37].

Территориальная ГИС пополняется текущей информацией, обеспечивающей механизмы прямой коммуникации власти и местных жителей муниципальных районов, что позволяет онлайн отвечать на обращения жителей, быстро реагировать на повседневные проблемы. ГИС становится инструментом совместной работы различных служб, интеграции общества [30, 35].

Обновляющаяся ГИС, поддерживающая функции геоинформационного мониторинга, концентрирует и преобразует потоки пространственных данных и знаний, предлагая полезные для использования в быту, в обществе и на производстве сведения для оценки ситуации и решения задач территориального управления на разных уровнях организаций. В этом процессе в первую очередь необходимо получать новую объективную информацию, позволяющую делать обоснованный выбор, для чего требуются особые средства, основанные на позициях географического мышления.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И МЕТОДЫ

Традиционно мониторинг рассматривается как система повторных наблюдений за состоянием элементов природной среды, распределенных в пространстве и изменяющихся во времени, с целью оценки тенденций изменения этого состояния и прогнозирования его изменения под воздействием различных факторов и условий. Стандартная архитектура систем мониторинга включает в себя подсистемы сбора, хранения и анализа информации, в которых, соответственно, осуществляется сбор и совместная обработка данных о природной среде, анализ и моделирование явлений, процессов и тенденций их развития [9].

С появлением геоинформатики теория мониторинга получила дальнейшее развитие за счет применения интегрированных информационных систем обработки данных [4, 22]. Появившийся геоинформационный мониторинг (ГИМ) является самым объемным видом мониторинга, позволяющим изучать наибольшее число геотехнических и природных систем [11]. Его цель – исследование состояний пространственных объектов, их пространственных отношений, взаимодействия объектов с окружающей средой, мониторинг окружающей среды. ГИМ позволяет решать широкий класс задач: мониторинг городских территорий, пожароопасных зон, чрезвычайных ситуаций, подвижных объектов, земель, экологический и эпидемиологический мониторинг и т.д.

По характеру источников и повторяемости ГИМ подразделяется на фоновый, текущий и оперативный [4]. Фоновый мониторинг – это базовые наблюдения за естественным состоянием объектов (земель, лесов и т.д.), результаты которых являются средовой нормой для сравнения. В регионах он проводится специально уполномоченными государственными органами Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, земле-, лесо- и охотоустроства, в заповедниках и на научных полигонах. Текущий мониторинг постоянно осуществляется на предприятиях и населением для контроля за текущими изменениями состояния окружающей среды в результате сброса-выброса загрязнителей, для предупреждения и ликвидации последствий. Оперативный мониторинг необходим для выявления нарушений законодательства и реализуется на нерегулярной основе службами государственной инспекции. В архитектуре системы оперативного мониторинга появляются подсистемы оповещения, вывода и коррекции, направленные на быстрое (немедленное) реагирование на обнаруженные несоответствия в системе [9].

В плане геоинформационного обеспечения все виды мониторинга используют единую картографическую, фактологическую и инструментальную информацию, например, общегеографические и ландшафтные карты, данные наземных наблюдений, обладающие заведомо большей точностью и используемые для валидации данных дистанционного мониторинга для приведения в известность состояния среды, управления территорией и обеспечения безопасности жизнедеятельности [15].

Наглядным примером мониторинга является организация стационарных ландшафтных исследований по методу комплексной ординации [20] на пробных площадях (выделах фаций, участков биогеоценозов) полигон-трансекта. Наблюдения проводятся синхронно с различной повторностью группами исследователей разных специальностей для изучения особенностей местных природных режимов. Этому предшествует нивелирование местности и детальное ландшафтное и иное тематическое картографирование профильной полосы трансекта с выделением опытных участков и с их привязкой к сетке точек разметки местности (пикетам) и ареалам типов фаций. В итоге формируются пространственно-временные ряды показателей, оформленные в базу данных ГИС. Многолетние стационарные наблюдения позволяют судить о сезонной ритмике и восстановительной динамике геосистем. Синхронность наблюдений обеспечивает выявление характера и тесноты связей между компонентами средствами многомерной статистики и математического моделирования [21].

Мониторинг проводится в несколько этапов, соответствующих его стандартной архитектуре: выбор объектов наблюдения, организация и проведение наблюдений адекватными средствами измерения, инвентаризация полученных данных по территории, хранение, систематизация, обработка и предоставление информации [5]. Здесь соединены функции собственно мониторинга (наблюдения и измерения) и информационной системы хранения и обработки данных, или, по биологической аналогии, глаз и мозга организма. Подчеркиваются качества организованности, системности, изменчивости и территориальности мониторинга, что делает его особенно важным для обеспечения географических исследований. По этой причине реализация мониторинга проходит по этапам системного анализа с использованием возможностей ГИС [14] с созданием математических моделей, прогнозных и оптимизационных карт. В этой технологии база данных ГИС формируется как инвентаризационно-информационный объект, подлежащий количественному и качественному системному изучению. Важнейшими свойствами данных является их актуальность, полнота, достоверность и точность географической привязки, что связывает мониторинг с задачами метрологии прямых и косвенных измерений [26].

В схеме территориального координационного управления [27] с разделением функций и полномочий мониторинг как система наблюдения и измерения не имеет самостоятельного институционального значения. Его основная функция – наполнение

информационных систем. В этом качестве мониторинг выступает как посредник (представитель) между реальностью и информационными структурами, куда включены не только средства массовой информации (СМИ), но и инструменты научного анализа и визуализации сведений, в частности, ГИС-картографирования ситуации. Виды мониторинга различаются по целевой установке – направлению (вектору) предоставления и использования информации о ситуации. ГИМ в структуре территориального управления – это деятельность, ориентированная на наполнение и актуализацию инвариантных баз данных и знаний ГИС, привлекаемых для решения самых разных задач. Иллюстрацией мониторинга является работа информационных агентств – специализированных организаций, обслуживающих СМИ. Их основная функция – снабжение оперативной информацией репортерами со всего мира редакций газет, телевидения, других организаций и частных лиц, являющихся подписчиками на его новостную продукцию. Агентства предоставляют “сырую” фактическую информацию без ее содержательной интерпретации. Важным источником информации для принятия решений являются жалобы, обращения и сообщения населения. Существует возможность в режиме “мобильный репортер” получать новости о жизни района, поселка и даже отдельной семьи или человека. Контент-анализ таких сообщений с целью содержательной интерпретации выявленных количественных закономерностей предоставляет материал для тематического ГИС-моделирования и картографирования.

По масштабу выделяют глобальный, региональный и локальный уровни ГИМ. Локальный мониторинг применяют к отдельным территориальным объектам и муниципальным районам, где отслеживаются местные характеристики среды. Муниципальный район является самостоятельной самоуправляемой территорией с пространственно распределенной структурой организации жизни природы, общества и производства и в то же время – это элементарный уровень полномасштабного проявления действия структур управления [3]. Рассмотрение муниципального района в качестве постоянно обновляющегося пространственного объекта позволяет достигнуть необходимого уровня информированности для территориального планирования и управления с учетом основных природных, экономических и социальных условий обеспечения безопасности и эффективности жизнедеятельности [15].

ЛАНДШАФТНАЯ ГИС ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Функциональная ориентация ГИМ-ГИС – комбинированная и многоцелевая, поскольку сбор информации осуществляется безотносительно к запросам пользователей и обеспечению решения конкретных проблем. Это может быть научно-исследовательская и информационно-справочная система или учетно-кадастровая система, предназначенная для территориального управления с возможностью системного анализа и моделирования. В соответствии с требованием полноты сконцентрированной в ГИС информации такие ГИС должны содержать данные, позволяющие удовлетворять различные запросы. При появлении задач, требующих качественно новой информации, эта информация добавляется в базу данных и используется наравне со старыми сведениями.

Выделяются переменные и постоянные составляющие базы данных ГИС фонового, текущего и оперативного мониторинга. Постоянной, инвариантной основой являются сетки контуров, представленные административными, ландшафтными, лесоустроительными и растровыми границами членения территории. Каждая ячейка сетки (район, ареал, выдел, пикセル) связана со значениями атрибутов базы данных ГИС, которые сохраняются, пополняются, обновляются, преобразуются и отображаются на картах. Эта информация становится основой для интерпретации результатов ГИМ. Особое значение для содержательной трактовки данных и знаний имеет ГИМ-ГИС, построенная на ландшафтной основе: сначала как система информационного обеспе-

чения географических исследований и организации ГИМ, а затем как средство интерпретации данных с ландшафтно-карографической привязкой [23]. Ландшафтная ГИС создается в виде электронного варианта ландшафтной карты с сеткой границ выделов с атрибутивными данными по каждому из выделов [7]. Множество фаций (или иных подразделений) легенды карты упорядочено в факторальную систему, их параметры закодированы: для каждой фации составлено подробное покомпонентное описание (паспорт фации) в специальной базе данных – основе для интерпретации содержания методом переклассификации легенды. При этом принимается, что одни и те же значения данных в разных ландшафтных обстоятельствах (фациях) выражают отличающееся содержание, трактуются своеобразно. В качестве эталонов внутриландшафтного сравнения и сопряженного изучения природных режимов используются равнинные коренные фации местных проявлений зональной нормы или естественные ненарушенные хозяйственной деятельностью ландшафты.

Теоретический потенциал ландшафтоведения имеет фундаментальную ценность для разработки стратегии поведения человека в конкретном природном окружении. По этой причине первостепенное значение для ландшафтоведения имеют расширение и углубление полевых исследований, ландшафтное картографирование и разработка конструктивных концепций, которые позволяют существенно поднять общественную значимость ландшафтоведения [6]. Ландшафтно-карографическая основа обладает инвариантными свойствами в смысле независимости ее формы и содержания от концептуальных основ создания ландшафтных карт и от системного подхода при их тематической интерпретации. При этом постулируется объективность выделения границ при физико-географическом районировании и типологическом картографировании, причем границы проводятся не по градиентам признаков, а на основе различия функциональных связей компонентов соседних участков [8]. На этом базируется технология ландшафтно-интерпретационного картографирования, позволяющая при наличии причинно-следственных связей переводить ландшафтные карты в карты нового тематического содержания, используя базы данных ГИС [23].

ТЕОРИЯ И МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

При наличии обширного материала мониторинговых наблюдений основной проблемой реализации системы ГИМ-ГИС становится разработка теоретического базиса решения задач геоинформатики с помощью математических моделей преобразования данных ГИС. Накоплен достаточный опыт решения задач оценивания, прогнозирования и оптимального управления, который можно обобщить в графических схемах моделирования (рис. 1). В учении о геосистемах В.Б. Сочава [19] уделял большое внимание созданию графов процессов и явлений в географических исследованиях. Разрабатываются графы сравнения мозаик территории и выявляются пространственные закономерности связи между частями различных ландшафтов, климатическими условиями, участками землепользования и населением, полезными для планирования и управления ресурсами [29]. Давно продемонстрирована полезная связь ориентированных графов с системами дифференциальных уравнений, позволяющих делать расчеты [2].

В технологии геоинформационного моделирования ГИМ-ГИС применяется триадный принцип организации знаний и формирования уравнений. Ф.Н. Мильков [12] обращал внимание на важность использования правила триады в физической географии, согласно которому различаются крайние (окраинные, противоположные) позиции и срединная позиция, наиболее полно отражающая характерные черты объекта или явления. Триада – известное понятие философского конструирования и мышления. У Г. Гегеля триада – универсальная схема логики процесса развития: тезис *A* (исходная позиция), антитезис *B* (переход в противоположность, отрицание), синтез *C*

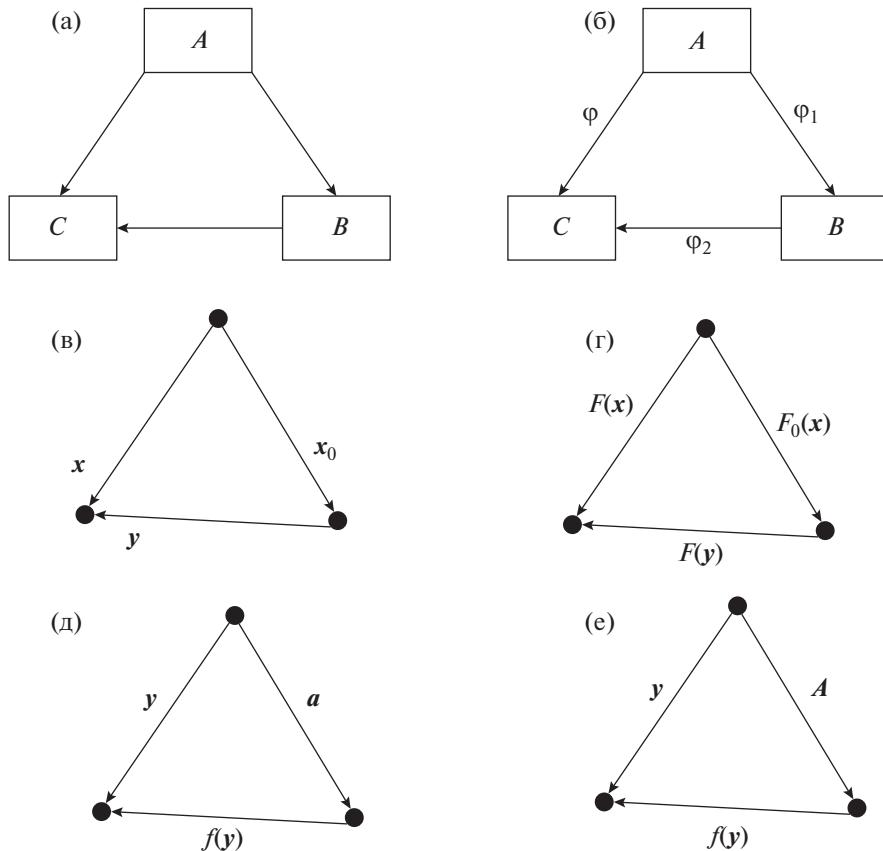


Рис. 1. Треугольные схемы обработки ГИМ-данных: (а) логическая триада; (б) коммутативная диаграмма; (в) векторная сумма; (г) функциональная сумма; (д) скалярное произведение; (е) операторные преобразования.

Fig. 1. Triangular GIM data processing schemes: (a) logical triad; (b) commutative diagram; (в) vector sum; (г) functional sum; (д) scalar product; (е) operator transformation.

противоположностей A и B в новое единство, противоположное первым двум (опосредование, отрицание отрицания). Такая логика напоминает групповые операции в математике, когда произведение целых чисел $C = AB$ дает новое, не равное исходным числам целое число, или сумма двух действительных чисел $C = A + B$ – новое вещественное число (рис. 1а).

Такой подход распространяется на другие треугольные ориентированные графы, из которых складывается сложная сетка связей элементов, например, сетка графа соседства ареалов фаций в ландшафте или органов местного управления на территории района. Всякий раз треугольный граф системно понимается по-разному и выражается с помощью соответствующих формул. На рис. 1б показан коммутативный треугольник, широко применявшийся для формализации отношений (морфизмов, стрелок ϕ) в математической теории категорий. В географии он отражает связи ϕ компонентов комплексов и комплексов между собой $\phi: A \rightarrow B \rightarrow C$, что используется, например, для выделения ландшафтных границ по критерию функциональной связности [8]. Коммутативность морфизмов соответствует групповому отношению $\phi = \phi_1\phi_2$, согласно

которому результат преобразований $\varphi: A \rightarrow C$ не зависит от последовательности преобразований $\varphi: A \rightarrow B \rightarrow C$.

Сложение векторов $\mathbf{x} = \mathbf{y} + \mathbf{x}_0$ (рис. 1в) – суммы нормального состояния географической среды \mathbf{x}_0 и меры отклонения \mathbf{y} от нормы (возмущение), дает характеристику текущего состояния \mathbf{x} геосистемы. Здесь прослеживается аналогия между задачами фонового \mathbf{x}_0 , оперативного \mathbf{y} и текущего \mathbf{x} ГИМ. Основная задача ГИМ – выявление с помощью фоновых характеристик ландшафтно-типологических карт поместных отклонений $\mathbf{y} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$ от нормы и поиск методов их регулирования.

В терминах группы действительных чисел дается функциональная оценка состояния геосистемы по аддитивному принципу $F(\mathbf{x}) = f(\mathbf{y}) + F_0(\mathbf{x})$ (рис. 1г). Существует базовая аксиома ландшафтного анализа, согласно которой любая оценка $F(\mathbf{x})$ есть функция многообразия состояния ландшафтной среды $F_0(\mathbf{x})$ и некоторого возмущающего воздействия $f(\mathbf{y})$, определенного отклонениями характеристик компонентов геосистем от нормы $\mathbf{y} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$. Поиск таких оценочных формул является одной из центральных проблем применения результатов ГИМ при решении экологических задач [17].

Рис. 1д поясняет, как выглядит функция $f(\mathbf{y}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{y}$ – скалярное произведение векторов $\mathbf{a} \cdot \mathbf{y}$, где $\mathbf{y} = \{y_i\}$ – вектор показателей отклонения $y_i = x_i - x_{0i}$ от нормы x_{0i} по каждому компоненту i геосистемы; $\mathbf{a} = \{a_i\}$ – ковектор чувствительности влияния изменения величины y_i на изменение оценки $f(\mathbf{y})$. Расчетное уравнение

$$f(\mathbf{y}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{y} = \sum_{i=1}^n a_i y_i = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial y_i} y_i, \quad a_i = \frac{\partial f}{\partial y_i}, \quad f(\mathbf{y}) = F(\mathbf{x}) - F(\mathbf{x}_0). \quad (1)$$

Для квалиметрии косвенных измерений это соотношение дает множество оценочных однородных функций $f(\mathbf{y})$, среди которых наиболее известны разные средние значения n величин $\mathbf{y} = \{y_i\}$ с весовыми коэффициентами $\mathbf{w} = \{w_i\}$, например, для среднего арифметического $a_i = w_i/n$, геометрического – $a_i = (w_i/n)/(f(\mathbf{y})/y_i)$. Форму, аналогичную (1), имеет критерий Понтрягина при решении задач оптимального управления и создания оптимизационных карт [13].

Если используется многокритериальная оценка (вектор-функция) $\mathbf{f} = \{f_j(\mathbf{y})\}$, то $\mathbf{f} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{y}$, где $\mathbf{A} = \|a_{ij}\|$ – матрица коэффициентов a_{ij} воздействия (оператор преобразования) (рис. 1е). С помощь уравнения $\mathbf{f} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{y}$ описывается система взаимодействия разных относительных величин $\mathbf{y} = \{y_i\}$. Например, приняв $f_j(\mathbf{y}) = dy_j/dt$ – скорость изменения показателя y_j во времени t – получим систему дифференциальных уравнений. В частности, исследовались процессы гомеостатического регулирования породного состава горно-таежных лесов [10]. Использовались модели в показателях отклонения $\mathbf{y}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_0$ переменных характеристик геосистем $\mathbf{x} = \{x_i\}$ от их равновесного значения $\mathbf{x}_0 = \{x_{0i}\}$:

$$\frac{dy_1}{dt} = a_{11}y_1 + a_{21}y_2 + a_{31}y_3, \quad \frac{dy_2}{dt} = a_{12}y_1 + a_{22}y_2 + a_{32}y_3, \quad \frac{dy_3}{dt} = a_{13}y_1 + a_{23}y_2 + a_{33}y_3,$$

где $y_i = x_i - x_{0i}$ – отклонение текущего запаса x_i i -й группы пород от потенциального запаса x_{0i} (древостои 1 – мелколиственных, 2 – светлохвойных, 3 – темнохвойных пород).

Для изучения механизмов динамики горной тайги составлялись эскизы таблиц хода роста на основе повыдельных таксационных показателей из базы данных ГИС лесоустроительного мониторинга Слюдянского лесхоза [10]. С помощью модели проведен количественный анализ взаимодействия древостоев мелколиственных, светлохвойных и темнохвойных пород и проверены базовые гипотезы механизмов сукцессионных смен сложных по составу лесонасаждений в разных местоположениях и построен прогноз (рис. 2).

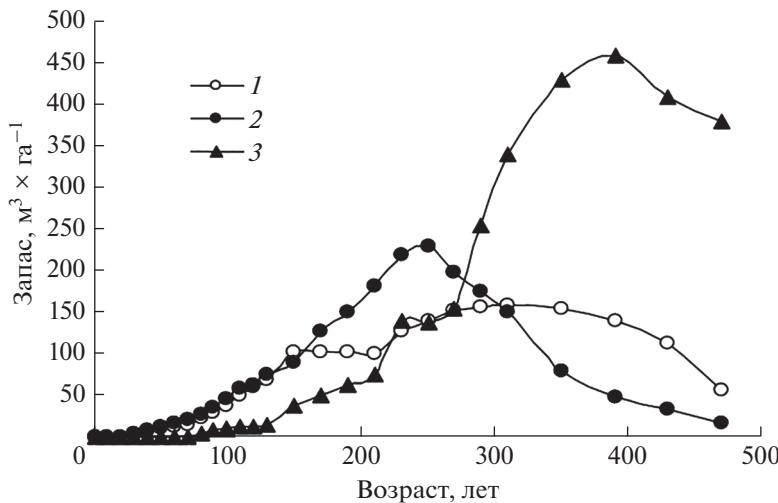


Рис. 2. Изменение с возрастом запасов древостоя горно-таежных бруснично-зеленомошных лесов III бонитета северо-восточного макросклона хр. Хамар-Дабан по группам пород: 1 – мелколиственные, 2 – светлохвойные, 3 – темнохвойные.

Fig. 2. Age-related changes of wood stock of mountain lingonberry-green-mossed taiga of the forest capacity III of the northeast macroslope at Hamar-Daban range by tree species group: 1 – small-leaved deciduous, 2 – light coniferous, 3 – dark coniferous forests.

ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ГИМ-ГИС-ПРОЕКТОВ

Методика ГИМ разрабатывалась и реализовалась в Слюдянском и Жигаловском районах Иркутской области и Кабанском районе Республики Бурятия. Подробно проработана ГИМ-ГИС Слюдянского муниципального района [3, 28] с множеством приложений и серией карт. ГИС района основана на опыте крупномасштабного картографирования геосистем по снимкам космического мониторинга, решения проблем управления территориями и планирования региональной политики землепользования. Она базируется на понимании, что для решения большинства задач управления территориальным развитием уровень муниципального района реализации ГИС-проектов является оптимальным, поскольку появляется возможность с его помощью создавать ГИС большого территориального охвата и формировать детальные ГИС населенных пунктов.

Слюдянский район является одним из проблемных районов Иркутской области. Он охватывает южное побережье озера Байкал, где сосредоточены крупные автомобильные и железнодорожные магистрали, размещены отходы закрытого Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, сохранились уникальные лесные массивы и природные комплексы. Район расположен в центральной экологической зоне озера и может рассматриваться в качестве модельной территории управления, поскольку позволяет решать задачи, предусмотренные законом об охране оз. Байкал. Решение этих проблем требует современного информационного обеспечения для анализа сценариев развития района в противоречивых условиях деятельности. Таким средством решения территориальных задач становятся геоинформационные системы ГИМ-ГИС [3].

Разработанный ГИС-проект является информационной инструментальной основой решения задач управления территорией и оценки ее состояния, содержащей большой объем различной информации для детального и глубокого изучения перспектив

развития территории. Особенность данного проекта заключается в том, что он выполнен на основе космической информации. Все множество разнородного материала по территории района представлено в едином плане. Накопление таких данных позволяет детализировать экологическую ситуацию и обеспечить информацией модели, оптимизирующие управление территорией и качественное регулирование отношений в системе “природа–хозяйство–население”.

На территориях муниципальных районов производилась инвентаризация материалов, находящихся в хозяйственном использовании. Сюда вошли фондовые картографические материалы, карты лесной таксации, землеустройства, космоснимки “Ресурс-Ф2М” (камера МК-4) в масштабе 1 : 800 000 с разрешением на местности 6–8 м в четырех спектральных каналах, карта особо охраняемых территорий, нормативно-правовые документы, данные натурных исследований, информация гидрометеослужбы по изменению климатических и гидрологических характеристик и т.д. Этот этап является первоначальным в технологии технической реализации ГИМ-ГИС. Далее следовал этап привязки растровой информации к территории, этап дешифрирования и векторизации космоснимков с корректировкой по исходным картографическим материалам и результатам маршрутных наблюдений, а также в зависимости от существующей в обществе системы земельных отношений, зафиксированной в законодательной базе.

На основе проведенной инвентаризации на территориях выделены объекты, являющиеся источниками воздействия на окружающую среду и участки, сохранившиеся как фоновые (горно-таежные леса). Результатом этих мероприятий по технологии ГИМ-ГИС стало представление о современном состоянии горно-таежных экосистем, их компонентов и элементов, тенденций их изменения, а также выделены представительные участки для данной территории (бассейны рек Куда, Каторжанка и Шумиха, бассейн р. Бабха у г. Байкальска, Энхалукский заказник с его окрестностями). На этих участках проводились наземные исследования. Их целью было уточнить и проверить результаты дешифрирования космоснимков, собрать информацию для разработки моделей и методов анализа дистанционных данных. Наземные наблюдения проводились двумя методами: 1) маршрутные наблюдения с визуальной, описательной, фотографической и видеофиксацией ландшафтов; 2) трансектное обследование территории с количественной фиксацией параметров биогеоценозов [21].

Вся собранная информация была уточнена, систематизирована, статистически обработана, проанализирована и отображена в ГИС районов в картографическом виде, позволяющем решать задачи мониторинга и управления. Накопленный по Слюдянскому району научный материал, разработанный при создании рамочного ландшафтного плана М 1 : 200 000, послужил отправной точкой для дальнейшего картографирования. В результате было создано комплексное картографическое произведение нового вида, а именно электронный атлас, интегрирующий современную информацию и знания о природе, ресурсах, экономике, экологии, населении и культуре района и представляющий эту информацию в виде и формах, пригодных для решения различных проблем территориального развития [17, 28].

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ ГИМ-ГИС

Задачи создания, уточнения и обновления тематических карт являются одними из наиболее актуальных направлений ГИМ, поскольку ошибки на этом этапе влекут за собой искажение результатов дальнейших расчетов и выводов. Одним из примеров картографирования по схеме ГИМ-ГИС на ландшафтной основе служит проведенный медико-экологический мониторинг [32], в котором от исходной информации зависят решения органов управления в сложной, постоянно меняющейся эпидемической обстановке.

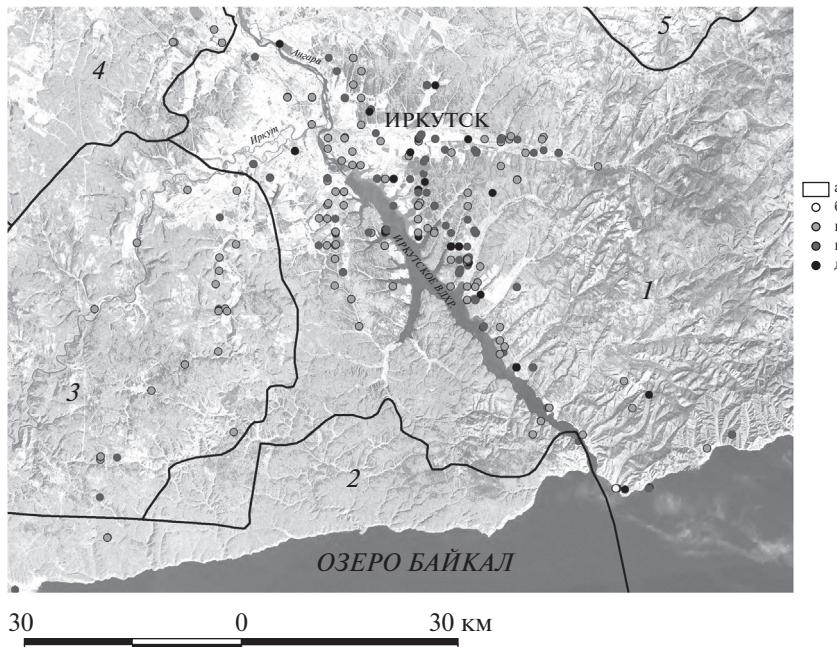


Рис. 3. Результаты геоинформационного мониторинга поместного заражения и заболевания населения клещевым энцефалитом в Прибайкалье в разные годы. Муниципальные районы Иркутской области: 1 – Иркутский, 2 – Слюдянский, 3 – Шелеховский, 4 – Ангарский, 5 – Эхирит-Булагатский Усть-Ордынского Бурятского округа. Условные обозначения: а – границы муниципальных районов; клинические формы заболевания: б – легкая, в – средней тяжести, г – тяжелая, д – критическая.

Fig. 3. The results of geoinformation monitoring of local infection and disease of the population with tick-borne encephalitis in the Baikal region in different years. Municipal districts of the Irkutsk region: 1 – Irkutsky, 2 – Slyudyansky, 3 – Shelekhovsky, 4 – Angarsky, 5 – Ekhirit-Bulagatsky Ust-Orda Buryat district. Conventional notation: а – boundaries of municipal districts; clinical forms of the disease: б – mild, в – moderate, г – severe, д – critical.

Эпидемиологическая информация имеет свои особенности [32]. Она разнообразна по содержанию (заболеваемость, носительство, демографические сведения, характеристики возбудителя и внешней среды и др.) и по источникам (официальная статистическая и полученная в результате научных полевых и аналитических исследований); для нее характерны большие объемы и сложность структуры. Наиболее трудной задачей здесь становится формирование единых подходов к сбору и анализу первичной информации о выявленных случаях заболевания с оптимизацией информационных потоков по заданным критериям (качество и количество, оперативность, непрерывность, достоверность).

При формировании эпидемиологической информации в системе ГИМ-ГИС второй задачей является территориальная привязка показателей. Обычно основой выступает карта административно-территориального деления изучаемой территории, где населенные пункты или административные районы становятся объектами привязки, а в качестве атрибутивной информации принимаются данные об эпидемическом состоянии их населения. Такие карты составляются в мелком масштабе, имеют справочный характер. Применение территориально-ландшафтной привязки дает возможность пространственно представить информацию о случаях заражения, связать ее с конкретной географической средой местоположения, добавить новые данные мони-

торинга реакции населения на природные опасности и в итоге проследить многолетнюю динамику развития ситуации с ее прогнозированием по конкретному месту и времени. На рис. 3 приведены результаты геоинформационного мониторинга и картографирования поместного заражения населения клещевым энцефалитом в Прибайкалье в разные годы.

На карте показаны случаи покусов, подтвержденные лабораторными анализами, ранжированные по тяжести клинической формы заболевания (от легкой до критической, приведшей к летальному исходу), зафиксированные на территории Иркутской области. Установленные случаи заражения приурочены к автомобильным трассам и местам отдыха населения: прибрежной зоне Байкала и Ангары, кустарниковым зарослям и лиственным лесам по долинам рек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Данное исследование отражает опыт работы по реализации ГИС-проектов и ГИС-моделированию и выявляет закономерности геоинформационного обеспечения и преобразования пространственных данных. Определяется позиция ГИМ в системе территориального управления как опосредующего звена связи территориальных объектов с их цифровыми моделями – геоинформационными объектами.

Геоинформационный мониторинг – пространственно распределенное и повторяющееся во времени наблюдение и измерение – неразрывно связан с созданием и наполнением геоинформационных систем, что обычно рассматривается в комплексе средств сбора, хранения, обработки и представления географической информации (ГИМ-ГИС). Остальные наблюдения и измерения – локальные и неповторяющиеся – можно считать вариантами мониторинга, решающими свои частные задачи без должного пространственно-временного охвата, но необходимые в исследованиях. Разделение функций ГИМ и ГИС дает возможность лучше формулировать и решать свойственные им проблемы. ГИС в широком смысле выступает в качестве части информационного блока организационной системы территориального управления, а ГИМ решает задачи связи наблюдаемой реальности с блоком ГИС. Прослеживаются инструментальные и технологические различия двух систем.

Наглядной иллюстрацией ГИМ-ГИС являются аэрокосмический мониторинг и организация ландшафтных стационарных исследований по методу комплексной ординации. Во всех случаях ключевым моментом реализации ГИМ становится создание и использование ландшафтно-типологической карты для организации сбора, хранения и преобразования информации. ГИС территории муниципального района должна быть ландшафтной ГИС, открывающей большие возможности для создания тематических моделей и карт средствами ландшафтно-карографической интерпретации географических данных и знаний, т.е. логического вывода, в том числе средствами математического моделирования.

В процедуре формирования ГИС района ответственным этапом является инвентаризация первичной информации из различных источников, что можно рассматривать в качестве своеобразного постоянно действующего ГИМ за старыми и новыми источниками пространственных данных, включая сообщения информационных агентств и СМИ. Важные этапы – первичная обработка, картографическое и инфографическое представление накопленной информации и геоинформационное математическое моделирование, результаты которых зависят от достоверности собранной ГИМ информации, а также совершенства моделей и методов ее преобразования. Существует общая триадная схема формального синтеза информации различной сложности на основе групповых операций объединения противоположных начал: прямых и косвенных измерений, геосистемы и ее среды, состояний и их трансформации, вектор-

ров и ковекторов переменных. Применение этих операций проводится в последовательности процедур системного анализа.

Методика ГИМ-ГИС разрабатывалась и реализовалась на примере муниципальных районов Иркутской области и Республики Бурятия при решении различных проблем территориального управления с использованием данных космического мониторинга и корректирующих наземных исследований. Специально организован сбор, подготовка и визуализация данных по схеме ГИМ-ГИС о заражении местного населения клещевым энцефалитом в Прибайкалье. Реализация каждого ГИС-проекта требует решения новых задач геоинформационного мониторинга на основе расширяющихся возможностей количественного измерения пространственных объектов с созданием их все более точных “геоинформационных образов” на разных уровнях обобщения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Берлянт А.М.* Теория геоизображений. М.: ГЕОС, 2006. 261 с.
2. *Вентцель Е.С.* Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 552 с.
3. Геоинформационная система управления территорией / А.К. Черкашин, А.Д. Китов, И.В. Бычков и др. Иркутск: Издательство Института географии СО РАН, 2002. 151 с.
4. Затягалова В.В. Философия геоинформационного мониторинга // Перспективы науки и образования. 2015. № 1(13). С. 17–23.
5. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. М.: Гидрометеоиздат, 1984. 560 с.
6. Исаченко А.Г. Ландшафтovedение вчера и сегодня // Изв. РГО. 2006. Т. 138. Вып. 5. С. 1–20.
7. Истомина Е.А. Ландшафтная ГИС как инструмент оценивания и планирования использования земель // Ландшафтovedение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития: материалы XII Международной ландшафтной конференции. Т. 2. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2017. С. 341–347.
8. Истомина Е.А., Черкашин А.К. Выделение границ функционально однородных ареалов на космических снимках на основе вычисления определителя Якоби // География и природные ресурсы. 2013. № 1. С. 157–165.
9. Кореньков В.В., Мицын П.В., Дмитриенко П.В. Архитектура системы мониторинга центрального информационно-вычислительного комплекса ОИЯИ // Информационные технологии и вычислительные системы. 2012. № 3. С. 31–42.
10. Лесных С.И., Черкашин А.К. Модельный анализ взаимодействия разных групп пород в процессе сукцессионных изменений горной тайги // Изв. Иркутского государственного университета. Серия “Биология. Экология”. 2016. Т. 15. № 1. С. 11–24.
11. Максимова М.В. Мониторинг пространственных объектов // European Researcher. 2012. V. 36. № 12-1. С. 2114–2117.
12. Мильков Ф.Н. Правило триады в физической географии // Землеведение. Т. 15. М.: Изд-во МГУ, 1984. С. 18–25.
13. Мясникова С.И., Черкашин А.К. Оптимизационное геоинформационное картографирование // Геодезия и картография. 2007. № 4. С. 38–42.
14. Мясникова С.И., Черкашин А.К. Прогнозное геоинформационное картографирование // Геодезия и картография. 2010. № 11. С. 30–33.
15. Мясникова С.И., Черкашин А.К. Геоонтология создания серии карт муниципальных районов // Геодезия и картография. 2012. № 12. С. 41–48.
16. Пахахинова З.З., Бешенцев А.Н., Гармаев Е.Ж. Создание ГИС-мониторинга природопользования бассейна озера Байкал // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 08. С. 647–651.
17. Савиных В.П. Применение геоинформационного мониторинга для решения экологических задач // Перспективы науки и образования. 2015. № 4(16). С. 28–33.
18. Слюдянский район Иркутской области: природа, хозяйство и население. Атлас (48 карт). Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2012. [Электронный ресурс – CD].
19. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1978. 319 с.
20. Сочава В.Б., Волкова В.Г., Дружинина Н.П. и др. Метод комплексной ординации в ландшафтovedении и биогеоценологии // Докл. Ин-та географии Сибири и Дальнего Востока. 1967. Вып. 14. С. 3–17.
21. Фролов А.А., Черкашин А.К. Высотный градиент как комплексный фактор формирования микрозональности ландшафтов и серийности геосистем // География и природные ресурсы. 2012. № 1. С. 14–24.

22. Цветков В.Я. Геоинформационный мониторинг // Изв. вузов. учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2005. № 5. С. 151–155.
23. Черкашин А.К. (ред.) Ландшафтно-интерпретационное картографирование. Новосибирск: Наука, 2005. 424 с.
24. Черкашин А.К. География и геоинформатика // География и природ. ресурсы. 2006. № 4. С. 19–29.
25. Черкашин А.К. Геоинформатика – высшая география // Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт. Т. 1. Калининград: Международная картографическая ассоциация, 2006. С. 6–11.
26. Черкашин А.К. Географическая точность и особенности метрологического моделирования геопространственных данных // Український метрологічний журн. 2014. № 2. С. 7–15.
27. Черкашин А.К., Лесных С.И., Склянова И.П. Координационное управление природоохранной деятельностью региона: концептуальная модель // Теоретическая и прикладная экономика. 2019. № 3. С. 81–97.
<https://doi.org/10.25136/2409-8647.2019.3.24404>. URL: http://e-notabene.ru/etc/article_24404.html
28. Экологический атлас Байкальского региона. Комплексный модуль субрегиональных и муниципальных карт. Условия и факторы формирования экологической обстановки в Слюдянском районе Иркутской области. URL: <http://atlas.isc.irk.ru/>
29. Cantwell M.D., Forman R.T.T. Landscape graphs: Ecological modeling with graph theory to detect configurations common to diverse landscapes // Landscape Ecology. 1993. V. 8. № 4. P. 239–255.
30. Craig W., Harris T., Wiener D. (eds.). Community participation and geographical information systems. N.Y.: CRC Press, 2002. 383 p.
31. Johnston R.J. Geography and GIS // Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications, John Wiley & Sons, Ltd., 2006. P. 27–35.
32. Lesnykh S.I., Mel'nikova O.V. Generation of Databases and Visualization of Current Epidemiological Information for Purposes of a Medical-Ecological Monitoring of a Region // Geogr. Nat. Resour. 2019. V. 40. P. 115 (дата обращения 12.04.2021).
<https://doi.org/10.1134/S1875372819020033>
33. Medvedev A., Telnova N., Alekseenko N., Koshkarev A., Kuznetchenko P., Asmaryan S., Narykov A. UAV-Derived Data Application for Environmental Monitoring of the Coastal Area of Lake Sevan, Armenia with a Changing Water Level // Remote sensing. 2020. № 12, P. 3821.
<https://doi.org/10.3390/rs12223821>
34. Ryu, Joo-Hyung, et al. “EDITORIAL: Special Issue on “Advances in Remote Sensing and Geoscience Information Systems of the Coastal Environments.” // J. Coastal Res. 2019. P. V–XI. www.jstor.org/stable/26778930 (дата обращения 12.04.2021).
35. Thompson M.M., Arceneaux B.N. Public participation geographic information systems: A model of citizen science to promote equitable public engagement // Advancing equity planning now, N. Krumholz, K.W. Hexter (eds). Cornell University Press. 2018. P. 243–262. [https://www.jstor.org/stable/10.7591/j.ctvjsf3d.16](http://www.jstor.org/stable/10.7591/j.ctvjsf3d.16) (дата обращения 12.04.2021).
36. Vannieuwenhuyse B. Pixels or Parcels?: Parcel-Based Historical GIS and Digital Thematic Deconstruction as Tools for Studying Urban Development // Mapping Landscapes in Transformation: Multidisciplinary Methods for Historical Analysis. Leuven University Press Publisher. 2019. P. 217–236. [https://www.jstor.org/stable/j.ctvjsf4w6.12](http://www.jstor.org/stable/j.ctvjsf4w6.12) (дата обращения 12.04.2021).
37. Yano K. GIS and quantitative geography // GeoJ. The contribution of GIS to geographical research. 2000. V. 52. № 3. P. 173–180.

Geoinformation Monitoring of the Territory Municipal Areas on Landscape Basis

A. K. Cherkashin^{1,*} and S. I. Lesnykh^{1,**}

¹Sochava Institute of geography SB RAS, Irkutsk, Russia

*E-mail: akcherk@irnok.net

**E-mail: tyara@irigs.irk.ru

Complementary tools for managing the territory – geoinformation monitoring (GIM) and geoinformation systems (GIS) – in unity provide the collection, storage, processing, presentation and visualization of geographical data. GIS is a part of the information block of the organizational system of territorial management, and the GIM solves the problems of linking the observed situation with the GIS, fills the invariant GIS database for solve numerous problems. Monitoring of old and new sources, spatially distributed data of different origins occupies a special place in GIM. The GIM-GIS technology was developed and implemented on the example of municipal districts of the Irkutsk region and the Republic of Buryatia when solving various problems using space monitoring data and corrective ground-based

surveys. In a system analysis using GIM-GIS technology, regions are considered as an updated geo-informational object of territorial planning and management in a specific landscape environment to ensure safety and efficiency of life. For processing local information, triad schemes of formal data synthesis based on group operations are proposed. The collection, preparation and cartographic visualization of data in the GIM-GIS on infection of the local population with tick-borne encephalitis in the Baikal region have been organized.

Keywords: geoinformation monitoring, geoinformation system, municipal area, spatial data processing, landscape GIS

REFERENCES

1. *Berlyant A.M.* Teoriya geoizobrazhenij. M.: GEOS, 2006. 261 s.
2. *Ventcel' E.S.* Issledovanie operacij. M.: Sovetskoe radio, 1972. 552 s.
3. Geoinformacionnaya sistema upravleniya territoriej / A.K. Cherkashin, A.D. Kitov, I.V. Bychkov i dr. Irkutsk: Izdatel'stvo Instituta geografii SO RAN, 2002. 151 s.
4. *Zatyagalova V.V.* Filosofiya geoinformacionnogo monitoringa // Perspektivy nauki i obrazovaniya. 2015. № 1(13). S. 17–23.
5. *Israel' Yu.A.* Ekologiya i kontrol' sostoyaniya prirodnoj sredy. M.: Gidrometeoiz-lpodat, 1984. 560 s.
6. *Isachenko A.G.* Landshaftovedenie vchera i segodnya // Izv. RGO. 2006. V. 138. Vyp. 5. S. 1–20.
7. *Istomina E.A.* Landshaftnaya GIS kak instrument ocenivaniya i planirovaniya ispol'zovaniya zemel' // Landshaftovedenie: teoriya, metody, landshaftno-ekologicheskoe obespechenie prirodopol'zovaniya i ustojchivogo razvitiya: materialy XII Mezhdunarodnoj landshaftnoj konferencii. T. 2. Tyumen': Izdatel'stvo Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2017. S. 341–347.
8. *Istomina E.A., Cherkashin A.K.* Vydenie granic funkcional'no odnorodnyh arealov na kosmicheskikh snimkakh na osnove vychisleniya opredelitelya Yakobi // Geografiya i prirodnye resursy. 2013. № 1. S. 157–165.
9. *Koren'kov V.V., Micyn P.V., Dmitrienko P.V.* Arxitektura sistemy monitoringa central'nogo informacionno-vychislitel'nogo kompleksa OIYaI // Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy. 2012. № 3. S. 31–42.
10. *Lesnyx S.I., Cherkashin A.K.* Model'nyj analiz vzaimodejstviya raznyh grupp porod v processe sукcessionnyh izmenenij gornoj tajgi // Izv. Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Biologiya. Ekologiya", 2016. V. 15. № 1. S. 11–24.
11. *Maksimova M.V.* Monitoring prostranstvennyh ob'ektov // European Researcher. 2012. V. 36. № 12-1. S. 2114–2117.
12. *Mil'kov F.N.* Pravilo triady v fizicheskoj geografii // Zemlevedenie. V. 15. M.: Izd-vo MGU, 1984. S. 18–25.
13. *Myasnikova S.I., Cherkashin A.K.* Optimizacionnoe geoinformacionnoe kartografirovaniye // Geodeziya i kartografiya. 2007. № 4. S. 38–42.
14. *Myasnikova S.I., Cherkashin A.K.* Prognoznoe geoinformacionnoe kartografirovaniye // Geodeziya i kartografiya. 2010. № 11. S. 30–33.
15. *Myasnikova S.I., Cherkashin A.K.* Geoontologiya sozdaniya serii kart municipal'nyh rajonov // Geodeziya i kartografiya. 2012. № 12. S. 41–48.
16. *Paxaxinova Z.Z., Beshenev A.N., Garmaev E.Zh.* Sozdanie GIS-monitoringa prirodopol'zovaniya bassejna ozera Bajkal // Optika atmosfery i okeana. 2018. V. 31. № 08. S. 647–651.
17. *Savinyh V.P.* Primenenie geoinformacionnogo monitoringa dlya resheniya ekologicheskikh zadach // Perspektivy nauki i obrazovaniya, 2015. № 4(16). S. 28–33.
18. Slyudyanskij rajon Irkutskoj oblasti: priroda, hozyajstvo i naselenie. Atlas (48 kart). Irkutsk: Izd-vo Instituta geografii im. V.B. Sochavy SO RAN, 2012. [Elektronnyj resurs – CD].
19. *Sochava V.B.* Vvedenie v uchenie o geosistemakh. Novosibirsk: Nauka, Sibirskoe otdelenie, 1978. 319 s.
20. *Sochava V.B., Volkova V.G., Druzhinina N.P. i dr.* Metod kompleksnoj ordinacii v landshaftovedenii i biogeocenologii // Dokl. In-ta geografii Sibiri i Dal'nego Vostoka. 1967. Vy'p. 14. S. 3–17.
21. *Frolov A.A., Cherkashin A.K.* Vysotnyj gradient kak kompleksnyj faktor formirovaniya mikrozonalitynosti landshaftov i serijnosti geosistem // Geografiya i prirodnye resursy. 2012. № 1. S. 14–24.
22. *Czvetkov V.Ya.* Geoinformacionnyj monitoring // Izv. vysshih uchebnyh zavedenij. Geodeziya i aerofotos'emka. 2005. № 5. S. 151–155.
23. *Cherkashin A.K. (red.)* Landshaftno-interpretsionnoe kartografirovaniye. Novosibirsk: Nauka, 2005. 424 s.
24. *Cherkashin A.K.* Geografiya i geoinformatika // Geografiya i prirod. resursy. 2006. № 4. S. 19–29.
25. *Cherkashin A.K.* Geoinformatika – vysshaya geografiya // Ustojchivoe razvitiye territorij: teoriya GIS i prakticheskij opyt. V. 1. Kaliningrad: Mezhdunarodnaya kartograficheskaya associaciya, 2006. S. 6–11.

26. Cherkashin A.K. Geograficheskaya tochnost' i osobennosti metrologicheskogo modelirovaniya geoprostranstvennyh dannyh // Ukrains'kij metrologichniy zhurnal. 2014. № 2. S. 7–15.
27. Cherkashin A.K., Lesnyh S.I., Sklyanova I.P. Koordinacionnoe upravlenie prirodoohhrannoj deyatel'nost'yu regiona: konceptual'naya model' // Teoreticheskaya i prikladnaya ekonomika. 2019. № 3. S. 81–97. DOI 10.25136/2409-8647.2019.3.24404. URL: http://e-notabene.ru/etc/article_24404.html
28. E'kologicheskij atlas Bajkal'skogo regiona. Kompleksnyj modul' subregional'nyh i municipal'nyh kart. Usloviya i faktory formirovaniya ekologicheskoy obstanovki v Slyudyanskem rajone Irkutskoj oblasti. URL: <http://atlas.isc.irk.ru/>
29. Cantwell M.D., Forman R.T.T. Landscape graphs: Ecological modeling with graph theory to detect configurations common to diverse landscapes // Landscape Ecology. 1993. Vol. 8. № 4. P. 239–255.
30. Craig W., Harris T., Wiener D. (eds.). Community participation and geographical information systems. N.Y.: CRC Press. 2002. 383 p.
31. Johnston R.J. Geography and GIS // Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications, John Wiley & Sons, Ltd., 2006. P. 27–35.
32. Lesnykh S.I., Mel'nikova O.V. Generation of Databases and Visualization of Current Epidemiological Information for Purposes of a Medical-Ecological Monitoring of a Region // Geogr. Nat. Resour. 2019. V. 40. P. 115. <https://doi.org/10.1134/S1875372819020033> (data obrashheniya 12.04.2021).
33. Medvedev A., Telnova N., Alekseenko N., Koshkarev A., Kuznetchenko P., Asmaryan S., Narykov A. UAV-Derived Data Application for Environmental Monitoring of the Coastal Area of Lake Sevan, Armenia with a Changing Water Level // Remote sensing. 2020. № 12, P. 3821. DOI 10.3390/rs12223821
34. Ryu, Joo-Hyung et al. “EDITORIAL: Special Issue on “Advances in Remote Sensing and Geoscience Information Systems of the Coastal Environments.” // J. Coastal Res. 2019. P. V–XI. www.jstor.org/stable/26778930 (data obrashheniya 12.04.2021).
35. Thompson M.M., Arceneaux B.N. Public participation geographic information systems: A model of citizen science to promote equitable public engagement // Advancing equity planning now, N. Krumholz, K.W. Hexter (eds). Cornell University Press. 2018. P. 243–262. <https://www.jstor.org/stable/10.7591/j.ctv43vr3d.16> (data obrashheniya 12.04.2021).
36. Vannieuwenhuyze B. Pixels or Parcels?: Parcel-Based Historical GIS and Digital Thematic Deconstruction as Tools for Studying Urban Development // Mapping Landscapes in Transformation: Multidisciplinary Methods for Historical Analysis. Leuven University Press Publisher, 2019. P. 217–236. <https://www.jstor.org/stable/j.ctvjsf4w6.12> (data obrashheniya 12.04.2021).
37. Yano K. GIS and quantitative geography // GeoJ. The contribution of GIS to geographical research. 2000. V. 52. № 3. P. 173–180.

УЯЗВИМОСТЬ ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР К ПЕРЕУВЛАЖНЕНИЮ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В НЕЧЕРНОЗЕМЬЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ И ВАРИАНТЫ АДАПТАЦИИ

© 2021 г. М. В. Николаев*

Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт Петербург, Россия

*E-mail: clenrusa@mail.ru

Поступила в редакцию 30.11.2020 г.

После доработки 17.05.2021 г.

Принята к публикации 20.05.2021 г.

Оценивается воздействие избытка атмосферной влаги на устойчивость растениеводства при ожидаемом в ближайшем будущем изменении климата в Нечерноземье Европейской России. Акцент сделан на полевых культурах, так как они имеют важное продовольственное значение и являются кормовой базой для ведения молочного животноводства. Их уязвимость к переувлажнению охарактеризована повторяемостью лет со значениями гидротермического коэффициента Г.Т. Селянинова (ГТК), превышающими 1.8, которые соответствуют внешним условиям для возникновения полегания. С использованием транзитивных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), обладающих полнотой описания физических механизмов и связей внутри модельных блоков, оценено изменение температуры воздуха, количества осадков и значений ГТК для десятилетия 2021–2030 гг. Показано, что при реализации сценария контролируемого выброса парниковых газов в атмосферу, отвечающего инициативам ООН для обеспечения устойчивого развития до 2030 г., наиболее уязвимой к эффектам переувлажнения оказывается северная часть Нечерноземья Европейской России. Появление резкого переувлажнения посевов также может иметь место и в средней части этой зоны. Обсуждается ряд адаптационных мер и стратегий, направленных на смягчение негативных проявлений изменения климата.

Ключевые слова: Нечерноземье Европейской России, полевые культуры, переувлажнение, транзитивные МОЦАО, оценка уязвимости, варианты адаптации

DOI: 10.31857/S0869607121040030

ВВЕДЕНИЕ

Высокоурожайные полевые культуры – продовольственные (озимая пшеница и озимая рожь), зернофуражные (озимый райграс, некоторые сорта пшеницы и ржи), силосные (кукуруза и подсолнечник на зеленую массу) и стеблевые сеянные травы на сенаж в силу их морфометрических параметров часто подвержены полеганию в избыточно влажных условиях, возникающих в Нечерноземье Европейской территории России (ЕТР) [18]. Переход на короткостебельные виды и сорта лишь отчасти обеспечивает достижение высоких и устойчивых урожаев, поскольку их биологическая продуктивность ниже: например, продуктивность травостоев из клевера и люцерны уступает продуктивности стеблевых злаковых травостоев более чем в два раза [5].

В то же время, многие из перечисленных культур составляют ценную кормовую базу для ведения молочного животноводства, обеспечивающего население высококачественной молочной продукцией. Прослеживающееся повышение температурного фо-

на служит фактором, способствующим продвижению к северу посевов высокоурожайных культур и, следовательно, увеличению потенциала продуктивности сельскохозяйственных земель. Но в целом лимитирующими факторами для выращивания зерновых и кормовых культур в этой зоне, с одной стороны, остаются ограниченные ресурсы тепла, с другой — погодные условия, приводящие к избытку атмосферной влаги. Поэтому по агроклиматической классификации Г.Т. Селянинова, Нечерноземье ЕТР отнесено к зоне избыточного увлажнения со значениями ГТК ≥ 1.3 [21]. Приведенный по данным З.А. Шостак в [23] анализ типов погод в Нечерноземье ЕТР показал, что для озимой ржи в период ее созревания (июль) оптимальное количество осадков составляет 30 мм при средней температуре воздуха около 17.0°C, а для мягкой озимой пшеницы такими показателями являются: сумма осадков 50 мм и средняя температура воздуха немногим выше 16.0°C. Согласно данным из агроклиматических справочников, у силосных культур интенсивное листообразование происходит в июле при средней температуре воздуха от 16.5 до 19.0°C, а интенсивный рост стебля сенажных трав при средней температуре воздуха от 16.5 до 17.5°C, в обоих случаях при осадках от 40 до 50 мм [1]. То есть оптимум условий в период формирования урожая культур лежит в пределах $0.7 < \text{ГТК VII} < 1.1$.

Однако при нарастающих изменениях климата потери их урожая из-за продолжительных и обильных дождей становятся сопоставимыми с потерями от появления бездождий¹, но при этом существенно снижается и качество полученного урожая [3, 14, 23, 34]. Далее приводимые оценки показывают, что в ожидаемых климатических условиях уязвимость полевых культур к эффектам переувлажнения может возрасти. Поэтому понадобится применение комплекса адаптационных мер, чтобы обеспечить устойчивое производство растениеводческой продукции и сведение к минимуму ущерба от негативных проявлений изменения климата.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В пределах Нечерноземья ЕТР выбрано десять станций, относящихся к хвойно-широколиственно-лесной (Трубчевск), южно-таежно-лесной (Смоленск, Псков, Кострома и Вологда) и средне-таежно-лесной (Вытегра, Петрозаводск, Шенкурск, Котлас и Сыктывкар) зонам согласно природно-сельскохозяйственному районированию территории России [19]. Длительные метеорологические наблюдения на этих станциях обеспечили возможность составить непрерывные ряды средних месячных значений температуры воздуха и помесячных сумм осадков с 1945 по 2017 гг. На их основе рассчитаны значения гидротермического коэффициента Г.Т. Селянинова [21], рекомендованного Росгидрометом и ВМО для проведения агроклиматических исследований и представляемого в общем виде:

$$\text{ГТК} = \frac{\sum P}{0.1 \sum T},$$

где: $\sum P$ — сумма выпавших осадков (мм) и $\sum T$ — сумма температур воздуха (°C) за период (или отрезок вегетации) со среднесуточной температурой воздуха выше 10°C.

Для оценки отрицательного воздействия избыточного увлажнения на посевы удобно воспользоваться значениями ГТК, превышающими его среднюю многолетнюю величину. По долговременным обследованиям состояния посевов установлено, что надежным индикатором условий возникновения их корнево-стеблевого полегания слу-

¹ В условиях Нечерноземья ЕТР бездождья непродолжительны, и при их появлении происходит иссушение верхнего слоя почвы, тогда как в нижних слоях запасы влаги остаются высокими. Устранение отрицательного воздействия бездождий на растения достигается орошением. В то же время, затяжные дожди или ливни могут приводить к снижению урожая (относительно средней его величины) для сеянных трав на 25–35%, для озимых колосовых на 40–60%, а для гибридов кукурузы в отдельные годы на 80%.

жит пороговое значение ГТК = 1.8 [18]. Следуя этому критерию, а также исходя из сравнения значений ГТК в июле, когда формируется конечный урожай мелкозернистых озимых злаков и происходит интенсивное накопление зеленой массы силосных и сенажных культур, для характеристики степени полегания нами разработаны градации ГТК: $1.8 < \text{ГТК VII} \leq 2.5$ – выраженное полегание; $2.5 < \text{ГТК VII} \leq 3.5$ – сильное полегание; $3.5 < \text{ГТК VII} \leq 4.5$ – очень сильное полегание [15]. Градации отражают усиливающееся воздействие обильных осадков на степень полегания культур из-за возникновения условий, которые одновременно приводят к разжиженному состоянию поверхности почвы и увеличению механической нагрузки на стебель. Такому состоянию почвы способствует преобладание суглинистых почв со свойственной им слабой водопроницаемостью и часто близкое к поверхности расположение зеркала грунтовых вод [20].

Эмпирический анализ данных с применением математических методов их обработки позволил выявить наблюдаемые тенденции в изменении температуры воздуха и количества осадков в теплое время года в пределах Нечерноземья ЕТР. Так, в изменяющемся климате наблюдается увеличение средней месячной температуры воздуха в июле. Для временного отрезка 1982–2017 гг. (по сравнению с времененным отрезком 1945–1981 гг.) такое увеличение для выбранных станций составляет от 0.6 до 1.3°C, тогда как для других летних месяцев отличия в средних значениях температур менее выражены. Для станций также проведено сравнение хода 7-летних скользящих средних значений температуры воздуха в июле за весь рассматриваемый период. Такое сравнение показало, что условия теплообеспеченности на северных станциях в последние два десятилетия приближаются к условиям теплообеспеченности на более южных станциях в ранние десятилетия. Например, по величине сумм температур условия в Петрозаводске приближаются к условиям в Костроме, в Вытегре к условиям в Смоленске, а в Пскове к условиям в Трубчевске [17].

Вместе с тем, в Нечерноземье ЕТР отмечается учащение экстремально высокого количества выпадающих осадков, включая июльские их суммы, из-за усиления циклонической активности в северной Атлантике [7–10, 29]. Это находит преломление в наблюдаемом расширении территорий, подверженных атмосферному переувожнению и изменении их конфигурации [11, 13]. Сопоставление гистограмм отклонений сумм сезонных осадков от тренда показало, что такие гистограммы для летних осадков в последующие после 1979 г. десятилетия отличаются положительной асимметрией, а рост величины стандартного отклонения обусловлен возрастающей частотой экстремально высоких их сумм [15]. С помощью функционального анализа, при котором ГТК представляется в виде функции от двух переменных, выявлен усиливающийся вклад обильных осадков в высокие значения ГТК в июле по сравнению с вкладом сумм температур. В свою очередь, это проявляется в увеличении тесноты регрессионных связей между возрастающими суммами июльских осадков и высокими значениями ГТК вследствие снижения остаточной дисперсии [17]. Однако в северной части Нечерноземья ЕТР очень высокие значения ГТК за июль фиксируются при суммах температур заметно выше их средних многолетних показателей [16]. Из сводных таблиц, помещенных в [15, 17], также следует, что процент лет с эффектами сильного и очень сильного полегания, отвечающими пороговым значениям ГТК выше 2.5 и 3.5, значительно возрос в среднетаежной зоне, для которой характерны подзолистые суглинистые почвы с признаками оглеения.

Оценка ожидаемой повторяемости переувожнения посевов в следующем десятилетии основывается на результатах численного моделирования климата по транзитивным моделям общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). При выборе МОЦАО предпочтение отдано таковым, которые отличаются полнотой описания физических механизмов и связей внутри модельных блоков. Отметим, что такими качествами обладают семейства моделей, созданных в известных центрах моделирования

глобального климата – Метеорологическом отделении Института им. М. Планка (Германия), Метеорологическом офисе Центра им. Дж. Хэдли (Великобритания) и Канадском центре климатического моделирования и анализа, а также модель Европейского Сообщества Earth3, широко применяемая в странах Европы в последние годы. Размеры и форма ячеек регулярных сеток моделей несколько отличаются. Последние версии моделей Института им. М. Планка имеют размер ячейки регулярных сеток по градусам широты и долготы $0.935^\circ \times 0.9375^\circ$; Канадского центра – $2.79^\circ \times 2.8125^\circ$; Центра им. Дж. Хэдли – $1.25^\circ \times 1.875^\circ$ (вытянутая ячейка). У европейской модели размер ячейки наименьший и составляет $0.702^\circ \times 0.703^\circ$. Между тем, использование моделей, созданных в других странах мира, оказывается затруднительным, так как их регулярные сетки лишь частично покрывают исследуемую нами территорию: например, модель CESM2 – WACCM Национального центра атмосферных исследований (NCAR, США), модель ACCESS – ESM1.5 Организации Содружества Научных и Индустриальных Исследований (CSIRO, Австралия) и модель MRI – ESM-2-0 Метеорологического научно-исследовательского института (Meteorological Agency, Япония).

Подробное описание выбранных моделей приводится в [30–32, 35]. Интерполяция модельных оценок из узлов регулярных сеток моделей в координаты станций осуществлена с помощью билинейной интерполяции. Модельные оценки отнесены для сценария контролируемого выброса парниковых газов в атмосферу RCP4.5² [25].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования привлечены результаты численного моделирования полей температуры воздуха и осадков по недавно созданным моделям и их модельным экспериментам, а именно:

- MPI – ESM1-2 – HR (модель Института им. М. Планка, модельные эксперименты 1 и 2);
- Had GEM3- GC31 – LL (модель Центра им. Дж. Хэдли, модельный эксперимент 1);
- EC – Earth3 (модель Европейского Сообщества, модельные эксперименты 9 и 15);
- Can ESM5 (модель Канадского центра климатического моделирования и анализа, модельные эксперименты 14, 23).

Предпочтение в выборе конкретных модельных экспериментов обусловлено полнотой представления оценок в моделируемых рядах текущего климата (1945–2014 гг.), достаточной длительностью моделируемых рядов на перспективу и очень незначительными, но все же существующими различиями в вариантах описания физических связей в модельных блоках. По британской модели пока выполнен один эксперимент, который позволяет получить оценки на перспективу после 2020 г. Но он дает возможность оценить значения температуры воздуха и ГТК в Смоленске и Трубчевске только для 6 лет внутри десятилетия 2021–2030 гг. по причине пропусков данных о температуре в узлах регулярной сетки. Так как по модели MPI – ESM1-2 – HR представлены результаты только двух экспериментов, для сбалансированности получаемых оценок также выбрано по два эксперимента по моделям EC – Earth3 и Can ESM5, но исходя из упомянутых выше критериев их отбора. Иначе говоря, какой-либо из моделей изначально не отдается приоритета.

Процедуру построения и обработки моделируемых временных рядов иллюстрирует рис. 1. В качестве примера выбрана станция Петрозаводск. На рисунке показаны ход

² Сценарий контролируемого выброса парниковых газов в атмосферу предполагает движение мирового сообщества по “Общему социально-экономический пути 5” (“Shared Socioeconomic Pathway 5” – SSP 245). Согласно этому сценарию, стремление к устойчивому развитию основывается на инновациях, способствующих быстрому технологическому прогрессу, и инвестициях в здравоохранение и образование в сочетании с эксплуатацией ресурсов ископаемого топлива и принятием ресурсоемкого и энергоемкого образа жизни во всем мире.

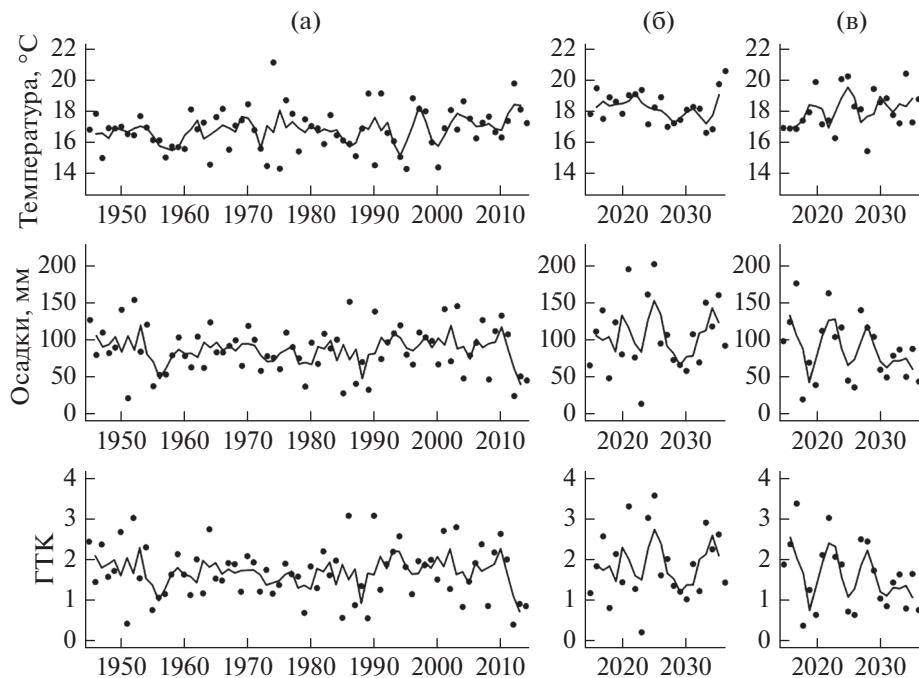


Рис. 1. Тенденции в изменении и вариабельности средней месячной температуры воздуха, количества осадков и значений ГТК в июле в Петрозаводске, оцененные по модели MPI – ESM1-2-HR (Институт им. М. Планка), и их проекции исходя из сценария контролируемого выброса парниковых газов в атмосферу. а – смоделированные ряды с 1945 по 2014 гг.; б – проекция на 2015–2036 гг. по модельному эксперименту 1; в – проекция на 2015–2036 гг. по модельному эксперименту 2; точки – ежегодные оценки; линии – 3-летние скользящие средние оценки.

Fig. 1. Trends in change and variability of mean monthly air temperatures, precipitation totals and HTC values in July at Petrozavodsk simulated by MPI – ESM1-2-HR model (Max Planck Institute) and their projections according to the scenario of controlled greenhouse gas emission into the atmosphere. a – modeled series since 1945 till 2014; б – projection from 2015 to 2036 by model run 1; в – projection from 2015 to 2036 by model run 2; dots – year to year estimates; lines – 3-yr moving average estimates.

переменных моделируемого текущего климата и их проекция для климата ближайшего будущего, настроенная на эмиссионный сценарий контролируемого выброса парниковых газов в атмосферу. Проекция получена по двум модельным экспериментам (1 и 2) с привлечением модели Института им. М. Планка MPI – ESM1-2 – HR. Тенденции в изменении и вариабельности климатических переменных более наглядно прослеживаются в динамике 3-летних скользящих средних, изображаемых на графиках в виде пилообразных линий.

Результаты обоих экспериментов показывают, что условия увлажнения в июле в Петрозаводске на десятилетии 2021–2030 гг. становятся более экстремальными по сравнению с 70-летним периодом с 1945 по 2014 гг., но с преобладанием “выбросов” в сторону очень высоких сумм осадков и значений ГТК при повышающемся температурном фоне.

Поскольку модельные эксперименты основаны на единых физических принципах описания связей в модельных блоках, а в рядах климатических переменных присут-

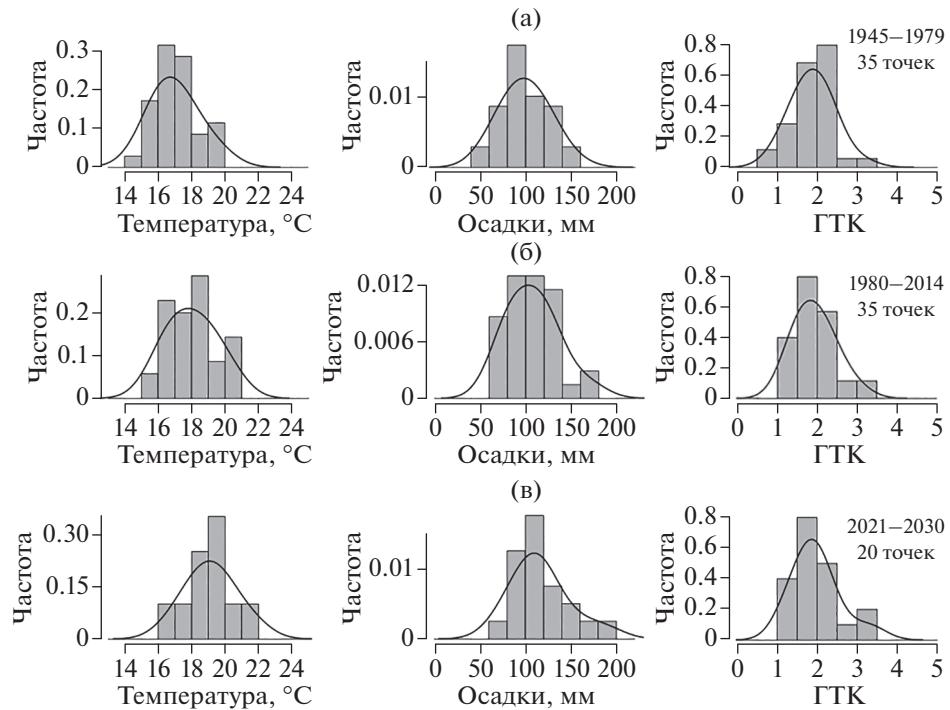


Рис. 2. Гистограммы распределений средней месячной температуры воздуха, количества осадков и ГТК в июле для станции Котлас, полученные по модели Can ESM5 (Канадский центр климатического моделирования и анализа): а – период 1945–1979 гг.; б – период 1980–2014 гг.; в – десятилетие 2021–2030 гг. (объединение экспериментов 14 и 23).

Fig. 2. Histograms of mean monthly air temperatures, precipitation totals and HTC values in July at Kotlas based on the simulation by Can ESM5 model (Canadian Center for Climate Modelling and Analysis): a – interval 1945–1979; b – interval 1980–2014; v – slice 2021–2030 (conjunction of run 14 and run 23).

стествует стохастичность, целесообразно объединить результаты экспериментов для каждой модели, тем самым увеличив количество случаев, и представить оценки в вероятностной интерпретации. На рис. 2–4 изображены гистограммы (с их слаженным методом сверстки видом) смоделированных оценок для двух периодов, отличающихся по степени антропогенного влияния на климат [2, 4, 6, 24] и для десятилетия 2021–2030 гг. с учетом выбранного эмиссионного сценария. Примеры расчетов взяты произвольно, но таким образом, чтобы наглядно продемонстрировать оценки по разным моделям, охватив всю природно-сельскохозяйственную зональность Нечерноземья ЕТР.

На рис. 2 приведены гистограммы смоделированных для периодов 1945–1979 гг., 1980–2014 гг. и десятилетия 2021–2030 гг. распределений средней месячной температуры воздуха, количества осадков и ГТК в июле по модели Канадского центра климатического моделирования и анализа Can ESM5 для станции Котлас (среднетаежная зона). Распределения для десятилетия 2021–2030 гг. построены путем объединения результатов двух модельных экспериментов – 14 и 23.

Из графиков видно, что распределения средней месячной температуры воздуха в июле для всех трех временных отрезков имеют почти симметричный вид, но при смещении моды в сторону более высокой температуры с появлением диапазона температурного максимума для десятилетия 2021–2030 гг. В распределении количества осад-

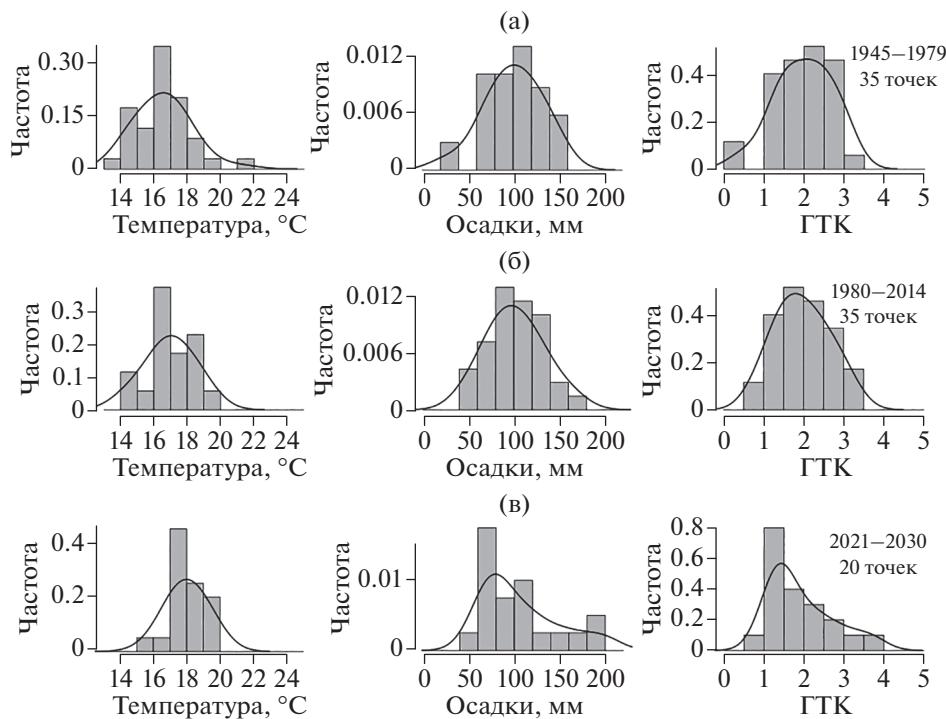


Рис. 3. Гистограммы распределений средней месячной температуры воздуха, количества осадков и ГТК в июле для станции Вологда, полученные по модели MPI – ESM1-2-HR (Институт им. М. Планка): а – период 1945–1979 гг.; б – период 1980–2014 гг.; в – десятилетие 2021–2030 гг. (объединение экспериментов 1 и 2).

Fig. 3. Histograms of mean monthly air temperatures, precipitation totals and HTC values in July at Vologda based on the simulation by MPI – ESM1-2-HR model (Max Planck Institute): а – interval 1945–1979; б – interval 1980–2014; в – slice 2021–2030 (conjunction of run 1 and run 2).

ков для периода 1980–2014 гг. прослеживается асимметрия в сторону их увеличения. Такая асимметрия становится выраженной для десятилетия 2021–2030 гг. с одновременным появлением диапазона очень высоких сумм июльских осадков. Для распределения ГТК на этом же временном отрезке характерно заметное увеличение частоты экстремально высоких значений ГТК (до 0.2). Для периодов 1945–1979 и 1980–2014 гг. их частота соответственно составляет 0.07 и 0.1.

Нужно отметить, что характер распределений отражает изменяющийся во времени вклад влажностного и термического факторов в величину экстремально высоких значений ГТК, и это подтверждается из данных наблюдений. Так, на станции Котлас в течение периода 1945–1979 гг. экстремально высокое значение ГТК = 4.18 в июле 1951 г. фиксируется при сумме температур, равной 450°C (85% средней многолетней величины) и сумме осадков, равной 188 мм (261% нормы). В течение периода 1980–2014 гг. экстремально высокое значение ГТК = 4.14 в июле 2000 г. достигается при сумме температур, равной 603°C (113% средней многолетней величины), и сумме осадков, равной 250 мм (347% нормы). Увеличение количества осадков на повышенном термическом фоне по сравнению с их количеством на пониженном термическом фоне, по-видимому, объяснимо дополнительным вкладом конвекции. Но все же роль адвективных

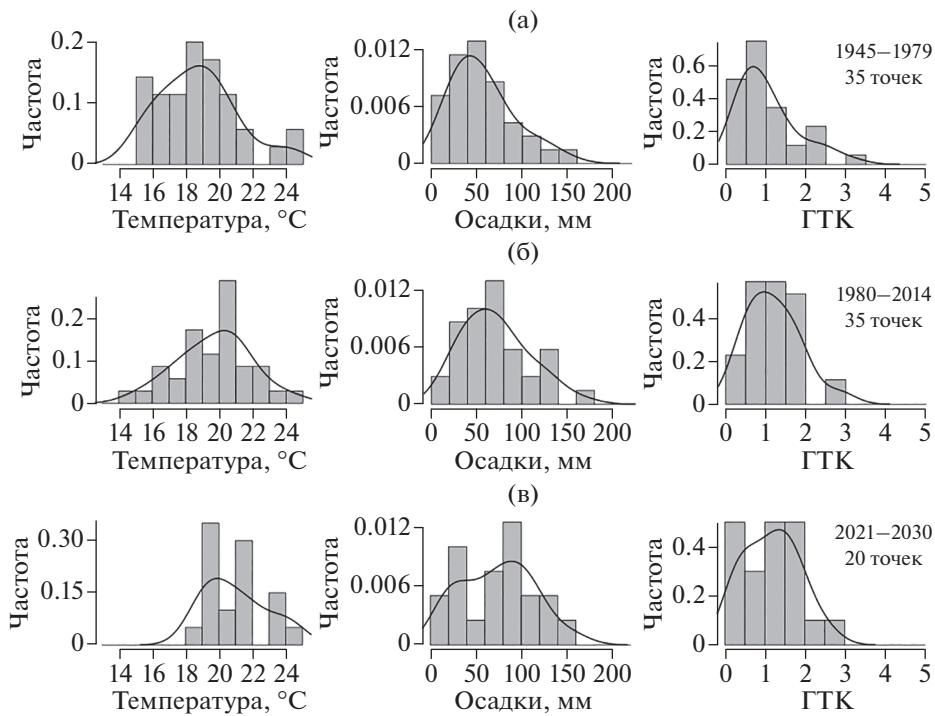


Рис. 4. Гистограммы распределений средней месячной температуры воздуха, количества осадков и ГТК в июле для станции Трубчевск, полученные по модели EC – Earth3 (Европейское Сообщество): а – период 1945–1979 гг.; б – период 1980–2014 гг.; в – десятилетие 2021–2030 гг. (объединение экспериментов 9 и 15).

Fig. 4. Histograms of mean monthly air temperatures, precipitation totals and HTC values in July at Trubchevsk based on the simulation by EC–Earth3 model (European Community): a – interval 1945–1979; б – interval 1980–2014; в – slice 2021–2030 (conjunction of run 9 and run 15).

осадков, обусловленных циклоничностью, остается определяющей, поскольку высокие значения ГТК в июле чаще отмечаются на пониженном термическом фоне.

Аналогичным образом, на рис. 3 показаны гистограммы смоделированных распределений средней месячной температуры воздуха, количества осадков и ГТК в июле по модели Института им. М. Планка MPI – ESM1-2-HR для станции Вологда (южно-таежно-лесная зона) с объединением для десятилетия 2021–2030 гг. результатов двух модельных экспериментов – 1 и 2.

В распределениях средней месячной температуры воздуха в июле также выявляется смещение моды в сторону более высокой температуры. Все распределения количества осадков показывают увеличение частоты высоких июльских осадков, а для десятилетия 2021–2030 гг. вероятность появления очень высоких сумм осадков. Это также отражается и в асимметрии распределения значений ГТК в июле для десятилетия 2021–2030 гг. с появлением диапазона значений ГТК > 3.5 , характеризующегося вероятностью 0.1.

По данным наблюдений в течение периода 1945–1979 гг. появление экстремально высокого значения ГТК = 3.06 в июле 1954 г. соответствовало сумме температур 588°C (111% средней многолетней величины) и сумме осадков 180 мм (247% нормы). В течение периода 1980–2014 гг. экстремально высокое значение ГТК = 3.18 в июле 1998 г.

отвечало сумме температур 516°C (99% средней многолетней величины) и сумме осадков 165 мм (226% нормы).

Рис. 4 иллюстрирует гистограммы смоделированных распределений средней месячной температуры воздуха, количества осадков и ГТК в июле по модели Европейского Сообщества ЕС – Earth3 для станции Трубчевск (зона хвойно-широколиственных лесов) с объединением для десятилетия 2021–2030 гг. результатов двух модельных экспериментов – 9 и 15.

В распределениях средней месячной температуры воздуха в июле в целом присутствует смещение моды в сторону более высокой температуры. Однако вид гистограммы для периода 1980–2014 гг. существенно отличается от ее вида для десятилетия 2021–2030 гг. В первом случае наблюдается преобладание диапазонов с температурой воздуха ниже 20°C , тогда как во втором случае, наоборот – с температурой воздуха выше 20°C при отсутствии диапазонов с температурой воздуха ниже 18°C . Распределения количества июльских осадков показывают смещение моды в сторону высоких их сумм при прослеживающейся бимодальности для десятилетия 2021–2030 гг. за счет заметного увеличения частоты сумм осадков в диапазоне от 20 до 40 мм и в диапазоне от 80 до 100 мм. Распределение ГТК для десятилетия 2021–2030 гг. имеет более плоскую вершину вследствие равенства частот для диапазонов ГТК < 0.5 и $1.0 < \text{ГТК} < 2.0$.

В течение периода 1945–1979 гг. экстремально высокое значение ГТК = 3.31 в июле 1979 г. отмечалось при сумме температур, равной 477°C (83% средней многолетней величины), и сумме осадков, равной 158 мм (193% нормы). В течение периода 1980–2014 гг. экстремально высокое значение ГТК = 3.55 в июле 1984 г. соответствовало сумме температур, равной 489°C (85% средней многолетней величины), и сумме осадков, равной 174 мм (212% нормы). Близкое количество осадков, равное 170 мм, также наблюдалось в июле 1999 г., но при сумме температур, равной 642°C (111% средней многолетней величины).

На повышающемся температурном фоне тенденции к росту частоты высоких осадков и значений ГТК для десятилетия 2021–2030 гг. (по сравнению с предшествующими двумя 35-летними периодами) прослеживаются и для других станций. Так, по модели Can ESM5 для Шенкурска обнаруживается появление дополнительного диапазона осадков от 200 до 220 мм и значений ГТК от 3.5 до 4.0 (при вероятности 0.1). По модели MPI – ESM1-2-HR для Петрозаводска предсказывается появление двух дополнительных диапазонов осадков от 180 до 200 мм и от 200 до 220 мм и значений ГТК от 3.0 до 3.5 (при вероятности 0.3) и от 3.5 до 4.0 (при вероятности 0.1). По модели ЕС – Earth3: для Сыктывкара прогнозируется появление дополнительного диапазона осадков от 180 до 200 мм и увеличение частоты значений ГТК от 3.0 до 3.5 (при вероятности 0.3); для Вытегры – увеличение частоты осадков в диапазоне от 140 до 160 мм и значений ГТК от 2.0 до 2.5 (при вероятности 0.5); для Костромы – увеличение частоты осадков в диапазоне от 120 до 140 мм и значений ГТК от 2.0 до 2.5 (при вероятности 0.4).

Но ряд модельных экспериментов не позволяет выявить тенденции к росту частоты высоких сумм осадков и значений ГТК для десятилетия 2021–2030 гг. Например, по модели Had GEM3-GC3.1 – LL в Вологде предсказывается учащение сумм осадков в диапазоне от 60 до 80 мм и значений ГТК от 1.0 до 1.5 (при вероятности 0.7). Модель Can ESM5 для Пскова выявляет рост повторяемости еще более низких сумм осадков в диапазоне от 40 до 60 мм и значений ГТК от 0.5 до 1.0 (при вероятности 0.8). Модель MPI – ESM1-2-HR для Трубчевска также показывает учащение повторяемости сумм осадков в диапазоне от 40 до 60 мм и значений ГТК от 0.5 до 1.0 (при вероятности 0.5).

Для того, чтобы судить о достоинствах или недостатках каждой модели, которые состоят в степени отличия описываемого текущего климата от действительного, осуществлена верификация выбранных моделей. Для оценки точности воспроизведения моделями характеристик реального климата в табл. 1–3 приведены разности между

смоделированными и фактическими значениями осредненных климатических переменных за период с 1945 по 2014 гг. (за 70 лет) для станций Нечерноземья ЕТР.

Как видно из данных табл. 1, наименьшие расхождения между оцененной и фактической нормой июльских осадков достигаются по модели EC – Earth3 (для некоторых станций погрешность расчета составляет менее 5%). Модель MPI – ESM1-2-HR обеспечивает наибольшую близость смоделированных норм июльских осадков их фактическим нормам только для двух южных станций.

Если сравнить смоделированное количество осадков с наблюдаемым их количеством в последующие годы: 2015, 2016 и 2017 гг., то также можно обнаружить, что наиболее часто очень близкое (менее ± 10 мм) или полное совпадение смоделированных и наблюденных сумм осадков достигается моделью EC – Earth3 – 14 случаев. Для модели MPI – ESM1-2-HR число таких случаев – 9; для модели Can ESM5 – 8 и для модели Had GEM3-GC3.1 – LL.

Табл. 2 показывает, насколько отличаются смоделированные и реальные величины средней многолетней температуры воздуха в июле. Из данных этой таблицы следует, что наименьшие расхождения в величинах температуры воздуха обеспечиваются моделями Can ESM5 и MPI – ESM1-2-HR (в среднем погрешность находится в пределах ± 0.5 – 0.7°C). Но если модель Can ESM5 показывает преобладание положительных отклонений, то модель MPI – ESM1-2-HR – наоборот, отрицательных отклонений. Модели Had GEM3-GC3.1 – LL и EC – Earth3 температуру воздуха несколько занижают, в особенности модель Had GEM3-GC3.1 – LL.

Сравнение по трем последующим годам после 2014 г. также показало, что очень близкое (менее 0.5°C) или полное совпадение между смоделированными и наблюдаемыми величинами июльской температуры воздуха достигается моделью Can ESM5 в 7 случаях, а моделью MPI – ESM1-2-HR в трех случаях. По модели EC – Earth3 в пяти случаях расхождения составляют менее 1°C , в то время как модель Had GEM3-GC3.1 – LL дает более выраженную погрешность.

В табл. 3 сведены невязки значений ГТК – показателя влаго- (тепло) обеспеченности культуры, вклад количества осадков в величину которого является определяющим. Видно, что наименьшие расхождения в значениях ГТК выявляются по моделям EC – Earth3 и MPI – ESM1-2-HR.

За 2015, 2016 и 2017 гг. несущественные отличия (менее 0.1) или совпадения смоделированных и рассчитанных по данным наблюдений значений ГТК за июль обеспечиваются моделью EC – Earth3 в 13 случаях, моделью Can ESM5 в 9 случаях, моделью MPI – ESM1-2-HR в 6 случаях и моделью Had GEM3-GC3.1 – LL в трех случаях.

В целом из приведенных в табл. 1–3 отклонений можно заключить, что моделями преимущественно воспроизводятся более влажные климатические условия, чем в реальности. В этом отношении представляет интерес проверить, в какой мере описываемое моделями экстремально высокое количество осадков в июле соответствует наблюдаемому максимуму июльских осадков за весь рассматриваемый период с 1945 по 2017 гг. Проверка такого соответствия показала, что для Котласа, Вытегры и Смоленска максимумы смоделированных осадков всегда оказываются меньше наблюденных максимумов. Для Петрозаводска в четырех случаях, а для Костромы и Трубчевска в одном случае смоделированные максимумы превышают действительные максимумы только по модели Had GEM3-GC3.1 – LL. Завышения фактических максимумов сумм осадков для остальных станций распределяются следующим образом: моделью EC – Earth3 – 2 раза (по одному для Шенкурска и Вологды); моделью MPI – ESM1-2-HR – 5 раз (для Шенкурска и Сыктывкара – дважды, для Пскова – один раз); моделью Can ESM5 – 5 раз (для Пскова – дважды, для Шенкурска, Сыктывкара и Вологды – по одному разу) и моделью Had GEM3-GC3.1 – LL – 4 раза (для Шенкурска – дважды, для Вологды и Пскова – по одному разу).

Таблица 1. Точность воспроизведения нормы ипольских осадков моделями (разность между смоделированными и фактическими величинами; минимальные отклонения по станциям выделены жирным шрифтом)

Table 1. The reproduction accuracy of the July precipitation norm by models (the difference between simulated and real values; the minimum deviations by station are shown in bold)

Станция	Широта	Долгота	Реальная норма (Р), мм	Разность Р(P(MP1-ESM1-2 – HR) – Р, мм	Р(EC-Earth3) – Р, мм	Р(GEM3-GC3.1-L1) – Р, мм	Р(HadGEM3-GC3.1-L1) – Р, мм	Р(CanESM5) – Р, мм	Разность P(CanESM5) – Р, мм
Петрозаводск	61.8° с.ш.	34.3° в.д.	73.65	13.73	-2.16		33.77		21.95
Вытегра	61.0° с.ш.	36.4° в.д.	76.63	23.33	1.06		36.40		22.09
Шенкурск	62.1° с.ш.	42.9° в.д.	68.21	26.49	19.00		30.33		28.15
Котлас	61.2° с.ш.	46.7° в.д.	72.15	23.71	13.32		25.89		31.78
Сыктывкар	61.7° с.ш.	50.8° в.д.	71.33	26.59	11.79		24.90		24.41
Вологда	59.3° с.ш.	39.9° в.д.	72.67	27.77	16.17		27.07		37.41
Кострома	57.7° с.ш.	40.8° в.д.	73.32	38.15	3.96		20.74		41.44
Псков	57.8° с.ш.	28.4° в.д.	75.71	26.04	0.60		14.34		18.74
Смоленск	54.5° с.ш.	32.9° в.д.	90.99	10.01		-14.73	-12.82		22.80
Трубчевск	52.6° с.ш.	33.8° в.д.	82.01	2.59		-20.70	-16.78		13.85

Таблица 2. Точность воспроизведения средней многолетней температуры воздуха в июле моделями (разность между смоделированными и фактическими величинами; минимальные отклонения по станциям выделены жирным шрифтом)

Table 2. The reproduction accuracy of the mean annual air temperature in July by models (the difference between simulated and real values; the minimum deviations by station are shown in bold)

Станция	Широта	Долгота	Реальная средняя (\bar{T}), $^{\circ}\text{C}$	Разность $T(\text{MPI-M1-2 - HR}) - \bar{T}$, $^{\circ}\text{C}$	Разность $T(\text{EC-Earth3}) - \bar{T}$, $^{\circ}\text{C}$	Разность $T(\text{Had GEM3-GC3.1 - LL}) - \bar{T}$, $^{\circ}\text{C}$	Разность $T(\text{CanESM5}) - \bar{T}$, $^{\circ}\text{C}$
Петрозаводск	61.8° с.ш.	34.3° в.д.	16.38	0.44	-1.65	-1.54	0.68
Вытегра	61.0° с.ш.	36.4° в.д.	16.93	-0.33	-1.85	-1.83	0.12
Шенкурск	62.1° с.ш.	42.9° в.д.	17.37	-0.90	-2.60	-3.07	-0.39
Котлас	61.2° с.ш.	46.7° в.д.	17.15	-0.52	-1.94	-1.88	0.39
Сыктывкар	61.7° с.ш.	50.8° в.д.	17.08	-0.32	-2.15	-1.48	0.56
Вологда	59.3° с.ш.	39.9° в.д.	17.14	-0.39	-0.89	-1.42	0.67
Кострома	57.7° с.ш.	40.8° в.д.	18.07	-0.79	-0.96	-1.64	0.32
Псков	57.8° с.ш.	28.4° в.д.	17.78	-1.29	-1.36	-2.04	-0.32
Смоленск	54.5° с.ш.	32.9° в.д.	17.38	0.48	0.93	-0.43	1.37
Трубчевск	52.6° с.ш.	33.8° в.д.	18.62	0.10	0.96	-0.72	1.03

Таблица 3. Точность воспроизведения среднего многолетнего значения ГТК в июле моделями (разность между смоделированными и фактическими значениями; минимальные отклонения по станциям выделены жирным шрифтом)

Table 3. The reproduction accuracy of the mean annual HTC value in July by models (the difference between modeled and real values: the minimum deviations by station are shown in bold)

Станция	Широта	Долгота	Реальное среднее ГТК(Н)	Разность $H(MPI\text{-}M1\text{-}2} - H)$	Разность $H(EC\text{-Earth3}) - H$	Разность $H(Had GEM3\text{-GC3.1-LL}) - H$	Разность $H(Can ESM5) - H$
Петрозаводск	61.8° с.ш.	34.3° в.д.	1.48	0.22	0.13	0.92	0.34
Вытегра	61.0° с.ш.	36.4° в.д.	1.48	0.50	0.23	0.99	0.40
Шенкурск	62.1° с.ш.	42.9° в.д.	1.30	0.61	0.66	1.04	0.55
Котлас	61.2° с.ш.	46.7° в.д.	1.38	0.54	0.48	0.74	0.54
Сыктывкар	61.7° с.ш.	50.8° в.д.	1.39	0.54	0.46	0.59	0.37
Вологда	59.3° с.ш.	39.9° в.д.	1.40	0.58	0.42	0.68	0.61
Кострома	57.7° с.ш.	40.8° в.д.	1.36	0.76	0.16	0.53	0.66
Псков	57.8° с.ш.	28.4° в.д.	1.40	0.62	0.15	0.47	0.36
Смоленск	54.5° с.ш.	32.9° в.д.	1.72	0.13	-0.32	-0.21	0.25
Трубчевск	52.6° с.ш.	33.8° в.д.	1.46	0.02	-0.40	-0.31	0.14

Для оценок уязвимости полевых культур к переувлажнению в ближайшем будущем выбраны пороговые значения ГТК за июль, которые отвечают условиям возникновения разной степени полегания – соответственно: ГТК VII > 1.8, ГТК VII > 2.5 и ГТК VII > 3.5. Затем рассчитана доля лет с такими условиями, характеризующая повторяемость эффектов переувлажнения посевов. В табл. 4 представлено сравнение повторяемости лет с эффектами переувлажнения по данным, основанным на наблюдениях, с повторяемостью, оцененной по МОЦАО и спроектированной для десятилетия 2021–2030 гг.

Результаты сравнения показывают, что по разным моделям достигается разное расхождение между полученными оценками повторяемости лет с эффектами переувлажнения и реальной их повторяемостью. Например, модель Центра им. Хэдли HadGEM3-GC3.1 – LL дает значительное завышение доли таких лет для северных станций и значительное занижение для южных станций. В то же время, модель Европейского Сообщества ЕС – Earth3 обеспечивает достаточно высокую согласованность оцененного и реального процента лет для ряда станций в разных частях Нечерноземья ЕТР.

В табл. 4 выделены случаи, когда для десятилетия 2021–2030 гг. повторяемость лет с эффектами переувлажнения превышает их повторяемость для периодов 1945–1979 гг. и 1980–2014 гг. при одновременной близости оцененного по моделям и реального процентов лет для этих периодов. Для порового значения ГТК > 1.8 такие случаи выявляются по модели Европейского Сообщества ЕС – Earth3 для двух северных станций (Петрозаводск – 50% лет; Вытегра – 45% лет) и Костромы (40% лет). Кроме того, по модели Канадского центра климатического моделирования и анализа Can ESM5 предсказывается увеличение процента таких лет в Котласе (до 55% лет) и Сыктывкаре (до 48% лет).

Возрастающую повторяемость лет с эффектами резкого переувлажнения (ГТК > 2.5) на десятилетии 2021–2030 гг. демонстрируют три модели. Для Петрозаводска модель Европейского Сообщества ЕС – Earth3 и модель Института им. М. Планка MPI – ESM1-2 – HR дают одинаковую оценку: 20% лет. Для других станций оценки соответственно составляют: для Вытегры по модели Института им. М. Планка MPI – ESM1-2 – HR – 35% лет; для Сыктывкара по модели Европейского Сообщества ЕС – Earth3 – 25% лет; для Котласа по модели Канадского центра климатического моделирования и анализа Can ESM5 – 18% лет.

По модели Института им. М. Планка MPI – ESM1-2 – HR для десятилетия 2021–2030 гг. также индицируется пятипроцентная повторяемость лет с очень резким переувлажнением (ГТК > 3.5) в Петрозаводске, Вологде и Пскове, а по модели Канадского центра климатического моделирования и анализа Can ESM5 двухпроцентная повторяемость таких же лет в Шенкурске. Модель Центра им. Хэдли Had GEM3-GC3.1 – LL демонстрирует возрастание повторяемости сверхвлажных лет в Петрозаводске и Котласе, но нужно напомнить, что оценки по этой модели основываются на результате лишь одного модельного эксперимента.

Для двух южных станций увеличение повторяемости лет с эффектами переувлажнения для десятилетия 2021–2030 гг. (по сравнению с двумя прошлыми периодами) не прослеживается, хотя модель Европейского Сообщества ЕС – Earth3 и показывает равенство процента лет в Трубчевске для периода 1980–2014 гг. и десятилетия 2021–2030 гг.

Таким образом, в табл. 4 отражаются два аспекта. Первый аспект состоит в апробации моделей на точность воспроизведения получаемых оценок. Второй аспект относится к применимости моделей для оценок повторяемости экстремальных условий в изменяющемся климате: в данном случае, в появлении резкого избытка атмосферной влаги, приводящего к стрессовому состоянию растений. В этом отношении, несмотря на имеющиеся неопределенности в оценках, содержащихся в табл. 4 данные дают воз-

Таблица 4. Повторяемость эффектов переувлажнения посевов в периоды 1945–1979, 1980–2014 гг. и для десятилетия 2021–2030 гг. в разных частях Нечерноземья ЕТР (% лет)
Table 4. Recurrence of crop over-wetting effects within intervals of 1945–1981, 1982–2017 and for slice 2021–2030 in different parts of the Non-chernozem region of the European Russia (% of years)

Станция; координаты; субъект РФ	Значе- ния ГТКВII	Реальные значения		MPI-ESM1-2-HR		EC-Earth3		HadGEM3-GC3.1-LL		CanESM5	
		1945– 1979	1980– 2014	1945– 1979	1980– 2014	2021– 2030	1945– 1979	1980– 2014	2021– 2030	1945– 1979	1980– 2014
Петрозаводск 61,8° с.ш.; 34,3° в.д.	>1,8 >2,5 >3,5	29 11 3	26 9 0	37 17 5	54 0 2	50 10 1	39 10 0	50 20 45	77 49 89	59 35 71	50 20 49
Республика Карелия	>1,8 >2,5 >3,5	26 11 0	40 14 0	63 20 0	51 17 3	41 10 0	42 22 0	45 10 0	9 9 44	9 10 22	9 10 13
Вытегра 61,0° с.ш.; 36,4° в.д.	>1,8 >2,5 >3,5	11 0 0	14 6 0	20 3 0	35 3 0	10 1 2	22 0 2	10 0 3	29 11 0	22 0 0	29 13 0
Вологодская обл., север Шенкурск	>1,8 >2,5 >3,5	20 20 0	26 26 0	51 46 43	35 55 35	40 54 48	40 11 40	69 13 61	59 57* 50	43 47* 40	43 47 40
62,1° с.ш.; 42,9° в.д. Архангельская обл.	>1,8 >2,5 >3,5	3 6 0	3 6 0	26 31 0	10 19 0	19 23 2	20 3 0	46 9 9	38 6 6	22 0 0	20 13 0
Котлас	>1,8 >2,5 >3,5	20 14 14	23 9 3	54 31 31	43 23 23	35 10 10	48 16 19	40 10 10	61 45 45	50 25 25	50 20 20
61,2° с.ш.; 46,7° в.д. Архангельская обл., юг Сыктывкар	>1,8 >2,5 >3,5	23 14 23	37 9 9	54 31 31	60 23 10	40 18 18	46 19 19	56 25 25	72 28 28	7 0 16	7 0 16
61,7° с.ш.; 50,8° в.д. Республика Коми	>1,8 >2,5 >3,5	23 14 23	3 0 31	0 6 60	3 0 57	0 2 40	2 3 49	0 3 48	72 50* 30	47 33 65	0 0 52
Вологда 59,3° с.ш.; 39,9° в.д.	>1,8 >2,5 >3,5	29 20 0	26 17 0	26 20 5	20 17 1	19 19 6	19 10 6	32 10 0	21 0 6	0 0 0	0 0 0
Вологодская обл., юг Кострома	>1,8 >2,5 >3,5	29 31 31	31 66 60	66 40 40	55 20 20	34 11 11	32 12 12	40 5 5	47 20 20	33 26 26	33 0 0
57,7° с.ш.; 40,8° в.д. Костромская обл.	>1,8 >2,5 >3,5	14 14 6	6 3 3	3 3 0	3 0 0	0 2 0	0 3 0	0 0 0	49 23 33	46 17 33	46 0 0
Псков 57,8° с.ш.; 28,4° в.д.	>1,8 >2,5 >3,5	37 9 0	20 29 0	54 20 0	45 10 5	36 12 0	31 5 0	35* 23 0	49 17 0	46 10 3	46 17 1
Псковская обл.	>1,8 >2,5 >3,5	43 23 23	17 9 9	54 3 3	46 0 0	40 3 0	40 1 0	24 1 0	30 15 15	33 17 17	30 0 0
Смоленск 54,5° с.ш.; 32,9° в.д.	>1,8 >2,5 >3,5	34 20 0	31 11 0	37 6 0	23 5 0	10 0 0	1 1 0	8 0 0	7 0 0	7 0 0	7 0 0
Трубчевск	>1,8 >2,5 >3,5	34 20 0	31 11 0	37 6 0	23 5 0	10 0 0	1 1 0	15 5 5	17 5 5	13 0 0	14 0 0
Брянская обл.	>1,8 >2,5 >3,5	20 0 0	11 0 0	6 0 0	5 0 0	1 0 0	1 0 0	5 0 0	0 0 0	0 0 0	4 2 0

Примечание: жирным шрифтом выделены проценты лет с эффектами переувлажнения, превышающие для десятилетия 2021–2030 гг. таковые для двух прошлых периодов, знаком * выделены проценты лет с эффектами переувлажнения, превышающие для десятилетия 2021–2030 гг. таковые для периода 1980–2014 гг.

можность обозначить региональные различия в потенциальной подверженности полевых культур эффектам переувлажнения. Пространственная картина такова, что северная, более заболоченная часть Нечерноземья ЕТР может быть чаще подвержена переувлажнению, чем средняя и южная части. Например, это можно объяснить тем, что в условиях дальнейшего повышения температурного фона в северных районах испарение с избыточно увлажненной поверхности будет возрастать, чаще приводя к образованию конвективной облачности и выпадению конвективных осадков. Как следствие, суммарное количество получаемых осадков будет увеличиваться, о чём упоминалось ранее.

ВЫВОДЫ

Результаты выполненного исследования свидетельствуют о возможностях использования МОЦАО в качестве инструмента для оценок устойчивости полеводства в условиях будущего климата в целях упреждающей адаптации. Различия в полученных по моделям оценках объясняются тем, что выбранные модели отличаются между собой как пространственной разрешающей способностью, так и детальностью описания механизмов обратных связей, которые уточняются в процессе проведения модельных экспериментов. Моделируемые ими условия влагообеспеченности культур также имеют отличие от действительных – вероятно, по причине неточностей в описании процессов осадкообразования и переноса влаги. Это в итоге приводит к тому, что оцененная по моделям повторяемость лет с возникновением переувлажнения имеет расхождения с их повторяемостью по данным наблюдений. Но для высоких пороговых значений ГТК, которые индицируют резкое переувлажнение, достигается значительно лучшая сопоставимость.

Тем не менее, полученные оценки позволяют дифференцировать территорию Нечерноземья ЕЧР по степени подверженности полевых культур эффектам переувлажнения в ближайшем будущем. Наиболее уязвимыми оказываются сельскохозяйственные угодья в среднетаежной зоне, где низинные луга широко используются под культурные луго-пастбища, а земледелие сосредоточено в долинах рек. Индицируется и вероятность того, что в регионах с традиционно развитым луговодством в пределах южно-таежно-лесной зоны посевы однолетних сенажных трав, также как и посевы продовольственных, зернофуражных и силосных культур, могут испытать эффекты резкого переувлажнения. Для южной части Нечерноземья ЕТР, включающей зоны хвойно-широколиственных и широколиственных лесов, усугубляющееся переувлажнение посевов не прослеживается.

С агрономической точки зрения, выявление повторяемости лет со значениями ГТК за июль выше 2.5 и 3.5, которые отвечают условиям возникновения сильного и очень сильного полегания, оказывается особенно важным. При таких эффектах переувлажнения стеблевые культуры в очень большой мере или полностью утрачивают свои адаптивные возможности для последующего вероятного выпрямления. Вследствие этого резко затрудняется уборка полеглых посевов и в них обычно присутствуют разнообразные тли, что крайне отрицательно сказывается на величине и качестве урожаев.

В этой связи, ориентируясь на отечественный и зарубежный опыт ведения рациональной практики возделывания полевых культур в гумидных регионах [5, 12, 22, 26–28, 33] и принимая во внимание полученные на перспективу оценки, к мерам по смягчению негативных проявлений изменения климата следует отнести:

- повышение отдачи приемов обработки почвы, направленных на ускорение стекания избыточной воды (оптимизация глубины рыхления и частоты борозд; проведение осеннего лущения с прикатыванием для интенсификации поверхностного стока в весенний сезон);

- эффективное применение дренажных систем – увеличение пропускной способности дренажа закрытого типа и широкое применение систем открытого дренажа вследствие более частых и сильных дождей;
- оптимальный подбор сортов культур и видов сеяных трав, стебли которых обладают повышенной упругостью к механическим нагрузкам;
- выравнивание поверхности полей с учетом их уклона, а на низинных лугах – снижение технической дигрессии, применяя движители облегченной конструкции.

Одновременно в качестве адаптационных стратегий могут выступать:

- совершенствование методов и средств дистанционного зондирования в целях оперативного мониторинга состояния сельскохозяйственных угодий и посевов, включая оперативный контроль состояния мелиоративных систем и транспортных коммуникаций;
- усиленный агрохимический и фитосанитарный контроль для поддержания устойчивой продуктивности посевов в возникающих избыточно влажных условиях и с учетом подвижек в росте ресурсов теплообеспеченности;
- сдвиг в размещении полевых культур (расширение площадей под влаголюбивые и теплолюбивые культуры, например, такие как гречиха и подсолнечник – в хвойно-широколиственной и частично южно-таежной зонах; осушение низинных болот, почвы которых богаты органическими веществами, под создание культурных сенокосов с расширением видового состава высокопродуктивных сеяных трав – в среднетаежной зоне);
- внедрение системы гибкого страхования посевов, стимулирующей сельхозпроизводителей к расширению ассортимента выращиваемых высокоурожайных полевых культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроклиматические ресурсы Архангельской, Брянской, Вологодской, Костромской, Псковской, Смоленской областей; Карельской АССР и Коми АССР (справочники) Л.: Гидрометеоиздат, 1971–1974.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 58 с.
3. Грингоф И.Г., Клещенко А.Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Обнинск: ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2011. Т. I. С. 601–609.
4. Доклад Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 г. М.: Росгидромет, 2019. С. 10–14, 18–20.
5. Зотов А.А., Косолапов В.М., Кобзин А.Г., Трофимов И.А., Уланов А.Н., Шевцов А.В. Шельменкина Х.Х., Щукин Н.Н. Сенокосы и пастбища на осущенных землях Нечерноземья. Москва–Астана, 2012. 1198 с.
6. Катцов В.М., Школьник И.М., Ефимов С.В. Перспективные оценки изменений климата в российских регионах: детализация в физических и вероятностных пространствах // Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 68–81.
7. Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Влияние крупномасштабных мод атмосферной циркуляции на режим температуры и осадков в Арктике // Метеорология и гидрология. 2018. № 1. С. 5–21.
8. Куликова И.А., Круглова Е.Н., Киктев Д.Б. Крупномасштабные моды атмосферной изменчивости. Ч. II. Их влияние на пространственное распределение температуры и осадков на территории Северной Евразии // Метеорология и гидрология. 2015. № 4. С. 5–16.
9. Муравьев А.В., Куликова И.А. Взаимосвязь суммарных осадков над Евразией с центрами действия атмосферы Северного полушария и главными модами изменчивости температуры поверхности Северной Атлантики // Метеорология и гидрология. 2011. № 5. С. 5–16.
10. Нестеров Е.С. О формировании взрывных циклонов в северо-восточной части Атлантического океана // Метеорология и гидрология. 2010. № 10. С. 44–53.
11. Николаев М.В. Оценка смещения границ зон рискованного земледелия в условиях изменения климата // Изв. РГО. 2015. Т. 147. Вып. 1. С. 54–65.
12. Николаев М.В. Использование метода пространственно-временных аналогов для оценок уязвимости земледелия к воздействию климатических изменений // Изв. РГО. 2015. Т. 147. Вып. 2. С. 1–12.

13. Николаев М.В. Климатический мониторинг для оценок уязвимости сельскохозяйственных территорий к эффектам переувлажнения в Нечерноземной зоне Европейской России // Изв. РГО. 2017. Т. 149. Вып. 5. С. 4–16.
14. Николаев М.В. Уязвимость и адаптация полеводства в регионах России к факторам атмосферной засухи и избыточного увлажнения в условиях изменяющегося климата // Материалы Международной научной конференции, посвященной 85-летию Агрофизического НИИ “Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего”, Санкт-Петербург, 27–29 сентября 2017 г. СПб: ФГБНУ АФИ, 2017. С. 513–520.
15. Николаев М.В. Оценка изменяющегося вклада обильных осадков в рискованность земледелия в Нечерноземье Европейской России // Изв. РГО. 2018. Т. 150. Вып. 6. С. 1–14. <https://doi.org/10.1134/S0869607118060010>
16. Николаев М.В. Геостатистическая оценка рискованности земледелия России в условиях изменения климата // Материалы 2-й Международной научной конференции “Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего”, посвященной памяти акад. Е.И. Ермакова, Санкт-Петербург, 2–4 октября 2019 г. СПб: ФГБНУ АФИ, 2019. С. 631–639.
17. Николаев М.В. Влияние климатических изменений на продуктивность мелиорируемых земель // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием “Вклад агрофизики в решение фундаментальных задач сельскохозяйственной науки”, Санкт-Петербург, 1–2 октября 2020 г. СПб: ФГБНУ АФИ, 2020. С. 478–483.
18. Пасечнюк А.Д. Погода и полегание зерновых культур. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 212 с.
19. Природно-сельскохозяйственное районирование земельного фонда СССР. М.: Агропромиздат, 1986. 71 с.
20. Роде А.А. Водный режим почв и его регулирование. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 117 с.
21. Селянинов Г.Т. Принципы агроклиматического районирования СССР // Вопросы агроклиматического районирования СССР. М.: Изд-во МСХ СССР, 1958. С. 7–13.
22. Система ведения сельского хозяйства северо-западной зоны РСФСР. Л.: Колос, 1968. 592 с.
23. Справочник агронома по сельскохозяйственной метеорологии. Нечерноземная зона Европейской части РСФСР / Под ред. И.Г. Грингофа. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 527 с.
24. Climate change 2014 Synthesis Report / Ed. by The Core Writing Team, R. K. Pachauri, L. Meyer. WMO: Geneva, 2014. 132 p.
25. Climate Extremes and Their Implications for Impact and Risk Assessment / Ed. by J. Sillman, S. Sippel, S. Russo. Elsevier Inc., 2020. 355 p.
26. Eitzinger J., Utset A., Trnka M., Zalud Z., Nikolaev M., Uskov I. Weather and climate and optimization of farm technologies at different input levels // Managing Weather and Climate Risks in Agriculture / M.V.K. Sivakumar, R. Motha (eds.). Springer, 2007. P. 141–170.
27. Eitzinger J., Thaler S., Kubu G., Alexandrov V., Utset A., Mihailovic D.T., Lalic B., Trnka M., Zalud Z., Semiradova D., Ventrella D., Anastasiou D.P., Medany M., Altaher S., Olejnik J., Lesny J., Nemeshko N., Nikolaev M., Simota C., Cojocaru G. Vulnerability and Adaptation Options of European Agriculture // Global Environmental Change: Challenges to Science and Society in Southeastern Europe / V. Alexandrov, M.F. Gajdusek, C.G. Knight, A. Yotova (eds.). Springer, 2010. P. 139–161.
28. Eitzinger J., Kubu G., Thaler S., Glauner J., Alexandrov V., Utset A., Mihailovic D.T., Lalic B., Trnka M., Zalud Z., Semiradova D., Ventrella D., Anastasiou D.P., Medany M., Altaher S., Olejnik J., Lesny J., Nemeshko N., Nikolaev M.V., Simota C., Cojocaru G. Adaptation Options to Climate Change Impacts in European Agriculture // Climate Change Adaptation: Ecology, Mitigation and Management / Adam L. Jenkins (ed.). Nova Science Publishers, 2011. P. 151–162.
29. Franzke C., Feldstein S.B. The continuum and dynamics of Northern Hemisphere teleconnection patterns // J. Atmospheric Science. 2005. V. 62. Iss. 9. P. 3250–3267.
30. Kuhbrodt T. et al. The Low-Resolution Version of HadGEM3 GC 3.1 model: Development and Evaluation for Global Climate // J. Advances in Modeling Earth Systems. 2018. V. 10. Iss. 11. P. 2865–2888. doi.org/
<https://doi.org/10.1029/2018MS001370>
31. Massonnet F. et al. Replicability of the EC-Earth3 Earth System Model under a Change in Computing Environment // J. Geoscientific Model Development. 2020. V. 13. P. 1165–1178. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1165-2020>
32. Muller W.A. et al. A Higher-resolution Version of the Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM 1.2-HR) // J. Advances in Modeling Earth Systems. 2018. V. 10. Iss. 7. P. 1383–1413. doi.org/
<https://doi.org/10.1029/2017MS001217>
33. Nikolaev M.V. Impact of Climate Change on Agriculture in North-West Russia and Adaptation Options // Advances in Environmental Modeling and Measurements / D.T. Mihailovic, B. Lalic (eds.). Nova Science Publishers, 2010. Ch. 20. P. 223–231.

34. *Nikolaev M.V.* Integrated Assessment of Change in Contribution of Excessive Moisture to Farming Risks in the Humid Zone of Western Russia // *J. Meteorology, Hydrology and Water Management*. 2020. V. 8. Iss. 1. P. 46–53.
<https://doi.org/10.26491/mhwm/111543>
35. *Swart N.C. et al.* The Canadian Earth System Model version 5 (Can ESM5.03) // *J. Geoscientific Model Development*. 2019. V. 12. Iss. 11. P. 4823–4873.
<https://doi.org/10.5194/gmd-12-4823-2019>

Vulnerability of Field Crops to Over-Wetting under Climate Change in the Non-chernozem Region of the European Russia and Adaptation Options

M. V. Nikolaev*

Agrophysical Research Institute, St Petersburg, Russia

**E-mail: clenrusa@mail.ru*

The impact of excessive atmospheric moisture on crop production sustainability under forthcoming climate change in the Non-chernozem region of the European Russia is evaluated. Focus is placed on field crops, as they have important food value and are the forage base for dairy farming. Their vulnerability to over-wetting is characterized by recurrence of years with the G.T. Selyaninov Hydrothermal Coefficient (HTC) values greater than 1.8, which correspond to external conditions for the lodging occurrence. Based on the results obtained from the model runs of the transient GCMs with complete description of the physical mechanisms and relationships inside the model blocks, the change in air temperatures, precipitation totals and the HTC values for slice 2021–2030 is assessed. It is shown that when the scenario of controlled greenhouse gas emission into the atmosphere is implemented (that corresponds with UN initiatives to ensure sustainable development until 2030), the northern part of the Non-chernozem region of the European Russia is revealed as most vulnerable to crop over-wetting effects. In the middle part of this zone, the effects of severe crop over-wetting may occur as well. In this regard, the set of adaptation measures and strategies is discussed aimed at mitigating the adverse impact of climate change.

Keywords: the Non-chernozem region of the European Russia, field crops, over-wetting, transient GCMs, vulnerability assessment, adaptation options

REFERENCES

1. Agroklimaticheskie resursy Arhangel'skoj, Bryanskoj, Vologodskoj, Kostromskoj, Pskovskoj, Smolenskoj oblastej; Karel'skoj ASSR i Komi ASSR (spravochniki). L.: Gidrometeoizdat, 1971–1974.
2. Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii. Obshee rezyume. M.: Rosgidromet, 2014. 58 s.
3. Gringof I.G., Kleshhenko A.D. Osnovy sel'skohozyajstvennoj meteorologii. Obninsk: FGBU "VNIIGMI-MCzD", 2011. T. I. S 601–609.
4. Doklad Rosgidrometa ob osobennostyakh klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2018 g. M.: Rosgidromet, 2019. S. 10–14, 18–20.
5. Zотов A.A., Косолапов V.M., Кобзин A.G., Трофимов I.A., Уланов A.N., Шевцов A.V., Шел'менкина X.X., Шхукин N.N. Senokosy i pastbishha na osushennyyh zemlyah Nечernozem'ya. Moskva–Astana, 2012. 1198 s.
6. Katczov V.M., Shkol'nik I.M., Efimov S.V. Perspektivnye ocenki izmenenij klimata v rossijskih regionax: detalizaciya v fizicheskikh i veroyatnostnyh prostranstvah // Meteorologiya i gidrologiya. 2017. № 6. S. 68–81.
7. Kiktev D.B., Kruglova E.N., Kulikova I.A. Vliyanie krupnomasshtabnyh mody atmosfernoj cirkulyacii na rezhim temperatury i osadkov v Arktike // Meteorologiya i hidrologiya. 2018. № 1. S. 5–21.
8. Kulikova I.A., Kruglova E.N., Kiktev D.B. Krupnomasshtabnye mody atmosfernoj izmenchivosti. Ch. II. Ih vliyanie na prostranstvennoe raspredelenie temperatury i osadkov na territorii Severnoj Evrazii // Meteorologiya i hidrologiya. 2015. № 4. S. 5–16.
9. Murav'ev A.V., Kulikova I.A. Vzaimosvyaz' summarnyh osadkov nad Evraziej s centrami dejstviya atmosfery Severnogo polushariya i glavnymi modami izmenchivosti temperatury poverhnosti Severnoj Atlantiki // Meteorologiya i hidrologiya. 2011. № 5. S. 5–16.

10. *Nesterov E.S.* O formirovaniy vzryvnyh ciklonov v severo-vostochnoj chasti Atlanticheskogo okeana // Meteorologiya i gidrologiya. 2010. № 10. S. 44–53.
11. *Nikolaev M.V.* Ocenka smeshcheniya granic zon riskovannogo zemledeliya v usloviyah izmeneniya klimata // Izv. RGO. 2015. T. 147. Vy'p. 1. S. 54–65.
12. *Nikolaev M.V.* Ispol'zovanie metoda prostranstvenno-vremennyh analogov dlya ocenok uyazvimosti zemledeliya k vozdejstviyu klimaticeskikh izmenenij // Izv. RGO. 2015. V. 147. Vyp. 2. S. 1–12.
13. *Nikolaev M.V.* Klimaticeskij monitoring dlya ocenok uyazvimosti sel'skohozyajstvennyh territorij k effektam pereuvlazhneniya v Nechernozemnoj zone Evropejskoj Rossii // Izv. RGO. 2017. V. 149. Vy'p. 5. S. 4–16.
14. *Nikolaev M.V.* Uyazvimost' i adaptaciya polevodstva v regionah Rossii k faktoram atmosfernoj zasuhi i izbytochnogo uvlazhneniya v usloviyah izmenyayushhegosya klimata // Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 85-letiyu Agrofizicheskogo NII “Tendencii razvitiya agrofiziki: ot aktual'nyh problem zemledeliya i rastenievodstva k tehnologiyam budushhego”, Sankt-Peterburg, 27–29 sentyabrya 2017 g. SPb: FGBNU AFI, 2017. S. 513–520.
15. *Nikolaev M.V.* Ocenka izmenyayushhegosya vklada obil'nyh osadkov v riskovannost' zemledeliya v Nechernozemye Evropejskoj Rossii // Izv. RGO. 2018. V. 150. Vyp. 6. S. 1–14. DOI 10.1134/S0869607118060010
16. *Nikolaev M.V.* Geostatisticheskaya ocenka riskovannosti zemledeliya Rossii v usloviyah izmeneniya klimata // Materialy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii “Tendencii razvitiya agrofiziki: ot aktual'nyh problem zemledeliya i rastenievodstva k tehnologiyam budushhego”, posvyashchennoj pamjati akademika E.I. Ermakova, Sankt-Peterburg, 2–4 oktyabrya 2019 g. SPb: FGBNU AFI, 2019. S. 631–639.
17. *Nikolaev M.V.* Vliyanie klimaticeskikh izmenenij na produktivnost' melioriruemyh zemel' // Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem “Vklad agrofiziki v reshenie fundamental'nyh zadach sel'skohozyajstvennoj nauki”, Sankt-Peterburg, 1–2 oktyabrya 2020 g. SPb: FGBNU AFI, 2020. S. 478–483.
18. *Pasechnyuk A.D.* Pogoda i poleganie zernovyh kul'tur. L.: Gidrometeoizdat, 1990. 212 s.
19. Prirodno-sel'skohozyajstvennoe rajonirovanie zemel'nogo fonda SSSR. M.: Agropromizdat, 1986. 71 s.
20. *Rode A.A.* Vodnyj rezhim pochv i ego regulirovanie. M.: Izd-vo AN SSSR, 1963. 117 s.
21. *Selyaninov G.T.* Principy agroklimaticeskogo rajonirovaniya SSSR // Voprosy agroklimaticeskogo rajonirovaniya SSSR. M.: Izd-vo MSX SSSR, 1958. S. 7–13.
22. Sistema vedeniya sel'skogo hozyajstva severo-zapadnoj zony RSFSR. L.: Kolos, 1968. 592 s.
23. Spravochnik agronomika po sel'skohozyajstvennoj meteorologii. Nechernozemnaya zona Evropejskoj chasti RSFSR / Pod red. I.G. Gringofa. L.: Gidrometeoizdat, 1986. 527 s.
24. Climate change 2014 Synthesis Report / Ed. by The Core Writing Team, R. K. Pachauri, L. Meyer. WMO: Geneva, 2014. 132 p.
25. Climate Extremes and Their Implications for Impact and Risk Assessment / Ed. by J. Sillman, S. Sippel, S. Russo. Elsevier Inc., 2020. 355 p.
26. *Eitzinger J., Utset A., Trnka M., Zalud Z., Nikolaev M., Uskov I.* Weather and climate and optimization of farm technologies at different input levels // Managing Weather and Climate Risks in Agriculture / M.V.K. Sivakumar, R. Motha (eds.). Springer, 2007. P. 141–170.
27. *Eitzinger J., Thaler S., Kubu G., Alexandrov V., Utset A., Mihailovic D.T., Lalic B., Trnka M., Zalud Z., Semiradova D., Ventrella D., Anastasiou D.P., Medany M., Altaher S., Olejnik J., Lesny J., Nemeshko N., Nikolaev M., Simota C., Cojocaru G.* Vulnerability and Adaptation Options of European Agriculture // Global Environmental Change: Challenges to Science and Society in South-eastern Europe / V. Alexandrov, M.F. Gajdusek, C.G. Knight, A. Yotova (eds.). Springer, 2010. P. 139–161.
28. *Eitzinger J., Kubu G., Thaler S., Glauninger J., Alexandrov V., Utset A., Mihailovic D.T., Lalic B., Trnka M., Zalud Z., Semiradova D., Ventrella D., Anastasiou D.P., Medany M., Altaher S., Olejnik J., Lesny J., Nemeshko N., Nikolaev M.V., Simota C., Cojocaru G.* Adaptation Options to Climate Change Impacts in European Agriculture // Climate Change Adaptation: Ecology, Mitigation and Management / A.L. Jenkins (ed.). Nova Science Publishers, 2011. P. 151–162.
29. *Franzke C., Feldstein S.B.* The continuum and dynamics of Northern Hemisphere teleconnection patterns // J. Atmospheric Science. 2005. V. 62. Iss. 9. P. 3250–3267.
30. *Kuhibrodt T. et al.* The Low-Resolution Version of HadGEM3 GC 3.1 model: Development and Evaluation for Global Climate // J. Advances in Modeling Earth Systems. 2018. V. 10. Iss. 11. P. 2865–2888. DOI 10.1029/2018MS001370
31. *Massonnet F. et al.* Replicability of the EC-Earth3 Earth System Model under a Change in Computing Environment // J. Geoscientific Model Development. 2020. V. 13. P. 1165–1178. DOI 10.5194/gmd-13-1165-2020

32. Muller W.A. et al. A Higher-resolution Version of the Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM 1.2-HR) // J. Advances in Modeling Earth Systems. 2018. V. 10. Iss. 7. P. 1383–1413. doi.org/10.1029/2017MS001217
33. Nikolaev M.V. Impact of Climate Change on Agriculture in North-West Russia and Adaptation Options // Advances in Environmental Modeling and Measurements / D.T. Mihailovic, B. Lalic (eds.). Nova Science Publishers, 2010. Ch. 20. P. 223–231.
34. Nikolaev M.V. Integrated Assessment of Change in Contribution of Excessive Moisture to Farming Risks in the Humid Zone of Western Russia // J. Meteorology, Hydrology and Water Management. 2020. V. 8. Iss. 1. P. 46–53. DOI 10.26491/mhw/111543
35. Swart N.C. et al. The Canadian Earth System Model version 5 (Can ESM5.03) // J. Geoscientific Model Development. 2019. V. 12. Iss. 11. P. 4823–4873. DOI 10.5194/gmd-12-4823-2019

ОЗЕРА КАК АККУМУЛЯТОРЫ МИКРОПЛАСТИКА НА ПУТИ С СУШИ В МИРОВОЙ ОКЕАН: ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2021 г. М. Б. Зобков^{a, *}, И. П. Чубаренко^{b, **}, Е. Е. Есиюкова^{b, ***},
Н. А. Белкина^{a, ****}, В. В. Ковалевский^{a, c, *****}, М. В. Зобкова^{a, *****},
Т. А. Ефремова^{a, *****}, Н. Е. Галахина^{a, *****}

^aИнститут водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

^bИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

^cИнститут геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

*E-mail: duet@onego.ru

**E-mail: irina_chubarenko@mail.ru

***E-mail: elena_esiukova@mail.ru

****E-mail: bel110863@mail.ru

*****E-mail: kovalevs@krc.karelia.ru

*****E-mail: rincalika21@yandex.ru

*****E-mail: efremova.nwpi@mail.ru

*****E-mail: kulakovanata@mail.ru

Поступила в редакцию 11.04.2021 г.

После доработки 21.06.2021 г.

Принята к публикации 25.06.2021 г.

В работе обобщена информация о закономерностях переноса и накопления микропластика в поверхностных водах суши в сравнении их с континентальными морями. Анализируются сведения, опубликованные в зарубежной и отечественной литературе. Представлен сравнительный анализ оригинальных материалов, полученный авторами в процессе исследований в Балтийском море и Онежском озере с применением идентичных методов определения микропластика, проведено сравнение результатов. Особое внимание удалено путям и объемам поступления микропластика в континентальные моря и Мировой океан. Выявлено статистически большее количество микропластика в донных осадках Онежского озера по сравнению с осадками Балтийского моря. Обсуждены возможные причины такого различия. Волокна являются наиболее распространенной формой микропластика в Балтийском море и Онежском озере. В донных осадках волокна аккумулируются преимущественно в зонах осадконакопления с низкой гидродинамической активностью (для Балтийского моря – глубины больше 80 м, для открытой части Онежского озера – больше 40 м, для крупных заливов – 20 м). Наблюдается связь содержания волокон с параметрами донных осадков. Термохалинная структура влияет на вертикальное распределение микропластика в водном столбе, замедляя его осаждение. В озерах аккумулируются преимущественно гидродинамически тяжелые частицы: полимеры с высокой удельной плотностью, фрагменты, гранулы, пленки. Доля волокон в общем пуле микропластика в осадках озера меньше, чем в море. Озера выполняют роль фильтров, очищая поверхностные воды суши по мере их поступления в континентальные моря и Мировой океан от микропластика, становясь при этом их первичным накопителем.

Ключевые слова: микропластик, загрязнение, донные отложения, Онежское озеро, Балтийское море

DOI: 10.31857/S0869607121040054

ВВЕДЕНИЕ

Пластик вошел в повседневную жизнь каждого жителя Земли, служит одним из наиболее востребованных материалов и используется практически во всех областях промышленности. Его прочность, легкость и долговечность в сочетании с низкой себестоимостью делают этот материал практически незаменимым при производстве широкого круга изделий бытового назначения, в строительстве и на производстве. Вместе с тем эти свойства создают повышенный экологический риск при неправильной утилизации пластиков. К тому же, низкая стоимость при производстве провоцирует небрежное отношение к “одноразовым” пластиковым предметам со стороны потребителей.

Общемировой выпуск пластика по разным оценкам составляет порядка 275–340 млн т/год [35, 57, 58], в то время как масштабы утилизации и переработки пластиков несопоставимо меньше. В Европе на утилизацию и вторичную переработку отправляется около 70% пластиковых отходов [57], в среднем в мире – 20% [29]. При этом в России перерабатывается не более 3–4% пластиковых отходов, а остальная часть захоранивается на полигонах или неорганизованных свалках [37].

Попавшие в природные условия пластиковые изделия постепенно разрушаются под действием УФ-излучения и механических воздействий, порождая огромное количество макро-, микро- и наночастиц, которые и несут в себе наибольшую опасность для окружающей среды [48]. Такие частицы, имеющие размер менее 5 мм, получили название “микропластик” [9, 63]. Они встречаются повсеместно: от глубин Мирового океана [64, 68] до полярных льдов [55] и удаленных горных озер [26].

Плотность большинства пластиков близка к плотности воды, поэтому синтетический мусор легко выносится с водосборной территории в озера и реки, а через них поступает в моря и Мировой океан [13, 58, 69]. Широко известным примером такого загрязнения выступает аккумуляция пластика в виде “мусорных” островов в центрах глобальных океанских круговоротов [50, 62], где концентрация микропластика (МП) достигает миллиона частиц на квадратную милю [13]. Около 12.7 млн т пластиковых отходов поступает с суши в Мировой океан ежегодно, в связи с чем пластиковый мусор был поставлен в один ряд с такими глобальными проблемами как изменение климата, закисление океана и разрушение озонового слоя [8].

Микрочастицы пластика имеют широкий размерный диапазон и могут длительное время оставаться на поверхности воды или в водном столбе, в результате чего многие живые организмы воспринимают их как источник пищи [19, 25]. Поскольку пластик не разлагается их ферментативной системой, само по себе проглатывание пластика представляет для них угрозу и может вызывать летальный исход [19, 25]. Однако наибольшее беспокойство вызывает тот факт, что частицы МП способны адсорбировать на своей поверхности многие загрязняющие вещества: тяжелые металлы [10], ПХБ [22], ДДТ, ПАУ и другие стойкие органические и неорганические загрязнители [27, 36], становясь их вторичным источником и проводником в тела водных организмов. Загрязняющие вещества, ассимилированные из пластиков, продвигаясь вверх по пищевой цепи, могут концентрироваться как в высших хищниках, так и в организме человека [34].

Поскольку воды суши относятся к основному источнику пластикового загрязнения Мирового океана [28], а также сами, являясь стратегическими водными ресурсами, подвержены влиянию этого нового загрязняющего вещества [32], изучение закономерностей его распространения в поверхностных водах весьма актуально.

СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проблемы, связанные с загрязнением водной среды частицами полимеров, привлекли интерес широкой научной общественности сравнительно недавно [28, 51, 62].

Основное внимание сейчас сосредоточено на загрязнении МП морей и Мирового океана, в то время как изучение вод суши находится в зачаточном состоянии [66], несмотря на то, что именно они могут являться одними из основных источников этого загрязнения для Мирового океана [13].

В настоящее время пилотные исследования МП в поверхностных водах и донных осадках проведены всего на нескольких озерах (Великие Американские озера Верхнее, Гурон, Эри; Женевское и Гарда в Европе; Хубсугул, в Монголии) и крупных реках (Дунай, Эльба, Мозель, Неккар, Рейн в Европе; Сан-Лоуренс и Лос-Анджелес в США) [21, 20]. Недостаток информации об этом новом виде загрязнения в поверхностных водах суши затрудняет оценку рисков для окружающей среды и требует проведения как мониторинговых исследований с целью установления количества МП, находящегося в поверхностных водах, так и поисковых исследований для обнаружения источников его поступления и путей распространения [66].

Также до сих пор непонятно, какой вклад вносит речной сток в общее загрязнение МП, однако очевидно, что реки являются важными проводниками этого загрязнения в моря [71]. Например, установлено, что в течение трех дней более двух миллионов частиц было вынесено со стоком двух рек Лос-Анджелеса [49], а Дунай выносит в Черное море более 1500 т пластиковых частиц в год [43]. Учитывая легкость пластиков и маленький размер частиц, количество их получается колossalным.

На основе опубликованных данных построена глобальная модель выноса пластика со стоком рек [42] и оценено, что в год в Мировой океан поступает от 1.15 до 2.41 млн т пластиковых отходов. Авторами [42] выявлена прямая связь между плотностью населения, объемом производства пластика и выносом пластиковых отходов, а также сильная неравномерность распределения выноса по сезонам: около 74% пластика сбрасывается в океан в период с мая по октябрь, а первые 20 наиболее загрязненных рек мира, в основном протекающие в Азии, вносят около 67% от общего загрязнения Мирового океана полимерами. Однако авторами также отмечается высокая консервативность предложенной модели [42], обусловленная недостатком натуральных данных, особенно по азиатскому региону, который является основным источником поступления пластиковых отходов в Мировой океан. Также в модели полностью отсутствуют данные по выносу пластика со стоком северных рек. Отмечается острая необходимость проведения детальных мониторинговых исследований на реках с использованием унифицированных протоколов отбора и обработки проб, выявления роли плотин и болот в процессах транспорта пластиков. Это в дальнейшем позволит более точно определить глобальный баланс пластиковых отходов, поступающих в Мировой океан. Следует отметить, что модель оценивает массу пластиковых отходов, которая наиболее велика для крупных пластиковых фрагментов, тогда как экологический вред пластикового мусора возрастает по мере уменьшения его размера и максимален для микро- и нанопластика [41].

Исследования, проведенные в Финском заливе Балтийского моря, показали, что основным источником поступления МП в залив является сток р. Невы [6]. Однако реки являются не только проводниками этого загрязнения. Модели переноса МП [12, 52] и натурные исследования речных осадков [16, 39] показали, что некоторая его часть задерживается в речных системах в результате осаждения, агрегирования с органическим и минеральным веществом и биообразования, что говорит о том, что пресноводные системы сами по себе подвержены влиянию этого загрязнителя [66].

Ливневые и дренажные воды могут являться основным источником МП, приносимого с водосбора [71]: наибольшие количества МП обнаруживались во время сезона дождей в устьях рек [31, 40, 49, 51, 65, 70]; также высокие количества мусора наблюдались в устьях малых рек во время выпадения осадков после длительных засушливых периодов [15]. К сожалению, подобные данные пока отсутствуют для северных широт

и пока не известно, как может меняться объем выноса МП в весенне полноводье при интенсивном таянии снегов.

Недавние исследования показали, что прибрежные затапливаемые территории, включая мангровые заросли [53] и солончаковые болота [67], могут быть важным накопителем МП, однако их роль в переносе этих частиц еще недостаточно исследована в связи с малым количеством натурных данных [71]. Плотная растительность заболоченных территорий может эффективно удерживать плавающий на поверхности МП [60], а высокое содержание органического вещества и избыточное увлажнение ускорять процесс обрастания частиц и их осаждение. Например, в некоторых работах отмечается, что детальные исследования болот и заболоченных территорий могут коренным образом изменить наши представления о количестве пластика, находящегося в окружающей среде [53, 71].

Первое исследование пойменных земель, проведенное в Швейцарии [59], где доля утилизации и вторичной переработки пластиков составляет около 100% и является самой высокой в мире, показали, что 90% проб почвы содержали микро- и мезопластик, хотя и в меньших количествах, нежели в донных осадках и пляжевых наносах в других районах мира. Кроме того, содержание МП в почвах речных пойм коррелировало с плотностью населения на водосборе этих рек [59].

Вопрос о стандартизации методик отбора и анализа МП стоит достаточно остро [30] и за прошедшие годы не стал менее актуальным: это подтверждают свежие публикации [20, 32, 46, 61]. В настоящее время многие исследовательские группы по всему миру пытаются разработать “стандартизированные” протоколы для отбора и обработки проб, однако пока стандартной методики не существует в связи с большим количеством различных вариантов и широким спектром региональных условий. Какие-то из методик лучше себя показывают в одних условиях, а какие-то в других. На основе исследований, проведенных с применением различной методической базы, ясно только одно: все экосистемы Земли в настоящий момент подвержены влиянию МП. Однако ввиду отсутствия общепринятых методов и географической неоднородности районов исследования на данный момент сведений о пространственном распределении этого типа загрязнения в глобальном масштабе крайне мало. Различия в протоколах и методиках между научными группами наблюдаются на всех стадиях исследования: начиная от размера ячеи сетей, использующихся при отборе проб воды, и, как следствие, различных размерных диапазонов собираемых частиц пластика и их количества, до несогласованности в способах их подсчета и определения (от визуального наблюдения невооруженным глазом до применения сложных спектрометрических приборов) [75]. Репрезентативность и воспроизводимость результатов анализа также во многих случаях не ясна и усиливается неточностью описания используемых при анализе методик, например, во многих случаях даже не указывается объем пробы, взятой для анализа, или ячей сетей, не говоря уже о внутреннем контроле качества и контроле внешнего загрязнения проб [30].

Многие отдельные исследования посвящены загрязнению воды, пляжей, эстуариев, донных осадков, однако они не могут внести свой вклад в понимание глобальной картины загрязнения [13]. Имеются различные экспериментальные методы выделения частиц МП из природных матриц (воды, песка, донных осадков) с применением плотностного разделения и растворения органического вещества, однако в каждом конкретном случае практическая их реализация различается, начиная от выбора мест отбора, объема пробы, сепарационного раствора, способа растворения органического вещества, типов полимеров, которые рассматриваются в качестве МП и т.д. [30, 75].

Сейчас в мировой практике используется довольно много различных способов отделения частиц микропластика от естественных осадков. В основном они состоят из нескольких шагов, при которых подавляющая часть естественных осадков удаляется из пробы [75]. Они включают разложение органического вещества с применением

различных окислителей (например, перекиси водорода, щелочей или ферментов), окисления минеральных остатков и хитина (например, с помощью растворов кислот), отделения минеральных фракций с помощью плотностного разделения в насыщенных растворах солей (поливольфрамат натрия, метавольфрамат лития, формиат калия, NaJ , ZnCl_2 и др.). Выделение частиц МП из обработанных таким образом проб, как правило, проводится с помощью микроскопов специально обученным персоналом. При принятии решения – является ли частица полимерной или имеет естественное происхождение – оператором рассматриваются такие ее характеристики, как цвет, упругость при надавливании, отсутствие клеточной структуры, однородность толщины для волокон и цвета для частиц [75]. Дополнительно проводятся химические исследования состава полимера с применением ИК и рамановской спектроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и др. Эти приемы позволяют с высокой степенью вероятности отделить полимерные частицы от частиц природных осадков.

Различными организациями предложены локальные протоколы, например, рекомендации национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA, США) [47], однако зачастую они разрабатываются для локального применения или применения к определенным видам сред и условий, и в каждом конкретном случае возникает необходимость их адаптации под задачи каждого исследования в отдельности [20, 75], что затрудняет сравнение результатов, полученных в разных географических районах. Ранее М.Б. Зобковым и Е.Е. Есюковой [73] для определения МП в морских осадках и береговых наносах был предложен модифицированный метод NOAA [47, 23], также успешно применяющийся за рубежом для экстракции волокон, пленок и фрагментов из озерных отложений [45]. Недавно метод был несколько доработан для повышения эффективности экстракции из озерных отложений, богатых органическим веществом [74]. Несмотря на все усилия, до настоящего времени не существует ни одного стандартизированного метода, однако имеются рекомендации по его разработке [33], что можно считать позитивным шагом в этом направлении. Вместе с тем разработка некоторого стандартизированного метода определения МП в воде, морских осадках, береговых наносах и почвах является по-прежнему приоритетной задачей [54, 75].

Таким образом, исследования пресноводных систем в плане их загрязнения МП проводятся в мире только около пяти лет и находятся на начальной стадии. В связи с этим основные аспекты, изложенные в обзоре [66], остаются до сих пор актуальными. К ним можно отнести следующие не разрешенные на настоящий момент задачи: разработка эффективной методики мониторинга МП в поверхностных водах суши (1); выявление основных факторов, обуславливающих наличие, количество и пространственное распределение МП в поверхностных водах (2); понимание процесса разложения пластиковых отходов и образования МП (3); оценка роли рек в выносе частиц пластика в океан (4); оценка и понимание процессов взаимодействия живых организмов с частицами пластиков (5); оценка влияния пластиков на качество воды, аквакультуру и водную экосистему в целом (6).

ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В ДОННЫХ ОСАДКАХ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ И ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Для изучения уровня загрязнения и процессов накопления МП в озерно-речных системах было проведено комплексное изучение его распределения в донных осадках Онежского озера (бассейн Балтийского моря) в месте впадения одного из крупнейших его притоков [72], а также сравнение полученных данных с результатами исследований, проведенных ранее в Балтийском море.

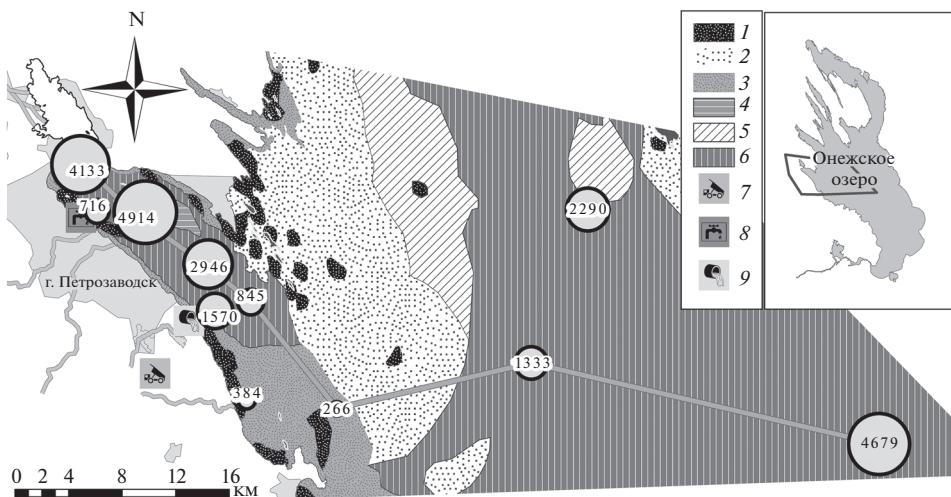


Рис. 1. Расположение станций отбора проб и содержание частиц МП (в шт./кг) в донных осадках Онежского озера. Типы донных осадков: 1 – камни, галька, гравий; 2 – осадки разной крупности; 3 – песок заиленный; 4 – крупноалевритовый ил; 5 – мелкоалевритовый ил; 6 – глинистый ил. Инфраструктура г. Петрозаводска: 7 – полигон захоронения бытовых отходов и активных илов; 8 – водозабор г. Петрозаводска; 9 – выпуск сточных вод очистных сооружений г. Петрозаводска.

Fig. 1. Sampling stations and microplastic content in Onego Lake sediments. Sediment types: 1 – rocks and cobble; 2 – mixed sediments; 3 – fine sand; 4 – coarse silt; 5 – fine silt; 6 – clay with silt. Infrastructure of Petrozavodsk city: 7 – waste dump; 8 – water supply station; 9 – waste water treatment plant.

Онежское озеро (рис. 1) является вторым по величине озером Европы с объемом воды 295 км³, средней глубиной 30 м и максимальной 120 м, площадью поверхности 9720 км² и водосборной территорией 53100 км², урезом воды 33 м н. у. м. [4]. Исследования проводились в районе впадения в озеро р. Шуя, второго по величине водосбора и годовому объему притока Онежского озера [4]. Население водосбора реки составляет около 21 тыс. человек, а г. Петрозаводска, расположенного на побережье озера, – около 280 тыс. человек. Таким образом, на изучаемой территории сосредоточено около трех четвертей населения всего водосбора озера (412 тыс. человек).

Пробы донных отложений отбирались летом 2018 и 2019 гг. в северо-западной части озера – в устье р. Шуя, Петрозаводской губе и открытой части озера (рис. 1). Поверхностный слой осадков толщиной 5 см отбирался дночерпателем Петерсона и коробчатым дночерпателем (Hydrobios).

Содержание МП в осадках анализировалось методом [74]. Частицы МП определяли с помощью микроскопа с увеличением 40×. Эффективность экстракции и уровень внешнего загрязнения оценивался по [73]. Антропогенное происхождение выбранных случайным образом частиц подтверждалось с помощью рамановской спектроскопии с использованием спектрометра Nicolet Almega XR.

Частицы МП были обнаружены во всех пробах. Содержание частиц в пробах сильно варьировало между станциями отбора и в среднем составило 2189 ± 1164 шт./кг сухого веса. Были выявлены две отделенные друг от друга зоны аккумуляции МП. Первая зона находится внутри Петрозаводской губы с наибольшим содержанием МП возле устья р. Шуя и расположена рядом с зоной седиментации и глубинами более 20 м. Далее по разрезу содержание МП уменьшается по мере приближения к промежуточ-

ной зоне размыва осадков между Петрозаводской губой и открытой частью озера. Вторая зона аккумуляции расположена в открытой части озера, при этом отмечено увеличение содержания МП по мере удаления от губы по разрезу.

Методы анализа МП в Онежском озере соответствуют исследованиям, проведенным на Балтийском море [24], что впервые позволяет сравнить его содержание в донных осадках континентального моря и крупного озера на его водосборе. По данным [24] среднее содержание МП в осадках Балтийского моря – 876 ± 393 шт./кг. В Онежском озере оно как минимум в два раза выше и данное различие статистически значимо (Mann-Whitney U-test, $p = 3.4 \times 10^{-3} < 0.01$; $U = 127.0$; $z = 2.9$). В зонах осадконакопления Балтийского моря (Гданьская, Борнхольмская, Готландская впадины) среднее содержание частиц МП составляет 962 ± 450 шт./кг ($p = 0.05$; $n = 7$). В зонах осадконакопления Онежского озера, на станциях С1 и С2, оно от двух до пяти раз выше (рис. 1).

Учитывая существенную разницу в численности населения водосборов Онежского озера (412 тыс. чел.) и Балтийского моря (80 млн чел), такое различие на первый взгляд кажется странным [72]. Вместе с тем в работе [5] отмечается важная роль донных осадков озер в процессах накопления МП.

Так, важным отличием полимерного состава микрочастиц, найденных в озере, по результатам рамановской спектроскопии является преобладание полимеров (79%) с плотностью выше плотности пресной воды [72]. На захоронение в донных осадках полимеров, чья удельная плотность ниже, чем у воды (полиэтилен, полипропилен и др.), влияют такие процессы, как биообразование и агрегация с минеральным веществом. Так, в пробах воды и донных осадках Онежского озера с применением SEM-EDS выявлено биообразование частиц полимеров диатомовыми водорослями (в частности, *Aulacoseira islandica*), а также сорбция тяжелых элементов с образованием микрокристаллов на поверхности и в объеме микрочастицы (рис. 2).

Частицы МП транспортируются в тех же гидродинамических условиях, что и частицы естественных осадков, однако они имеют гораздо более сложную форму (фрагменты, пленки, волокна, гранулы и др.), что отражается на скорости их осаждения [38], и более низкую удельную плотность ($0.8\text{--}1.6$ г/см 3), чем минеральные осадки (~ 2.6 г/см 3). Это оказывает существенное влияние на пространственное распределение их форм в водной среде. Наиболее распространены формами МП в донных осадках и воде являются волокна (рис. 3): обычно их толщина составляет 5–50 мкм. Так, в воде Балтийского моря (водный столб) их доля составляет 89% [76], в морских осадках – 74.5% [24], а в озерных – 61% [72]. Волокна оседают медленно [38] и легко переносятся течениями [11]: они распространены повсеместно, поэтому в основном связь с параметрами осадка удается установить для волокон.

В донных осадках Онежского озера выявлены прямые связи содержания волокон с долей среднеалевритовой фракции (10–50 мкм), естественной влажностью, потерей при прокаливании (550°C), и обратные связи – с долей мелкозернистого песка (100–250 мкм), зольностью и плотность осадка [72]. Связь содержания волокон в осадке с долей мелкозернистых фракций также была установлена и в Балтийском море (фракции 4–63 и 0–4 мкм). Кроме этого, было выявлено увеличение содержания волокон с уменьшением среднего диаметра частиц осадка.

Эти результаты показывают, что микроволокна с удельной плотностью от 0.8 до 1.6 г/см 3 и размером от 0.2 до 5 мм в морской и пресной воде аккумулируются идентично, совместно с мелкоалевритовыми фракциями минерального осадка, при этом в озере их содержание возрастает по мере увеличения доли органических веществ в осадке [72]. Объясняться это может как физическими закономерностями (скоростью оседания частиц различной формы и плотности), так и физико-химическими – содер-

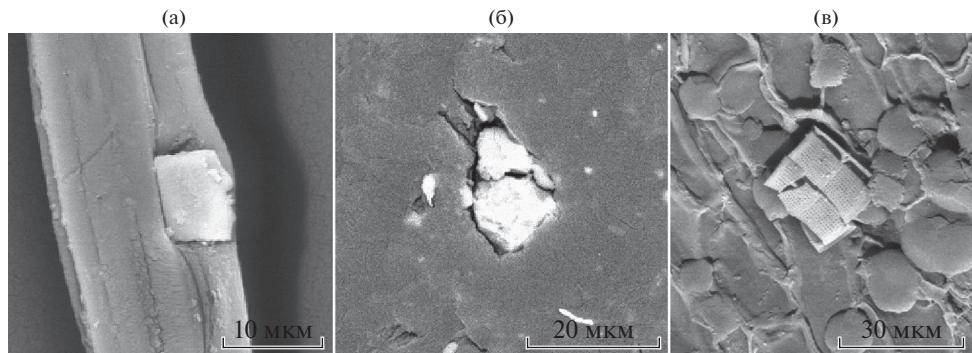


Рис. 2. Электронномикроскопические (SEM) изображения поверхности пластиков: а – волокно с растущим микрокристаллом; б – фрагмент полимера с образовавшимся минеральным включением, вызвавшим разрыв пластика (трещины в области включения); в – частица МП с прикрепленной к ее поверхности диатомовой водорослью. Большая удельная плотность включений и диатомеи (кремнистый панцирь) определяют увеличение интегральной плотности МП.

Fig. 2. Submicroscopical (SEM) images of surface of microplastic specimens. a – fiber with microcrystal growth in its body; б – plastic fragment with mineral inclusions in the material, caused polymer fracturing; в – plastic fragment with diatom algae attached to surface. High specific density of inclusions and diatom algae (silica shell) cause increase in bulk specific density of microplastics.

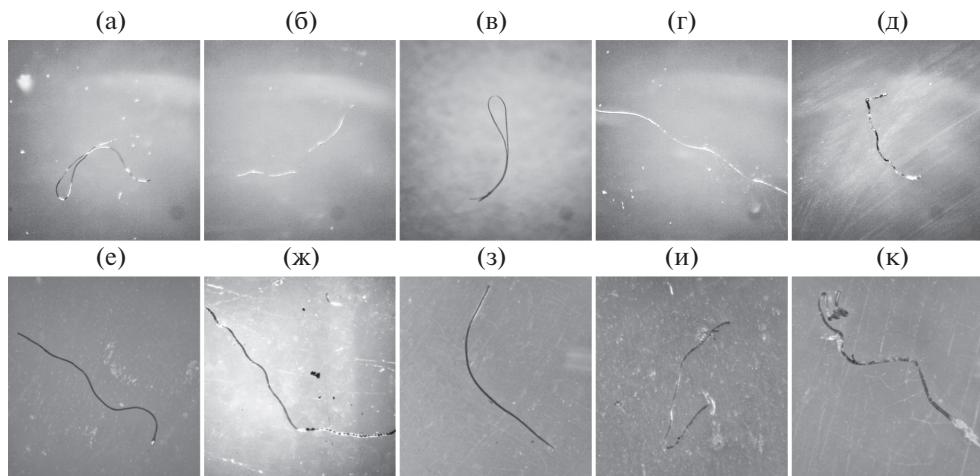


Рис. 3. Примеры волокон, извлеченных из донных осадков Балтийского моря (а – фиолетовое, б – оранжевое, в – голубое, г – красное, д – синее) и Онежского озера (е – черное, ж – красное, з – синее, и – бежевое, к – бежевое).

Fig. 3. Fibers specimens extracted from sediments of the Baltic Sea (а – violet, б – orange, в – cyan, г – red, д – blue) and Onego Lake (е – black, ж – red, з – blue, и – beige, к – beige).

жанием органического вещества в осадке, которое так же может влиять на захоронение МП путем его агрегации с природными частицами и биообрастания.

Для других форм МП (пленки, фрагменты, гранулы) зависимости менее явные. Так, в Онежском озере выявлено их преимущественное накопление рядом с основными точечными источниками – устьями рек, выпуском сточных вод городских очистных сооружений [72]. Максимальное содержание фрагментов было обнаружено в приступьевской зоне р. Шуя, а пленок – рядом с выпуском хозяйственно-бытовых сточных вод г. Петрозаводска [72]. Вместе с тем, в озере отмечается накопление преимущественно полимеров с высокой удельной плотностью [72]. По всей видимости, для полимеров, чья удельная плотность еще не превысила плотность воды, накопление рядом с источниками не отмечается, поскольку по поверхности воды они могут быть далеко унесены от источника своего поступления [18]; при этом их осаждение произойдет только через некоторое время в случайном месте в результате биообрастания или агрегации с минеральным веществом. Вместе с тем, волокна из-за низкой скорости осаждения [38] довольно легко транспортируются в потоке независимо от их удельной плотности; это, в свою очередь, отражается в том, что в озерных осадках их доля меньше, чем в море. Исходя из этого, можно заключить, что в озерах преимущественно аккумулируются частицы, трудно транспортируемые в потоке (полимеры с высокой удельной плотностью, фрагменты, гранулы, пленки).

Влияние гидродинамических условий на распределение частиц МП отражается и на расположении зон аккумуляции: так, в крупных заливах Онежского озера зоны аккумуляции мелкозернистых осадков расположены на глубинах более 20 м, в открытой части – 40 м, в то время как в Балтийском море – 80 м и более. На этих же участках наблюдается и аккумулирование микроволокон. Вместе с тем, в Балтийском море на накопление МП в осадках очевидно влияет и термохалинная структура: неравномерность поля плотности воды, вызванная поступлением более соленых вод Атлантического океана с юго-запада и речных пресных вод с северо-востока, отражающаяся в сложной вертикальной стратификации слоев распресненных и солоноватых вод, а также изменением их плотности в результате вертикального прогрева [76].

Онежское озеро – крупный пресноводный водоем бореальной зоны, и впадающие в него реки выносят около 300 тыс. т. органического углерода в год [7]. Марганец и железо также поступают с водосбора озера в составе гумусовых веществ, составляющих до 81% от общего содержания органического вещества [1]. Так, около 8700 т железа и 870 т марганца захоранивается в Онежском озере ежегодно [2, 3]. Ранее было показано, что коллоиды железа и марганца, фульвовых и гуминовых кислот способны интенсифицировать осаждение частиц МП [14, 17, 44, 56]. Эти физико-химические процессы также должны оказывать непосредственное влияние на аккумуляцию частиц МП в осадках.

Таким образом, существенное различие в содержании МП в донных осадках континентального моря и крупного озера на его водосборе обусловлено сочетанием двух факторов: различия в гидродинамических условиях накопления и переноса МП, а также близость озера к источникам загрязнения.

ВЫВОДЫ

Впервые проведено сравнение содержания МП в донных осадках континентального моря и крупного озера на единой методической основе. Выявлено, что волокна являются наиболее распространенной формой МП как в Балтийском море, так и в Онежском озере. В донных осадках волокна аккумулируются преимущественно в зонах осадконакопления с низкой гидродинамической активностью (для Балтийского моря – глубины больше 80 м, для открытой части Онежского озера – больше 40 м). Наблюдается связь содержания волокон с параметрами донных осадков. По мере

уменьшения среднего диаметра частиц осадка содержание волокон в нем увеличивается. Термохалинная структура влияет на вертикальное распределение МП в водном столбе, замедляя его осаждение. В озерах преимущественно аккумулируются частицы, трудно транспортируемые в потоке (полимеры с высокой удельной плотностью, фрагменты, гранулы, пленки). Доля волокон в общем пуле МП в осадках озера меньше, чем в море. Процессы трансформации гумусовых веществ, соединений железа и марганца в крупных бореальных озерах также могут оказывать значимое влияние на накопление МП в донных осадках и самоочищение вод. Таким образом, озера выполняют роль фильтров, очищая поверхностные воды суши от МП по мере их поступления в континентальные моря и Мировой океан, становясь при этом их первичным накопителем.

В дальнейшем требуется подробное изучение не только уровня загрязнения морских и поверхностных вод частицами МП, но и закономерностей их образования, поступления, переноса и захоронения, а также прогнозирование последствий такого загрязнения для водных экосистем. Крупные озера – Онежское и Ладожское – вмещают около 70% пресной воды Европейской территории России и являются стратегическим водным запасом страны. В этой связи наравне с изучением этого нового типа загрязнения в морской среде необходимо уделить и повышенное внимание поверхностным водам суши. Прогресс в этом направлении может быть достигнут только с использованием прочной научной базы и в результате совместных усилий законодательных и нормоустанавливающих органов на международном, национальном и региональном уровнях. Безусловно, новые научные исследования необходимы в этом вопросе для принятия обоснованных управленческих решений и создания новой нормативной базы. В этой связи необходимо всестороннее изучение и понимание новых угроз, которые представляет распространение МП в поверхностных водах суши.

Статья подготовлена при финансовом обеспечении федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (ИВПС КарНЦ РАН). Исследования содержания МП в донных осадках Онежского озера проведены при поддержке гранта РНФ № 19-17-00035. Исследования содержания МП в донных осадках Балтийского моря проведены при поддержке гранта РНФ 19-17-00041.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремова Т.А., Зобкова М.В. Содержание, распределение и соотношение основных компонентов органического вещества в Онежском озере // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 9. С. 60–75.
<https://doi.org/10.17076/ljm1017>
2. Кулик Н.В., Белкина Н.А., Ефременко Н.А. Поступление, трансформация и распределение марганца в Онежском озере // Московский экономический журнал. 2020. № 1.
<https://doi.org/10.24411/2413-046X-2020-10063>
3. Лозовик П.А., Кулик Н.В., Ефременко Н.А. Литофильные элементы и тяжелые металлы в Онежском озере: источники поступления, содержание и трансформация // Труды КарНЦ РАН. 2020. № 4. С. 62–74.
<https://doi.org/10.17076/ljm1189>
4. Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ, 2010. 151 с.
5. Поздняков Ш.Р., Иванова Е.В. Оценка концентраций частиц микропластика в воде и донных отложениях Ладожского озера // Региональная экология. 2018. № 4. С. 48–52.
<https://doi.org/10.30694/1026-5600-2018-4-48-52>
6. Поздняков Ш.Р., Иванова Е.В., Гузева А.В., Шалунова Е.П., Мартинсон К.Д., Тихонова Д.А. Исследование содержания частиц микропластика в воде, донных отложениях и грунтах прибрежной территории Невской губы Финского залива // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 4. С. 411–420.
<https://doi.org/10.31857/S0321059620040148>
7. Сабылина А.В. Поступление в Онежское озеро органического углерода, общего фосфора и общего азота с речным стоком и вынос с водами реки Свири в 1965–2008 гг. // Труды

- КарНЦ РАН. 2016. № 9. С. 68–77.
<https://doi.org/10.17076/lim307>
8. Amaral-Zettler L.A., Zettler E.R., Slikas B., Boyd G.D., Melvin D.W., Morrall C.E., Proskurowski G., Mincer T.J. The biogeography of the Plastisphere: implications for policy // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2015. V. 13(10). P. 541–546.
[https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)
9. Andrade A.L. Microplastics in the marine environment // *Mar. Pollut. Bull.* 2011. V. 62(8). P. 1596–1605.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
10. Ashton K., Holmes L., Turner A. Association of metals with plastic production pellets in the marine environment // *Mar. Pollut. Bull.* 2010. V. 60. P. 2050–2055.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.07.014>
11. Bagaev A., Mizyuk A., Khatmullina L., Isachenko I., Chubarenko I. Anthropogenic fibres in the Baltic Sea water column: Field data, laboratory and numerical testing of their motion // *Sci. Total Environ.* 2017. V. 599–600. P. 560–571.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.185>
12. Besseling E., Quik J.T., Sun M., Koelmans A.A. Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: A modeling study // *Environ. Pollut.* 2017. V. 220. P. 540–548.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.001>
13. Browne M.A., Crump P., Niven S.J., Teuten E., Tonkin A., Galloway T., Thompson R. Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks // *Environ Sci Technol.* 2011. V. 45. P. 9175–9179.
<https://doi.org/10.1021/es201811s>
14. Cai L., Hu L., Shi H., Ye J., Zhang Y., Kim H. Effects of inorganic ions and natural organic matter on the aggregation of nanoplastics // *Chemosphere*. 2018. V. 197. P. 142–151.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.052>
15. Carson H.S., Lamson M.R., Nakashima D., Toloumu D., Hafner J., Maximenko N., McDermid K.J. Tracking the sources and sinks of local marine debris in Hawaii // *Mar. Environ. Res.* 2013. V. 84. P. 76–83.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2012.12.002>
16. Castañeda R.A., Avlijas S., Simard M.A., Ricciardi A. Microplastic pollution in St. Lawrence river sediments // *Canadian J. Fisheries and Aquatic Sciences*. 2014. V. 71(12). P. 1767–1771.
<https://doi.org/10.1139/cjfas-2014-0281>
17. Chen W., Ouyang Z.Y., Qian C., Yu H.Q. Induced structural changes of humic acid by exposure of polystyrene microplastics: A spectroscopic insight // *Environ. Pollut.* 2018. V. 233. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.027>
18. Chubarenko I., Bagaev A., Zobkov M., Esiukova E. On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment // *Mar. Pollut. Bull.* 2016. V. 108. P. 105–112.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.048>
19. Cole M., Webb H., Lindeque P.K., Fileman E.S., Halsband C., Galloway T.S. Isolation of microplastics in biota-rich seawater samples and marine organisms // *Sci. Rep.* 2014. V. 4. P. 4528.
<https://doi.org/10.1038/srep04528>
20. Dris R., Imhof H., Sanchez W., Gasperi J., Galgani F., Tassin B., Laforsch C. Beyond the ocean: contamination of freshwater ecosystems with (micro-) plastic particles // *Environ. Chem.* 2015. V. 2(5). P. 539–550.
<https://doi.org/10.1071/EN14172>
21. Erkens-Medrano D., Thompson R.C., Aldridge D.C. Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs // *Water research*. 2015. V. 75. P. 63–82.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.012>
22. Endo S., Takizawa R., Okuda K., Takada H., Chiba K., Kanehiro H., Ogi H., Yamashita R., Date T. Concentration of polychlorinated biphenyls (PCBs) in beached resin pellets: variability among individual particles and regional differences // *Mar. Pollut. Bull.* 2005. V. 50(10). P. 1103–1114.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.04.030>
23. Esiukova E. Plastic pollution on the Baltic beaches of Kaliningrad region, Russia // *Mar. Pollut. Bull.* 2017. V. 114(2). P. 1072–1080.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.001>
24. Esiukova E., Zobkov M., Chubarenko I. Data on microplastic contamination of the Baltic Sea bottom sediment samples in 2015–2016 // *Data in brief*. 2020. V. 28. P. 104887.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104887>

25. *Fendall L.S., Sewell M.A.* Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastic in facial cleansers // Mar. Pollut. Bull. 2009. V. 58. P. 1255–1258.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.04.025>
26. *Free C.M., Jensen O.P., Mason S.A., Eriksen M., Williamson N.J., Boldgiv B.* High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake // Mar. Pollut. Bull. 2014. V. 85(1). P. 156–163.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.001>
27. *Frias J.P.G.L., Sobral P., Ferreira A.M.* Organic pollutants in microplastics from two beaches of the Portuguese coast // Mar. Pollut. Bull. 2010. V. 60(11). P. 1988–1992.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.07.030>
28. GESAMP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection): Proceedings of the GESAMP international workshop on micro-plastic particles as a vector in transporting persistent, bio-accumulating and toxic substances in the oceans // GESAMP Reports & Studies. T. Bowmer, P. Kershaw (eds.). Paris: UNESCO-IOC, 2010. 68 p. https://www.marinelitersolutions.com/wp-content/uploads/2016/03/GESAMP_Workshop_on_Microplastics.pdf
29. *Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L.* Production, use, and fate of all plastics ever made // Sci. Adv. 2017. V. 3(7). P. e1700782.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
30. *Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C., Thiel M.* Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification // Environ. Sci. Technol. 2012. V. 46(6). P. 3060–3075.
<https://doi.org/10.1021/es2031505>
31. *Hitchcock J.N., Mitrovic S.M.* Microplastic pollution in estuaries across a gradient of human impact // Environ. Pollut. 2019. V. 247. P. 457–466.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.069>
32. *Horton A.A., Walton A., Spurgeon D.J., Lahive E., Svendsen C.* Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities // Sci. Total Environ. 2017. V. 586. P. 127–141.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>
33. ISO-TR-21960-2020. Plastics – Environmental aspects – State of knowledge and methodologies.
34. *Ivar do Sul J.A.I., Costa M.F.* Marine debris review for Latin America and the wider Caribbean region: from the 1970s until now, and where do we go from here? // Mar. Pollut. Bull. 2007. V. 54(8). P. 1087–1104.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.05.004>
35. *Jambeck J., Geyer R., Wilcox C., Siegler T.R., Perryman M., Andrade A.L., Narayan R., Law K.L.* Plastic waste inputs from land into the ocean // Science. 2015. V. 347. P. 768–771.
<https://doi.org/10.1126/science.1260352>
36. *Karapanagioti H.K., Klontza I.* Testing phenanthrene distribution properties of virgin plastic pellets and plastic eroded pellets found on Lesvos island beaches (Greece) // Mar. Environ. Res. 2008. V. 5(4). P. 283–290.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2007.11.005>
37. *Kasyanenko T., Filimonov O.* Recycling polyethylene terephthalate (PET) packaging as the basis of economic projects and solution of social and environmental problems in Russia // J. Modern Accounting and Auditing. 2013. V. 9(8). P. 1093.
38. *Khatmullina L., Isachenko I.* Settling velocity of microplastic particles of regular shapes // Mar. Pollut. Bull. 2017. V. 114(2). P. 871–880.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.024>
39. *Klein S., Worch E., Knepper T.P.* Occurrence and spatial distribution of microplastics in river shore sediments of the Rhine-Main area in Germany // Environ. Sci. Technol. 2015. V. 49(10). P. 6070–6076.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00492>
40. *Lattin G.L., Moore C.J., Zellers A.F., Moore S.L., Weisberg S.B.* A comparison of neustonic plastic and zooplankton at different depths near the southern California shore // Mar. Pollut. Bull. 2004. V. 49(4). P. 291–294.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.01.020>
41. *Law K.L., Thompson R.C.* Microplastics in the seas // Science. 2014. V. 345(6193). P. 144–145.
<https://doi.org/10.1126/science.1254065>
42. *Lebreton L.C., Van Der Zwet J., Damsteeg J.W., Slat B., Andrade A., Reisser J.* River plastic emissions to the world's oceans // Nat. commun. 2017. V. 8. P. 15611.
<https://doi.org/10.1038/ncomms15611>
43. *Lechner A., Keckeis H., Lumesberger-Loisl F., Zens B., Krusch R., Tritthart M., Glas M., Schludermann E.* The Danube so colourful: a potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's

- second largest river // Environ. Pollut. 2014. V. 188. P. 177–181.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.006>
44. Leiser R., Wu G.M., Neu T.R., Wendt-Pothoff K. Biofouling, metal sorption and aggregation are related to sinking of microplastics in a stratified reservoir // Water Research. 2020. P. 115748.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115748>
45. Lenaker P.L., Corsi S.R., Mason S.A. Spatial Distribution of Microplastics in Surficial Benthic Sediment of Lake Michigan and Lake Erie // Environ. Sci. Technol. December 2020. P. A–L.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06087>
46. Mai L., Bao L.J., Shi L., Wong C.S., Zeng E.Y. A review of methods for measuring microplastics in aquatic environments // Environ. Sci. Pollut. Res. 2018. V. 25(12). P. 11319–11332.
<https://doi.org/10.1007/s11356-018-1692-0>
47. Masura J., Baker J.E., Foster G.D., Arthur C., Herring C. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. 2015. https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications-files/noaa_microplastics_methods_manual.pdf
48. Moore C.J. Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat // Environ. Res. 2008. V. 108(2). P. 131–139.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.07.025>
49. Moore C.J., Lattin G.L., Zellers A.F. Quantity and type of plastic debris flowing from two urban rivers to coastal waters and beaches of Southern California // Revista de Gestão Costeira Integrada-J. Integrated Coastal Zone Management. 2011. V. 11(1). P. 65–73. <https://www.redalyc.org/pdf/3883/388340132008.pdf>
50. Moore C.J., Moore S.L., Leecaster M.K., Weisberg S.B. A comparison of plastic and plankton in the North Pacific central gyre // Mar. Pollut. Bull. 2001. V. 42(12). P. 1297–1300.
[https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)
51. Moore C.J., Moore S.L., Weisberg S.B., Lattin G.L., Zellers A.F. A comparison of neustonic plastic and zooplankton abundance in southern California's coastal waters // Mar. Pollut. Bull. 2002. V. 44(10). P. 1035–1038.
[https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00150-9](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00150-9)
52. Nizzetto L., Bussi G., Futter M.N., Butterfield D., Whitehead P.G. A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments // Environ. Sci.: Processes Impacts. 2016. V. 18(8). P. 1050–1059.
<https://doi.org/10.1039/C6EM00206D>
53. Nor N.H.M., Obbard J.P. Microplastics in Singapore's coastal mangrove ecosystems // Mar. Pollut. Bull. 2014. V. 79(1–2). P. 278–283.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.11.025>
54. Nuelle M.T., Dekiff J.H., Remy D., Fries E. A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments // Environ. Pollut. 2014. V. 184. P. 161–169.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.07.027>
55. Obbard R.W., Sadri S., Wong Y.Q., Khitun A.A., Baker I., Thompson R.C. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice // Earth's Future. 2014. V. 2(6). P. 315–320.
<https://doi.org/10.1002/2014EF000240>
56. Oriekhova O., Stoll S. Heteroaggregation of nanoplastic particles in the presence of inorganic colloids and natural organic matter // Environ. Sci.: Nano. 2018. V. 5(3). P. 792–799.
<https://doi.org/10.1039/C7EN01119A>
57. Plastics Europe. Plastics – the Facts 2017. https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf
58. Rillig M.C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? // Environ. Sci. Technol. 2012. V. 46. P. 6453–6454.
<https://doi.org/10.1021/es302011r>
59. Scheurer M., Bigalke M. Microplastics in Swiss floodplain soils // Environ. Sci. Technol. 2018. Vol. 52(6). P. 3591–3598.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06003>
60. Sutton R., Mason S.A., Stanek S.K., Willis-Norton E., Wren I.F., Box C. Microplastic contamination in the San Francisco Bay, California, USA // Mar. Pollut. Bull. 2016. V. 109(1). P. 230–235.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.077>
61. Syberg K., Khan F.R., Selck H., Palmqvist A., Banta G.T., Daley J., Sano L., Duhaime M.B. Microplastics: addressing ecological risk through lessons learned // Environ. Toxicol. Chem. 2015. V. 34(5). P. 945–953.
<https://doi.org/10.1002/etc.2914>

62. Thompson R.C., Olsen Y., Mitchell R.P., Davis A., Rowland S.J., John A.W., McGonigle D., Russell A.E. Lost at sea: where is all the plastic? // *Science* (Washington). 2004. V. 304(5672). P. 838. https://www.researchgate.net/profile/Steven_Rowland/publication/8575062_Lost_at_Sea_Where_Is_All_the_Plastic/links/0fcfd51001f3893f44000000/Lost-at-Sea-Where-Is-All-the-Plastic.pdf
63. UNEP. Plastic in Cosmetics. 2015. 33 p. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/21754/PlasticinCosmetics2015Factsheet.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
64. Van Cauwenbergh L., Vanreusel A., Mees J., Janssen C.R. Microplastic pollution in deep-sea sediments // *Environ. Pollut.* 2013. V. 182. P. 495–499. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.08.013>
65. Veerasingam S., Mugilarasan M., Venkatachalapathy R., Vethamony P. Influence of 2015 flood on the distribution and occurrence of microplastic pellets along the Chennai coast, India // *Mar. Pollut. Bull.* 2016. V. 109(1). P. 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.082>
66. Wagner M., Scherer C., Alvarez-Muñoz D., Brennholt N., Bourrain X., Buchinger S., Fries E., Grosbois C., Klasmeier J., Marti T., Rodriguez-Mozaz S., Urbatzka R., Vethaak D., Winther-Nielsen M., Reifferscheid G. Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know // *Environ. Sci. Europe*. 2014. V. 26(1). P. 1–9. <https://doi.org/10.1186/s12302-014-0012-7>
67. Weinstein J.E., Crocker B.K., Gray A.D. From macroplastic to microplastic: degradation of high-density polyethylene, polypropylene, and polystyrene in a salt marsh habitat // *Environ. Toxicol. Chem.*. 2016. V. 35(7). P. 1632–1640. <https://doi.org/10.1002/etc.3432>
68. Woodall L.C., Sanchez-Vidal A., Canals M., Paterson G.L., Coppock R., Sleight V., Calafat A., Rogers A.D., Narayanaswamy B.E., Thompson R.C. The deep sea is a major sink for microplastic debris // *R. Soc. Open Sci.* 2014. V. 1(4). P. 140317. <https://doi.org/10.1098/rsos.140317>
69. Wright S.L., Thompson R.C., Galloway T.S. The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review // *Environ. Pollut.* 2013. V. 178. P. 483–492. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031>
70. Yonkos L.T., Friedel E.A., Perez-Reyes A.C., Ghosal S., Arthur C.D. Microplastics in four estuarine rivers in the Chesapeake Bay, USA // *Environ. Sci. Technol.* 2014. V. 48(24). P. 14195–14202. <https://doi.org/10.1021/es5036317>
71. Zhang H. Transport of microplastics in coastal seas // *Estuarine, Coastal Shelf Sci.* 2017. V. 199. P. 4–86. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.09.032>
72. Zobkov M., Belkina N., Kovalevski V., Zobkova M., Efremova T., Galakhina N. Microplastic abundance and accumulation behavior in Lake Onego sediments: a journey from the river mouth to pelagic waters of the large boreal lake // *J. Environ. Chem. Eng.* 2020. V. 8(5). P. 104367. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104367>
73. Zobkov M., Esiukova E. Microplastics in Baltic bottom sediments: quantification procedures and first results // *Mar. Pollut. Bull.* 2017. V. 114(2). P. 724–732. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.060>
74. Zobkov M., Zobkova M., Galakhina N., Efremova T. Method for microplastics extraction from Lake sediments // *MethodsX*. 2020. V. 7. P. 101140. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101140>
75. Zobkov M.B., Esiukova E.E. Microplastics in a Marine Environment: Review of Methods for Sampling, Processing, and Analyzing Microplastics in Water, Bottom Sediments, and Coastal Deposits // *Oceanology*. 2018. V. 58. P. 137–143. <https://doi.org/10.1134/S0001437017060169>
76. Zobkov M.B., Esiukova E.E., Zyubin A.Y., Samusev I.G. Microplastic content variation in water column: The observations employing a novel sampling tool in stratified Baltic Sea // *Mar. Pollut. Bull.* 2019. V. 138. P. 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.047>

Lakes as Accumulators of Microplastics on the Way from Land to the World Ocean: Review

M. B. Zobkov^{1,*}, I. P. Chubarenko^{2, **}, E. E. Esiukova^{2, *}, N. A. Belkina^{1, ****},
V. V. Kovalevskii^{1, 3, *****}, M. V. Zobkova^{1, *****},
T. A. Efremova^{1, *****}, and N. E. Galakhina^{1, *****}**

¹*Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
Petrozavodsk, Russia*

²*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Institute of Geology of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia*

*E-mail: duet@onego.ru

**E-mail: irina_chubarenko@mail.ru

***E-mail: elena_esiukova@mail.ru

****E-mail: bel110863@mail.ru

*****E-mail: kovalevs@krc.karelia.ru

*****E-mail: rincalika21@yandex.ru

*****E-mail: efremova.nwpi@mail.ru

*****E-mail: kulakovanata@mail.ru

The purpose of the work is to summarize the currently available information concerning the mechanisms of microplastics transport and accumulation in the surface waters and to compare it with the continental seas in this regard. The article summarizes the data published in the foreign and Russian literature. The comparative analysis of the original materials received by the authors in the process of research in the Baltic Sea and the Onego Lake using identical methods of microplastics determination is presented, the results are compared. The main emphasis is on the ways and volumes of microplastics entering the continental seas and the World Ocean. A statistically higher amount of microplastics was found in the bottom sediments of the Onego Lake. Possible reasons for this difference were discussed. Fibers are the most common form of microplastics in the Baltic Sea and the Onego Lake. In the bottom sediments, fibers accumulate mainly in sedimentation zones with low hydrodynamic activity (in the Baltic Sea – on depths more than 80 m, in open part of the Onego Lake – on depths more than 40 m, in large bays – on 20 m). There is a connection between the fiber content and the parameters of the bottom sediments. The thermohaline structure affects the vertical distribution of microplastics in the water column, slowing its deposition. Lakes accumulate mainly hydrodynamically heavy particles: polymers with a high specific density, fragments, granules, films. The rate of fibers in the total pool of microplastics in lake sediments is less than in the sea. Lakes act as filters, purifying the surface waters from microplastics as they enter the continental seas and the World Ocean, and becoming their primary storage water bodies.

Keywords: microplastics, contamination, bottom sediments, Onego Lake, Baltic Sea

REFERENCES

1. Efremova T.A., Zobkova M.V. Soderzhanie, raspredelenie i sootnoshenie osnovnyh komponentov organicheskogo veshhestva v Onezhskom ozere // Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. 2019. № 9. P. 60–75. DOI 10.17076/lim1017
2. Kulik N.V., Belkina N.A., Efremenko N.A. Postuplenie, transformaciya i raspredelenie marganca v Onezhskom ozere // Moskovskij ekonomicheskij zhurn. 2020. № 1. DOI 10.24411/2413-046X-2020-10063
3. Lozovik P.A., Kulik N.V., Efremenko N.A. Litofil'nye elementy i tyazhelye metally v Onezhskom ozere: istochniki postupleniya, soderzhanie i transformaciya // Trudy Karel'skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2020. № 4. P. 62–74. DOI 10.17076/lim1189
4. Onezhskoe ozero. Atlas / Otv. red. N.N. Filatov. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN, 2010. 151 s.
5. Pozdnyakov Sh.R., Ivanova E.V. Ocenna koncentracij chasticz mikroplastika v vode i donnyh otlozhennyih Ladozhskogo ozera // Regional'naya ekologiya. 2018. № 4. S. 48–52. DOI 10.30694/1026-5600-2018-4-48-52

6. *Pozdnyakov Sh.R., Ivanova E.V., Guzeva A.V., Shalunova E.P., Martinson K.D., Tixonova D.A.* Issledovanie soderzhaniya chastic mikroplastika v vode, donnyh otlozheniyah i gruntah pribrezhnoj territorii Nevskoj guby Finskogo zaliva // Vodnye resursy. 2020. V. 47. № 4. S. 411–420. DOI 10.31857/S0321059620040148
7. *Sabylina A.V.* Postuplenie v Onezhskoe ozero organiceskogo ugleroda, obshhego fosfora i obshhego azota s rechnym stokom i vynos s vodami reki Sviri v 1965–2008 gg. // Trudy' KarNCz RAN. 2016. № 9. S. 68–77. DOI 10.17076/lim307
8. *Amaral-Zettler L.A., Zettler E.R., Slikas B., Boyd G.D., Melvin D.W., Morrall C.E., Proskurowski G., Mincer T.J.* The biogeography of the Plasticsphere: implications for policy // Frontiers in Ecology and the Environment. 2015. V. 13(10). P. 541–546. DOI 10.1016/S0025-326X(01)00114-X
9. *Andrady A.L.* Microplastics in the marine environment // Mar. Pollut. Bull. 2011. Vol. 62(8). Pp. 1596–1605. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030
10. *Ashton K., Holmes L., Turner A.* Association of metals with plastic production pellets in the marine environment // Mar. Pollut. Bull. 2010. V. 60. P. 2050–2055. DOI 10.1016/j.marpolbul.2010.07.014
11. *Bagaev A., Mizyuk A., Khatmullina L., Isachenko I., Chubarenko I.* Anthropogenic fibres in the Baltic Sea water column: Field data, laboratory and numerical testing of their motion // Sci. Total Environ. 2017. V. 599–600. P. 560–571. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.04.185
12. *Besseling E., Quik J.T., Sun M., Koelmans A.A.* Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: A modeling study // Environ. Pollut. 2017. V. 220. P. 540–548. DOI 10.1016/j.envpol.2016.10.001
13. *Browne M.A., Crump P., Niven S.J., Teuten E., Tonkin A., Galloway T., Thompson R.* Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks // Environ. Sci. Technol. 2011. V. 45. P. 9175–9179. DOI 10.1021/es201811s
14. *Cai L., Hu L., Shi H., Ye J., Zhang Y., Kim H.* Effects of inorganic ions and natural organic matter on the aggregation of nanoplastics // Chemosphere. 2018. V. 197. P. 142–151. DOI 10.1016/j.chemosphere.2018.01.052
15. *Carson H.S., Lamson M.R., Nakashima D., Toloumu D., Hafner J., Maximenko N., McDermid K.J.* Tracking the sources and sinks of local marine debris in Hawaii // Mar. Environ. Res. 2013. V. 84. P. 76–83. DOI 10.1016/j.marenvres.2012.12.002
16. *Castañeda R.A., Avlijas S., Simard M.A., Ricciardi A.* Microplastic pollution in St. Lawrence river sediments // Canadian J. Fisheries and Aquatic Sciences. 2014. V. 71(12). P. 1767–1771. DOI 10.1139/cjfas-2014-0281
17. *Chen W., Ouyang Z.Y., Qian C., Yu H.Q.* Induced structural changes of humic acid by exposure of polystyrene microplastics: A spectroscopic insight // Environ. Pollut. 2018. V. 233. P. 1–7. DOI 10.1016/j.envpol.2017.10.027
18. *Chubarenko I., Bagaev A., Zobkov M., Esiukova E.* On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment // Mar. Pollut. Bull. 2016. V. 108. P. 105–112. DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.04.048
19. *Cole M., Webb H., Lindeque P.K., Fileman E.S., Halsband C., Galloway T.S.* Isolation of microplastics in biota-rich seawater samples and marine organisms // Sci. Rep. 2014. V. 4. P. 4528. DOI 10.1038/srep04528
20. *Dris R., Imhof H., Sanchez W., Gasperi J., Galgani F., Tassin B., Laforsch C.* Beyond the ocean: contamination of freshwater ecosystems with (micro-) plastic particles // Environ. Chem. 2015. V. 12(5). P. 539–550. DOI 10.1071/EN14172
21. *Eerkes-Medrano D., Thompson R.C., Aldridge D.C.* Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs // Water research. 2015. V. 75. P. 63–82. DOI 10.1016/j.watres.2015.02.012
22. *Endo S., Takizawa R., Okuda K., Takada H., Chiba K., Kanehiro H., Ogi H., Yamashita R., Date T.* Concentration of polychlorinated biphenyls (PCBs) in beached resin pellets: variability among individual particles and regional differences // Mar. Pollut. Bull. 2005. V. 50(10). P. 1103–1114. DOI 10.1016/j.marpolbul.2005.04.030
23. *Esiukova E.* Plastic pollution on the Baltic beaches of Kaliningrad region, Russia // Mar. Pollut. Bull. 2017. V. 114(2). P. 1072–1080. DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.10.001
24. *Esiukova E., Zobkov M., Chubarenko I.* Data on microplastic contamination of the Baltic Sea bottom sediment samples in 2015–2016 // Data in brief. 2020. V. 28. P. 104887. DOI 10.1016/j.dib.2019.104887
25. *Fendall L.S., Sewell M.A.* Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastic in facial cleansers // Mar. Pollut. Bull. 2009. V. 58. P. 1255–1258. DOI 10.1016/j.marpolbul.2009.04.025
26. *Free C.M., Jensen O.P., Mason S.A., Eriksen M., Williamson N.J., Boldgiv B.* High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake // Mar. Pollut. Bull. 2014. V. 85(1). P. 156–163. DOI 10.1016/j.marpolbul.2014.06.001
27. *Frias J.P.G.L., Sobral P., Ferreira A.M.* Organic pollutants in microplastics from two beaches of the Portuguese coast // Mar. Pollut. Bull. 2010. V. 60(11). P. 1988–1992. DOI 10.1016/j.marpolbul.2010.07.030

28. GESAMP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection): Proceedings of the GESAMP international workshop on micro-plastic particles as a vector in transporting persistent, bio-accumulating and toxic substances in the oceans // GESAMP Reports & Studies. Bowmer T., Kershaw P. (Eds.). Paris: UNESCO-IOC, 2010. 68 p. https://www.marinelitersolutions.com/wp-content/uploads/2016/03/GESAMP_Workshop_on_Microplastics.pdf
29. Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Production, use, and fate of all plastics ever made // Sci. Adv. 2017. V. 3(7). P. e1700782. DOI 10.1126/sciadv.1700782
30. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C., Thiel M. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification // Environ. Sci. Technol. 2012. V. 46(6). P. 3060–3075. DOI 10.1021/es2031505
31. Hitchcock J.N., Mitrovic S.M. Microplastic pollution in estuaries across a gradient of human impact // Environ. Pollut. 2019. V. 247. P. 457–466. DOI 10.1016/j.envpol.2019.01.069
32. Horton A.A., Walton A., Spurgeon D.J., Lahive E., Svendsen C. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities // Sci. Total Environ. 2017. V. 586. P. 127–141. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.01.190
33. ISO-TR-21960-2020. Plastics – Environmental aspects – State of knowledge and methodologies.
34. Ivar do Sul J.A.I., Costa M.F. Marine debris review for Latin America and the wider Caribbean region: from the 1970s until now, and where do we go from here? // Mar. Pollut. Bull. 2007. V. 54(8). P. 1087–1104. DOI 10.1016/j.marpolbul.2007.05.004
35. Jambeck J., Geyer R., Wilcox C., Siegler T.R., Perryman M., Andrade A.L., Narayan R., Law K.L. Plastic waste inputs from land into the ocean // Science. 2015. V. 347. P. 768–771. DOI 10.1126/science.1260352
36. Karapanagioti H.K., Klontza I. Testing phenanthrene distribution properties of virgin plastic pellets and plastic eroded pellets found on Lesvos island beaches (Greece) // Mar. Environ. Res. 2008. V. 65(4). P. 283–290. DOI 10.1016/j.marenvres.2007.11.005
37. Kasyanenko T., Filimonov O. Recycling polyethylene terephthalate (PET) packaging as the basis of economic projects and solution of social and environmental problems in Russia // J. Modern Accounting and Auditing. 2013. V. 9(8). P. 1093.
38. Khatmullina L., Isachenko I. Settling velocity of microplastic particles of regular shapes. // Mar. Pollut. Bull. 2017. V. 114(2). P. 871–880. DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.11.024
39. Klein S., Worch E., Knepper T.P. Occurrence and spatial distribution of microplastics in river shore sediments of the Rhine-Main area in Germany // Environ. Sci. Technol. 2015. V. 49(10). P. 6070–6076. DOI 10.1021/acs.est.5b00492
40. Lattin G.L., Moore C.J., Zellers A.F., Moore S.L., Weisberg S.B. A comparison of neustonic plastic and zooplankton at different depths near the southern California shore // Mar. Pollut. Bull. 2004. V. 49(4). P. 291–294. DOI 10.1016/j.marpolbul.2004.01.020
41. Law K.L., Thompson R.C. Microplastics in the seas // Science. 2014. V. 345(6193). P. 144–145. DOI 10.1126/science.1254065
42. Lebreton L.C., Van Der Zwart J., Damsteeg J.W., Slat B., Andrade A., Reisser J. River plastic emissions to the world's oceans // Nat. commun. 2017. V. 8. P. 15611. DOI 10.1038/ncomms15611
43. Lechner A., Keckeis H., Lumesberger-Loisl F., Zens B., Krusch R., Tritthart M., Glas M., Schludermann E. The Danube so colourful: a potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river // Environ. Pollut. 2014. V. 188. P. 177–181. DOI 10.1016/j.envpol.2014.02.006
44. Leiser R., Wu G.M., Neu T.R., Wendt-Potthoff K. Biofouling, metal sorption and aggregation are related to sinking of microplastics in a stratified reservoir // Water Research. 2020. P. 115748. DOI 10.1016/j.watres.2020.115748
45. Lenaker P.L., Corsi S.R., Mason S.A. Spatial Distribution of Microplastics in Surficial Benthic Sediment of Lake Michigan and Lake Erie // Environ. Sci. Technol. December 2020. P. A–L. DOI 10.1021/acs.est.0c06087
46. Mai L., Bao L.J., Shi L., Wong C.S., Zeng E.Y. A review of methods for measuring microplastics in aquatic environments // Environ. Sci. Pollut. Res. 2018. Vol. 25(12). P. 11319–11332. DOI 10.1007/s11356-018-1692-0
47. Masura J., Baker J.E., Foster G.D., Arthur C., Herring C. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. 2015. https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications-files/noaa_microplastics_methods_manual.pdf
48. Moore C.J. Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat // Environ. Res. 2008. V. 108(2). P. 131–139. DOI 10.1016/j.envres.2008.07.025
49. Moore C.J., Lattin G.L., Zellers A.F. Quantity and type of plastic debris flowing from two urban rivers to coastal waters and beaches of Southern California // Revista de Gestão Costeira Integrada-J. Integrated Coastal Zone Management. 2011. V. 11(1). P. 65–73. <https://www.redalyc.org/pdf/3883/388340132008.pdf>

50. Moore C.J., Moore S.L., Leecaster M.K., Weisberg S.B. A comparison of plastic and plankton in the North Pacific central gyre // Mar. Pollut. Bull. 2001. V. 42(12). P. 1297–1300. DOI 10.1016/S0025-326X(01)00114-X
51. Moore C.J., Moore S.L., Weisberg S.B., Lattin G.L., Zellers A.F. A comparison of neustonic plastic and zooplankton abundance in southern California's coastal waters // Mar. Pollut. Bull. 2002. V. 44(10). P. 1035–1038. DOI 10.1016/S0025-326X(02)00150-9
52. Nizzetto L., Bussi G., Futter M.N., Butterfield D., Whitehead P.G. A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments // Environ. Sci.: Processes Impacts. 2016. V. 18(8). P. 1050–1059. DOI 10.1039/C6EM00206D
53. Nor N.H.M., Obbard J.P. Microplastics in Singapore's coastal mangrove ecosystems // Mar. Pollut. Bull. 2014. V. 79(1–2). P. 278–283. DOI 10.1016/j.marpolbul.2013.11.025
54. Nuelle M.T., Dekiff J.H., Remy D., Fries E. A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments // Environ. Pollut. 2014. V. 184. P. 161–169. DOI 10.1016/j.envpol.2013.07.027
55. Obbard R.W., Sadri S., Wong Y.Q., Khitun A.A., Baker I., Thompson R.C. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice // Earth's Future. 2014. V. 2(6). P. 315–320. DOI 10.1002/2014EF000240
56. Oriekhova O., Stoll S. Heteroaggregation of nanoplastic particles in the presence of inorganic colloids and natural organic matter // Environ. Sci.: Nano. 2018. V. 5(3). P. 792–799. DOI 10.1039/C7EN01119A
57. Plastics Europe. Plastics – the Facts 2017. https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf
58. Rillig M.C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? // Environ. Sci. Technol. 2012. V. 46. P. 6453–6454. DOI 10.1021/es302011r
59. Scheurer M., Bigalke M. Microplastics in Swiss floodplain soils // Environ. Sci. Technol. 2018. V. 52(6). P. 3591–3598. DOI 10.1021/acs.est.7b06003
60. Sutton R., Mason S.A., Stanek S.K., Willis-Norton E., Wren I.F., Box C. Microplastic contamination in the San Francisco Bay, California, USA // Mar. Pollut. Bull. 2016. V. 109(1). P. 230–235. DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.05.077
61. Syberg K., Khan F.R., Selck H., Palmqvist A., Banta G.T., Daley J., Sano L., Duhaime M.B. Microplastics: addressing ecological risk through lessons learned // Environ. Toxicol. Chem.. 2015. V. 34(5). P. 945–953. DOI 10.1002/etc.2914
62. Thompson R.C., Olsen Y., Mitchell R.P., Davis A., Rowland S.J., John A.W., McGonigle D., Russell A.E. Lost at sea: where is all the plastic? // Science (Washington). 2004. V. 304(5672). P. 838. https://www.researchgate.net/profile/Steven_Rowland/publication/8575062_Lost_at_Sea_Where_Is_All_the_Plastic/links/0fcfd51001f3893f44000000/Lost-at-Sea-Where-Is-All-the-Plastic.pdf
63. UNEP. Plastic in Cosmetics. 2015. 33 p. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/21754/PlasticinCosmetics2015Factsheet.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
64. Van Cauwenbergh L., Vanreusel A., Mees J., Janssen C.R. Microplastic pollution in deep-sea sediments // Environ. Pollut. 2013. V. 182. P. 495–499. DOI 10.1016/j.envpol.2013.08.013
65. Veerasingam S., Mugilarasan M., Venkatachalamapathy R., Vethamony P. Influence of 2015 flood on the distribution and occurrence of microplastic pellets along the Chennai coast, India // Mar. Pollut. Bull. 2016. V. 109(1). P. 196–204. DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.05.082
66. Wagner M., Scherer C., Alvarez-Muñoz D., Brennholt N., Bourrain X., Buchinger S., Fries E., Grosbois C., Klasmeyer J., Marti T., Rodriguez-Mozaz S., Urbatzka R., Vethak D., Winther-Nielsen M., Reijerscheid G. Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know // Environ. Sci. Eur. 2014. V. 26(1). P. 1–9. DOI 10.1186/s12302-014-0012-7
67. Weinstein J.E., Crocker B.K., Gray A.D. From macroplastic to microplastic: degradation of high-density polyethylene, polypropylene, and polystyrene in a salt marsh habitat // Environ. Toxicol. Chem. 2016. V. 35(7). P. 1632–1640. DOI 10.1002/etc.3432
68. Woodall L.C., Sanchez-Vidal A., Canals M., Paterson G.L., Coppel R., Sleight V., Calafat A., Rogers A.D., Narayanaswamy B.E., Thompson R.C. The deep sea is a major sink for microplastic debris // R. Soc. Open Sci. 2014. V. 1(4). P. 140317. DOI 10.1098/rsos.140317
69. Wright S.L., Thompson R.C., Galloway T.S. The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review // Environ. Pollut. 2013. V. 178. P. 483–492. DOI 10.1016/j.envpol.2013.02.031
70. Yonkos L.T., Friedel E.A., Perez-Reyes A.C., Ghosal S., Arthur C.D. Microplastics in four estuarine rivers in the Chesapeake Bay, USA // Environ. Sci. Technol. 2014. V. 48(24). P. 14195–14202. DOI 10.1021/es5036317
71. Zhang H. Transport of microplastics in coastal seas // Estuarine, Coastal Shelf Sci. 2017. V. 199. P. 74–86. DOI 10.1016/j.ecss.2017.09.032
72. Zobkov M., Belkina N., Kovalevski V., Zobkova M., Efremova T., Galakhina N. Microplastic abundance and accumulation behavior in Lake Onego sediments: a journey from the river mouth to pelagic waters of the large boreal lake // J. Environ. Chem. Eng. 2020. V. 8(5). P. 104367. DOI 10.1016/j.jece.2020.104367

-
73. Zobkov M., Esiukova E. Microplastics in Baltic bottom sediments: quantification procedures and first results // Mar. Pollut. Bull. 2017. V. 114(2). P. 724–732. DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.10.060
 74. Zobkov M., Zobkova M., Galakhina N., Efremova T. Method for microplastics extraction from Lake sediments // MethodsX. 2020. V. 7. P. 101140. DOI 10.1016/j.mex.2020.101140
 75. Zobkov M.B., Esiukova E.E. Microplastics in a Marine Environment: Review of Methods for Sampling, Processing, and Analyzing Microplastics in Water, Bottom Sediments, and Coastal Deposits // Oceanology. 2018. V. 58. P. 137–143. DOI 10.1134/S0001437017060169
 76. Zobkov M.B., Esiukova E.E., Zyubin A.Y., Samusev I.G. Microplastic content variation in water column: The observations employing a novel sampling tool in stratified Baltic Sea // Mar. Pollut. Bull. 2019. V. 138. P. 193–205. DOI 10.1016/j.marpolbul.2018.11.047