

ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОЩАДИ СУШИ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ БИОТОЙ

А. А. Тишков, А. С. Добрянский, А. Н. Кренке, А. Е. Гнеденко
Институт географии РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2022 г.

Отличительной чертой ландшафтов Арктики является обилие открытых, лишенных растительности молодых поверхностей, на которых развиваются первичные сукцессии биоты. Появление «новой суши» в этом макрорегионе обусловлено широким распространением неотектонических поднятий, отступанием ледников, высыханием термокарстовых озер, аллювиальными и эоловыми процессами. Наряду с этим в результате повсеместного поднятия уровня моря увеличиваются площади акваторий, отступают и разрушаются берега, особенно в областях распространения мерзлоты. В статье в формате синтеза литературных данных обсуждаются проблемы динамики «новой суши» в разных регионах российской Арктики. Для интегральной оценки масштабов этого явления с помощью оригинальных методов анализа космических снимков 1990–1995 и 2018–2022 гг. оценен баланс итогов разнонаправленных процессов появления «новой суши» и подъема уровня океана в западном секторе арктического побережья России. Для понимания динамики освобождающихся от заливания морем новых поверхностей анализируется ход первичной сукцессии растительности на маршах острова Колгуев.

Ключевые слова: Арктика, Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ), новая суша, первичные сукцессии, подъем уровня моря, неотектоническое поднятие суши, аккумулятивные берега, марши, биота.

Введение

Для актуализации проблемы современного развития наземных экосистем Арктики важно знать динамику новых поверхностей для их освоения биотой. Это относится к таким феноменам, как появление ранее покрытых ледниками участков суши, образование морены, намыв кос и островов в дельтах арктических рек, результаты криогенных, эоловых, неотектонических процессов и др. Важны и противоположные по вектору процессы — затопления или разрушения эрозией (термоабразия, природные и антропогенные механизмы механического разрушения и отступления береговой линии, озерообразование и пр.) в зоне контакта суши и воды.

Повсеместное распространение рассматриваемых процессов является важнейшей чертой динамики наземных экосистем Арктики, где экспонирование

новых субстратов для освоения биотой, развитие сукцессий и формирование зональных экосистем охватывают сотни и тысячи лет [1; 2]. Но есть и обратная сторона процесса, когда изменение площади компонентов системы «океан — лед — суша» приводит к сокращению численности популяций растений и животных. Например, поднятие уровня моря в Арктике лишает некоторые виды птиц и млекопитающих местообитаний. А рост площади маршей стимулирует рост численности арктических ластоногих, околородных (нуликов), водоплавающих (гусей, казарок) и морских птиц. Суть научной составляющей данной проблемы — в оценке баланса площадей вновь образующихся и исчезающих по разным причинам участков арктической суши. В разные периоды климатических циклов ее площадь может увеличиваться или сокращаться. В масштабах геологического времени Арктика испытывала мощнейшие преобразования суши, связанные с морскими трансгрессиями, горообразованием и существова-

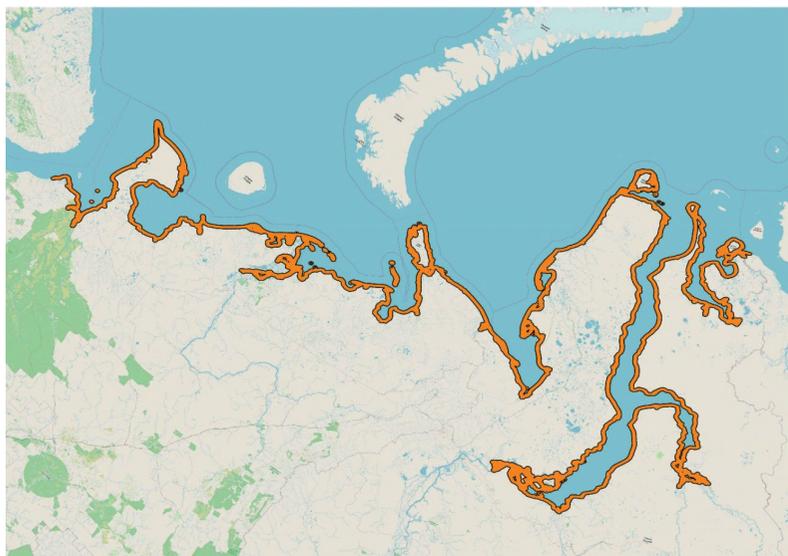


Рис. 1. Модельный участок побережья западного сектора российской Арктики. Береговая зона для оценки изменений «перманентной суши» за 1990–1995 и 2018–2022 гг. по данным Landsat TM и Landsat OLI за бесснежный период
Fig. 1. Model coast section of the Russian Arctic western sector. Coastal zone for assessing changes in «permanent land» for the 1990–1995 and 2018–2022 according to Landsat TM and Landsat OLI data for the snowless period

нием ледниковых щитов [3]. С позиций адаптации арктической биоты к избыточности первичных субстратов можно говорить о группах арктических организмов, облигатно связанных с ними. Среди растений это водоросли, лишайники, мохообразные, аркто-альпийские травы, галофитные осочки и бескильницы, среди птиц — гаги, гуси и кулики, среди млекопитающих — тюлени и моржи.

В условиях «быстрых» изменений климата конца XX — начала XXI вв. в отдельных регионах Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) с интенсивным тектоническим поднятием (области распространения аккумулятивных берегов) будет отмечаться некоторый прирост площади «новой» суши, а в других — ее сокращение из-за наступания моря. Оба положения можно рассматривать в качестве гипотезы, требующей проверки.

А еще есть куст геополитических, социально-экономических и прочих приложений новых знаний об изменении площади суши в АЗРФ, связанных с новыми оценками арктических владений, континентального шельфа и территориальных вод и т. д.

В последние десятилетия внедрение в практику дистанционных методов и использование мультиспектральной космической съемки высокого разрешения позволяют интегрально, не вдаваясь в механизмы явлений, отследить изменения арктической суши [4; 5], в том числе поверхностей, на которых развиваются первичные сукцессии биоты после отступления ледников, осушки мелководий, спуска и высыхания озер, формирования устойчивых эоловых форм и аллювиальных наносов на месте водной поверхности. Особое значение имеет

именно прибрежная литоральная и маршевая полоса, где формируются новые гнездовые, защитные и кормовые угодья для арктической фауны.

В публикациях по биогеографии Арктики часто появляется геоморфологическая терминология, связанная с формированием «новой суши», — лайды, луды, «кошки», бары, террасы или, наоборот, с криогенным разрушением берегов. Синергизм действия факторов, обусловленных потеплением климата (отступление ледников, разрушение берегов, поднятие уровня моря и пр.), по-видимому, достиг такого уровня, что можно говорить и о балансе площадей приращения и затопления суши, а в нашем случае еще и оценивать масштабы этих процессов, важных для арктической биоты.

Цель статьи — дать краткий обзор современных процессов образования в российской Арктике «новой суши» для ее освоения биотой, с помощью синтеза литературных данных и новых методов анализа космических разновременных снимков на модельном участке арктического побережья (западном секторе АЗРФ) оценить изменения площади «новой суши» за последние десятилетия, а на освобождающихся от заливания морем новых поверхностях суши (на маршах и террасах острова Колгуев) провести анализ первичной сукцессии растительности.

Материалы и методы

По литературным источникам и собственным материалам исследований анализируются проблемы образования «новой суши» в последние десятилетия в разных регионах АЗРФ с примерами по отдельным процессам (тектонические поднятия суши, отступление ледников, высыхание термокарстовых озер и др.) и разным территориям.

Предложен подход к выявлению трендов динамики «перманентной воды» и «перманентной суши» («новой» суши), оценке их состояния и прочих изменений на основе сравнения рядов дистанционных данных на примере арктического побережья западного сектора региона (рис. 1). В настоящее время широко применяются методы идентификации изменений, основанные на данных дистанционного зондирования Земли из космоса и моделирования этих изменений с помощью анализа последовательности интерпретированных разновременных аэрокосмических изображений, архивов съемки [4].

При использовании дистанционных методов изучения первичных субстратов в Арктике и их освоения

биотой внимание уделяется проблеме создания специальных систем, имеющих в комплексе развитые функции автоматизированной интерпретации данных космического мониторинга, ретроспективного анализа архивов снимков, а также моделирования изменений ландшафтного покрова. За рубежом проблемы анализа динамики земной поверхности путем моделирования решаются на основе моделей двух видов — изменения территорий землепользования (land use change models) и изменений земной поверхности (land cover change models) [4; 5]. Модели рассматриваются совместно ввиду схожести моделирования (land use/cover change).

Среди ресурсов, доступных для анализа изменений площади суши, выделяются материалы сенсора MODIS, космические снимки с разрешением от 250—500 м до 1 км, что позволяет охватить достаточно крупные территории Арктики, примыкающие к Северному Ледовитому океану, но из-за низкого разрешения этот сенсор недостаточно «чувствителен» для целей учета изменений площади. Нами эти методы опробованы для синтеза данных по динамике растительности, ее продуктивности, движению леса на Север, и в целом эффекту «озеленения» российской Арктики в XXI в. [6—10], но для оценки «новой суши» потребовались другие материалы и методы.

Для верификации предположений об изменении баланса суши в условиях потепления климата в Арктике для модельного участка береговой линии (см. рис. 1) без проявлений оледенения (поэтому из анализа исключен архипелаг Новая Земля) с точностью привязки в плане не менее 30 м определены перманентные изменения (затопление или отступление воды) за последние 30 лет. Рассмотрены два варианта глубины условной береговой границы — 5 и 2 км вглубь суши и в морскую сторону от берега. Всего проанализировано состояние 44 600 км² динамической поверхности.

Проведена оценка изменений поверхностей между двумя периодами: 1990—1995 и 2018—2022 гг. Использованы наборы данных Landsat TM и Landsat OLI за бесснежный период. Автоматизация получения данных и их обработки с целью выделения территорий/акваторий произведена на платформе GoogleEarthEngine (GEE). Выгрузка полноценного кода из GEE невозможна, так как GEE использовался только для сбора данных и их выгрузки. Для расчетов использовались программы IBM SPSS и QGIS.

Каналы мультиспектральной съемки, прежде всего ближний инфракрасный, позволяют получить качественные результаты распознавания водных объектов при различных подходах к классификации (деревья решений, пороговые классификации, экспертные системы и т. п.). Основные затруднения при выделении акватории связаны с эффектами теней (например, от рельефа) и объектами с крайне низким общим альбедо. Наша практика показывает, что искажения в классификациях носят характер

ложноположительного определения воды. Учитывая поставленную задачу, нет необходимости выделять отдельные состояния водных объектов (сезонность, частота появления). Для выделения перманентного «водного» состояния пиксела дистанционных данных необходимо, наоборот, распознать, появляется ли состояние «суша» для данного пиксела за период наблюдения. Значения «суша» и «вода» были распознаны для каждого пиксела за каждый безоблачный и бесснежный срок съемки в рамках двух указанных выше периодов. Распознавание проводилось по алгоритму, описанному в [5], но для ограниченной территории северных акваторий, что сужает вариативность обучающей выборки и делает результаты более однозначными, также был получен ряд, содержащий интерпретацию каждой сцены, приходящейся на пиксел. Для начала работы была сгенерирована регулярная сеть обучающей выборки внутри буферной зоны 5 км в обе стороны от границы суши (данные OpenStreetMap). Всего было автоматически расставлено 22 000 точек (точка на каждые 4 км²) в соответствии с масштабом пространственного анализа, что несколько отличало нашу методику от [5]. Каждая точка получила исходное обозначение «суша» или «вода». Алгоритм и последовательность действий представлены на рис. 2.

В результате анализа с применением указанных выше подходов и методов между двумя периодами (1990—1995 и 2018—2022 гг.) выделяются три категории поверхности: «без изменений», «новая перманентная вода», «потерянная перманентная вода» — «новая суша», площади которых могут быть оценены и сопоставлены для выявления современных трендов.

Верификация результатов происходила с помощью выборочного визуального контроля за пикселами с изменяющейся характеристикой «вода/суша».

Для биогеографической интерпретации анализируемых данных о динамике первичных поверхностей арктической суши в рамках полевых исследований 2022 г. на маршах и террасах острова Колгуев использован метод хроно-хорологических рядов для изучения развития растительности (сукцессий). Координаты начальной и конечной точек профиля 49°56'57,532" E 69°5'23,225" N и 49°57'24,294" E 69°5'9,695" N. С помощью стандартных геоботанических методов (закладка профиля и пробных площадок, геоботанические описания, выявление состава фитоценозов и пр.) установлена последовательность освоения сосудистыми растениями «новой суши» по мере ее выхода из-под заливания морем.

Результаты и их обсуждение

В задачи настоящей статьи не входит выявление природы сдвигов в структуре наземного покрова Арктики. Внимание сосредоточено на анализе пространственной и временной динамики состояния ландшафтов, где существенны три состояния поверхности (для упрощения анализа) — лед, вода

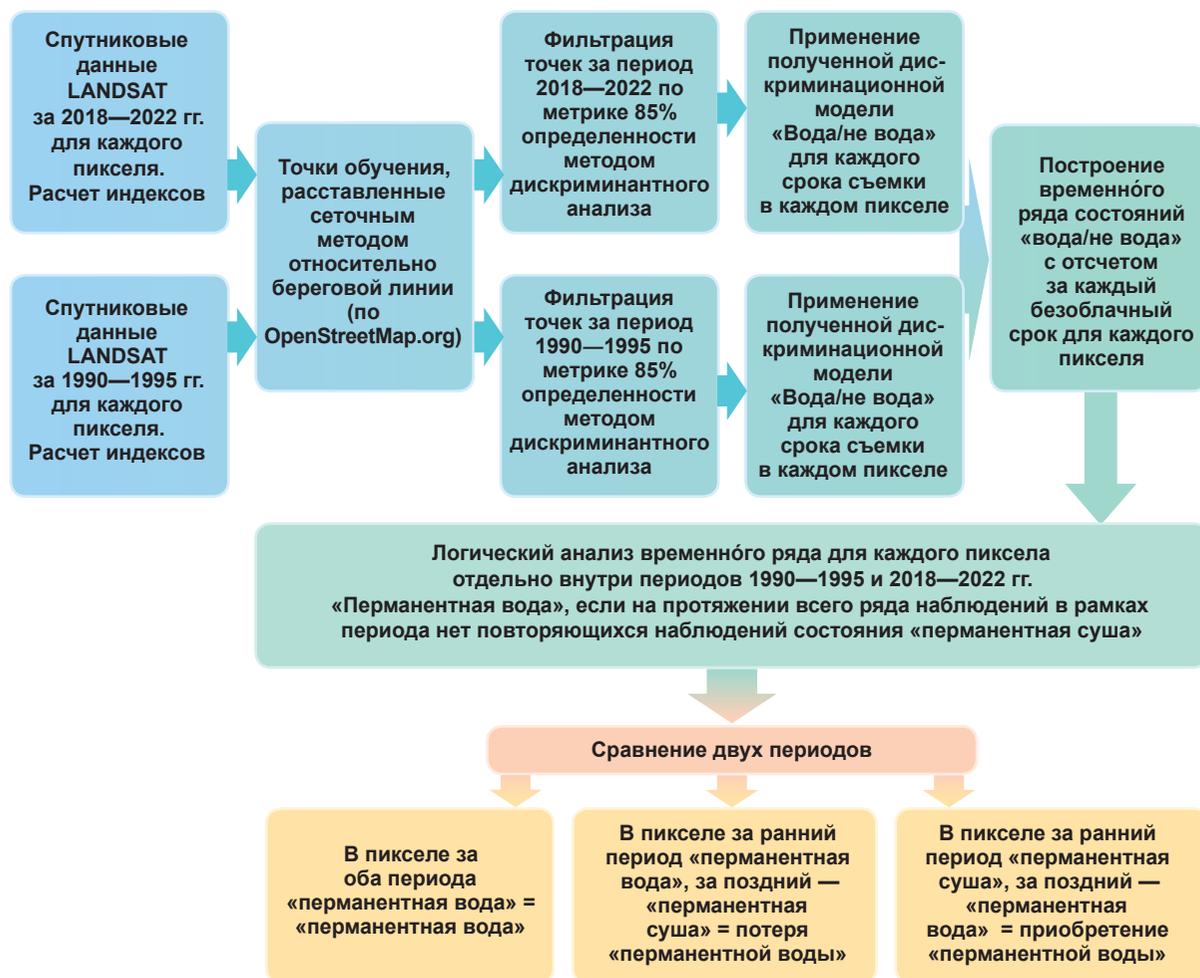


Рис. 2. Алгоритм методики исследований
Fig. 2. Research methodology algorithm

и суша. Для АЗРФ все они динамичны и могут характеризоваться на основе баланса площадей. Поэтому в данном разделе представлены результаты краткого критического обзора литературы (более 50 работ) по проблеме «новой суши» в российской Арктике, а также приведены результаты проверки гипотезы о балансе итогов разнонаправленных процессов появления «новой суши» и подъема уровня океана (для модельного участка западного сектора арктического побережья) и представлен ход первичной сукцессии растительности на маршах острова Колгуев, освобождающихся от заливания морем.

Современные географические открытия в российской Арктике и их значение для учета площади ее территории и акватории. Все 110 лет, прошедших после последнего крупного географического открытия в российской Арктике (архипелаг Северная Земля, открытый в 1913 г. экспедицией Б. А. Вильницкого), в регионе периодически возникали ситуации с выявлением ранее неизвестных участков суши. А описание самой Северной Земли завершилось экспедицией Н. Н. Урванцева только в 1930-х годах [11].

После долгого снижения исследовательской активности в российской Арктике, когда десятилетиями не посещались многие ее регионы, а отечественная дистанционная информация для этого макрорегиона была недостаточной, «возвращение в Арктику» в начале XXI в. стимулировало серию географических открытий и уточнений в арктических владениях России. Это касалось исследований по корректировке границ арктического шельфа, связанной с заявкой России на его расширение в соответствии со ст. 76 Конвенции ООН по морскому праву, в целом активизации морской и наземной деятельности и запуска отечественного спутника «Арктика М1» на высокоэллиптическую орбиту для мониторинга АЗРФ.

Остановимся кратко на хронике некоторых географических открытий XXI в. в российской Арктике [12]. В сентябре 2013 г. экипажем исследовательского судна «Адмирал Владимирский» был открыт остров Яя, самый западный из группы Новосибирских островов. В октябре 2015 г. арктическая экспедиция гидрографической службы Северного флота открыла 5 проливов, 7 мысов, 4 бухты и 9 новых

Таблица 1. Скорости относительного поднятия берегов в АЗРФ, мм в год (по данным радиоуглеродного датирования [14; 22—24])

Регион	Диапазон скоростей поднятия, мм/год
Соловецкие острова, Белое море	1,5—3,4
Беломорская биологическая станция	1,7—9,9
Озера в районе Умба, Кольский полуостров	2,4—4,5
Озера в долине реки Паз, Кольский полуостров	3,4—5,5
Остров Колгуев, Баренцево море	13,0—18,5
Земля Франца-Иосифа (плавник и кости)	0,8—5,1
Новая Земля (плавник и кости)	1,4—7,3
Северная Земля	0,5—5,0

островов в архипелаге Новая Земля. В сентябре 2016 г. вблизи ледников у Новой Земли гидрографы судна «Горизонт» обнаружили еще два новых острова. Экспедиции Русского географического общества и Северного морского флота в полевые сезоны 2018 и 2019 гг. открыли ряд новых островов. Так, в бухте Визе на Карском побережье острова Северный архипелага Новая Земля открыты 5 новых островов, которые появились после таяния льдов. Площадь объектов варьируется от 900 до 54 500 м². Также было зафиксировано «превращение» полуострова Литтрова в остров. В феврале 2018 г. школьники Артем Макаренко и Валерия Саенко в результате анализа снимков российского спутника Канопус-В и американских спутников Landsat-7/8 и Sentinel-1/2 нашли в Арктике новый остров площадью 0,19 км² около архипелага Новая Земля.

Можно заключить, что только за последние 10 лет акватория территориальных вод России, продвинувшихся вглубь Арктики, выросла на 1170,6 км², а площадь открытых островов только Новой Земли составила не менее 370 км² [13].

Современные тектонические процессы и их влияние на баланс «перманентной суши» и «перманентной воды» в российской Арктике. Новейшие тектонические и особенно гляциоизостатические процессы активно влияют на формирование «новой суши» в АЗРФ. Как отмечает А. С. Баранская [14], несмотря на десятилетия изучения современного тектонического режима в российской Арктике, многие вопросы динамики рельефа, обусловленные региональными и локальными тектоническими процессами, остаются дискуссионными. Высокая неотектоническая активность подтверждается новыми данными GPS-нивелировки, геофизическими, геологическими и геоморфологическими исследованиями почти повсеместно как в молодых складчатых областях, так и на древних платформах.

Существенно лучше изучен европейский сектор российской Арктики. Так, А. В. Баранская и Ф. А. Ро-

маненко отмечают [16], что карельский берег Белого моря испытывает новейшее поднятие, отмеченное по данным повторных нивелировок, по датированию древних береговых линий [17; 18], по наблюдениям изменения уровня моря. Скорости поднятия — от 10—12 мм в год в раннем голоцене до 1,5—4,0 мм в год в наше время. В Белом море более 3 тыс. островов, площадь которых постоянно меняется, что позволяет проследить освоение их новых поверхностей биотой. Они возникают и расширяются по мере тектонического и гляциоизостатического поднятия. Современные скорости здесь составляют 5,0—5,5 мм в год [19]. Можно проследить заселение островов новыми видами флоры и фауны, развитие первичной сукцессии [20; 21]. Об интенсивности процесса свидетельствует и тот факт, что с конца XIX в. остров Большой Соловецкий поднялся на 1 м.

Роль одного из ведущих рельефообразующих факторов в жизни биоты АЗРФ — современных вертикальных движений земной коры — остается недостаточно изученной. В нашем случае динамичный характер арктической суши подтверждается данными их новейшей тектоники. Он связан с изменениями уровня моря, поскольку и трансгрессии, и регрессии накладываются на поднятие и опускание берегов. О масштабах этого явления в АЗРФ можно судить по данным о средних скоростях относительного поднятия берегов (табл. 1).

Линейный тренд среднего уровня Северного Ледовитого океана в XXI в. по данным альтиметрии составил $2,22 \pm 0,4$ мм в год для 95%-ного доверительного интервала [25; 26]. Сопоставление этих цифр с данными табл. 1 показывает, что в каждом регионе есть территории с разнонаправленными трендами, а баланс «новой воды» и «новой суши» зависит от темпов поднятия суши и характера берегов. В модельном секторе АЗРФ, который мы использовали для проверки гипотезы, между Чёшской и Печорской губами доминируют абразивные берега (см. рис. 1), а далее на восток — аккумулятивные

Таблица 2. Доля площади территорий регионов АЗРФ, вовлеченных в экзогенные процессы (по [27]), %

Регион АЗРФ	Экзогенные процессы				
	денудационные и денудационно-аккумулятивные	криогенные и посткриогенные	эоловые	биогенно-хемогенные	флювиальные
Архангельская область	36,28	45,47	1,17	13,7	3,38
Красноярский край	27,77	51,82	2,65	7,27	10,49
Мурманская область	45,15	34,35	0,00	14,24	6,26
Ненецкий АО	25,02	54,69	1,97	10,18	8,14
Республика Карелия	92,92	0,00	0,00	4,49	2,59
Республика Коми	31,71	50,00	6,13	0,47	11,69
Республика Саха (Якутия)	22,66	40,90	0,00	2,55	33,89
Чукотский АО	40,20	48,87	0,00	0,36	10,57

с линейной скоростью отступления 0,5—2,0 м в год. Нами по описанной выше методике были подсчитаны площади категорий новой «перманентной воды» и новой «перманентной суши». В полосе анализа 5 км площадь «новой воды» составила 1263 км², а «новой суши» — 456 км², в полосе 2 км — 973 и 270 км² соответственно.

Площади перманентной воды изменяются непропорционально для глубины анализа в 5 и 2 км, 77% площади приходится на первые 2 км. Средние площади участков одинаковы в обоих вариантах анализа и составляют 4000 м². У потерянных и новых площадей отличаются наиболее крупные характерные участки — для новых участков характерен размер 1—2 км² и максимум в 20 км², тогда как у участков потерянной суши средняя площадь составляет 0,5—1,0 км² до 4 км².

С запада на восток модельного региона площади потерянных и новых участков «перманентной воды» меняются в соответствии с изменением типа берегов [27]. Максимальных значений потери акваторий достигают в устьях крупных рек (например, Печоры) и в зонах аккумулятивных берегов (например, на северо-востоке острова Колгуев, где и был заложен профиль для изучения первичной сукцессии).

Интенсификация экзогенных процессов как фактор изменений арктической суши. В АЗРФ активизация деструктивных экзогенных, в том числе мерзлотных процессов (деформация грунтов, термокарст и термоэрозия) проявляется особенно интенсивно вдоль береговой зоны, а также в очагах промышленного освоения и вдоль линейных сооружений (нефте- и газопроводов, железных и автомобильных дорог и др.). Поэтому их интенсивность

существенно меняется в разных регионах (табл. 2). Некоторые экзогенные процессы напрямую связаны с формированием «новой суши», например денудационно-аккумулятивные или эоловые (дюнообразование). Потепление и подъем уровня моря обуславливают интенсификацию термоабразии берегов, затопление приморских равнин.

Берега арктических морей России от Кольского полуострова до восточной оконечности Чукотского полуострова простираются на 22 635 км, а с учетом берегов арктических островов длина береговой линии возрастает до 36 136 км. Темпы абразивных процессов определяются экзогенными факторами — волновой энергией моря, режимом морского льда, температурой воздуха, а также криолитолизом. Их максимальные темпы наблюдаются в пределах Ямало-Гыданского побережья Карского моря, где берега сложены льдистыми дисперсными породами, и от устья реки Хатанга в море Лаптевых до Чаунской губы в Восточно-Сибирском море, где обнажаются высокольдистые тонкодисперсные отложения с жильными льдами, а берега отступают по 2—4 м в год.

Таяние арктических ледников и сопровождающие его процессы трансформации суши. Согласно Каталогу ледников России (www.glasru.ru/) — части международной базы данных «Глобальное измерение наземного льда из космоса» (GLIMS), площадь ледников в России за последние десятилетия сократилась на 9,3%. В АЗРФ темпы этих изменений меньше, хотя уровень потепления здесь более высокий. На Новой Земле потери составили всего 5,94%, на островах Де-Лонга — 19,11%, на хребте Черского — 44,4%, на Полярном Урале — 63%, а на

Таблица 4. Изменение площади современного оледенения крупнейших архипелагов российской Арктики с середины XX в. по первые декады XXI в.

Район	Randolph Glacier Inventory V. 6, 2017*, км ²	Каталог ледников России, 2021**, км ²	Каталог ледников СССР***, км ²	Изменения: Randolph — Каталог СССР, км ² (%)	Изменения: Каталог России — Каталог СССР, км ² (%)
Земля Франца-Иосифа	12 762	12 530	13 739	-977 (-8%)	-1209 (-9%)
Новая Земля	22 128	22 241	24 413	-2285 (-10%)	-2172 (-9%)
Северная Земля	16 701	16 775	18 325	-1624 (-10%)	-1550 (-8%)
Итого	51 591	51 546	56 477	-4886 (-9%)	-4931 (-9%)

* Randolph Glacier Inventory — A Dataset of Global Glacier Outlines, Version 6 / RGI Consortium. Boulder, Colorado USA, 2017. — URL: <https://doi.org/10.7265/4m1f-gd79> (по анализу космоснимков 2001—2002 гг.).

** По [33].

*** Земля Франца-Иосифа и Новая Земля — по снимкам 1952—1953 гг., Северная Земля — по снимкам 1965—1983 гг.

острове Врангеля ледники исчезли [28]. Нас интересуют прежде всего ледники, перекрывающие своими выводными языками мелководья с участками суши, а также отступающие ледники, которые по мере сокращения высвобождают новые поверхности суши. Таких много на Новой Земле и Земле Франца-Иосифа, где, несмотря на сравнительно низкие темпы сокращения оледенения, высоты показателя потерь объемов льда и прироста «новой суши».

В табл. 4 приведены данные о площади ледников АЗРФ, полученные в разные периоды наблюдений и обобщенные в трех каталогах. Оценки систематизированы А. Ф. Глазовским. При сравнении цифр надо учитывать, что в исследованиях использовались аэро- и космические снимки разного разрешения и разных периодов.

Для Новой Земли известно [29], что в целом ледники, заканчивающиеся в море, отступали в два-три раза быстрее, чем ледники, заканчивающиеся на суше. То есть при таянии освобождалось больше площади мелководий, чем формировалось «новой суши».

Для сравнения с другими районами Арктики отметим, что на севере острова Элсмир в Канаде 1773 ледника примерно с 1999 по 2015 гг. сократили свою площадь на 1705,3 км². Это около 5,9%. Шельфовые ледники понесли наибольшие потери относительно своих размеров — до 42,4%. Ледники с плавающими языками и заканчивающиеся на суше сократили площадь на 4,9% по сравнению с 1999 г. [30].

О темпах убывания площади ледников Шпицбергена (около 80 км² в год) сведения приведены в [31], а по циркумполярной Арктике — в [32].

Формирование участков «новой суши» на месте усыхающих термокарстовых озер. Одним из феноменов АЗРФ последних десятилетий можно считать высыхание термокарстовых озер. Оно про-

исходит повсеместно, но с разной интенсивностью. Т. В. Родионова [38] получила объективные данные о современном сокращении их площади на 1,7% (на европейском Севере — на 1,1%, в Западной Сибири — на 2,9%), на Ямале, Гыдане и на севере Западно-Сибирской низменности — на 11% [38].

Начиная с 2000-х годов проводится анализ динамики арктических озер, основанный на сопоставлении разновременных космических снимков [34—36]. В некоторых работах указывается на прямую взаимосвязь между изменением площади озер и потеплением климата, в других такая связь не прослеживается. При этом в пределах одной территории у разных исследователей наблюдаются противоречивые результаты, что обусловлено недостатками использованных методик [34—37].

Изменения интенсивности аллювиальных процессов. Отметим перспективы динамики площади суши в АЗРФ, связанные с климатогенным изменением стока арктических рек. Гидрологические модели, основанные на глобальной циркуляции в системе океан — атмосфера, показывают увеличение стока рек бассейна Северного Ледовитого океана, а как следствие — рост объемов твердого стока, в том числе в холодный период [39]. Около 10% материкового побережья российской Арктики составляют речные дельты [40]. Наиболее крупные из них у Лены (32 тыс. км²), Яны и Индигирки (6,6 и 6,0 тыс. км² соответственно), Печоры (2,9 тыс. км²). Общий сток рек в Северный Ледовитый океан с 1980-х годов в условиях потепления климата вырос примерно на 4—8% (исключение — Обь, где сток стабилизировался). Отмечается и рост наносов и интенсивности русловых процессов, вызывающий выдвигание морского края дельты в море, а значит, и активное приращение площади суши. При анализе материалов дистанци-

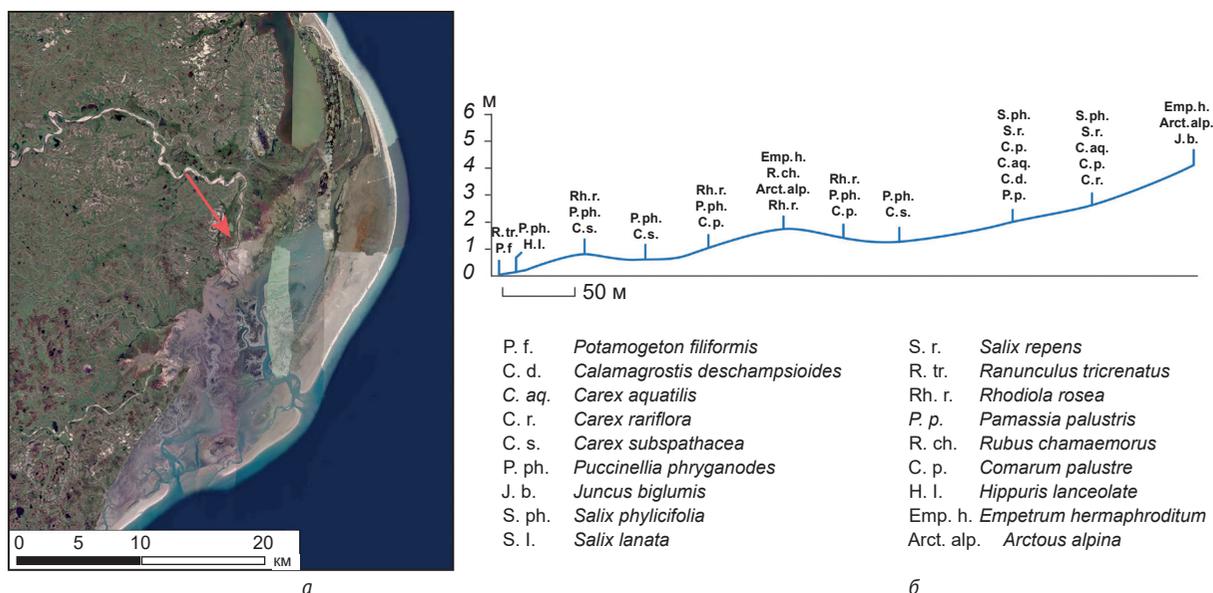


Рис. 3. Район закладки модельного профиля для изучения первичных сукцессий на маршах, северо-восток острова Колгуев, Печорское море (а) и хроно-хорологический ряд растительности от маршей «низкого уровня» до первой морской террасы, полевая сезон 2022 г. (б). Снимок Sentinel-2 с сайта Европейского космического агентства (Copernicus Sentinel data 2021, processed by ESA)

Fig. 3. Area of laying a model profile for studying primary successions on marshes, north-east of Kolguev Island, the Pechora Sea (a) and chrono-chorological series of vegetation from «low level» marshes to the first marine terrace, data of field season 2022 (b). Sentinel-2 image from the European Space Agency website (Copernicus Sentinel data 2021, processed by ESA)

онного зондирования (см. выше) побережья западного сектора АЗРФ нами выявлен рост площади «новой суши» именно в дельте Печоры.

Развитие растительности на участках новой суши и оценки скорости ее освоения биотой.

В Арктической зоне существует несколько направлений освоения «новой суши» биотой: на приморских маршах, днищах спущенных озер, скальных выходах и моренах отступающих ледников. Среди них можно выделить сукцессии на маршах, отличающихся высокой продуктивностью и ценными кормовыми качествами для многих видов водоплавающих птиц [41]. Они распространены по всему побережью российской Арктики и формируются на низких аккумулятивных берегах в условиях морских приливов и засоления почвы. В зависимости от интенсивности воздействия моря выделяется несколько уровней маршей: низкого уровня, постоянно затопляемые во время приливов, среднего уровня, заливаемые во время высоких приливов, и высокого уровня, подвергающиеся воздействию морских вод при сильных штормах, нагонной волне и высоких приливах [42].

Можно выделить несколько общих схем первичных сукцессий на маршах. Для маршей Баренцева, Карского и Восточно-Сибирского морей характерно общее заселение низкого уровня *Puccinellia phryganoides*, *Carex subspathacea* и *Bryum teres*, проективное покрытие которых значительно увеличивается при переходе к маршам среднего уровня. Также в сукцессии участвуют *Stellaria humifusa*, *Potentilla egedii*, *Arctanthemum hultenii* и *Plantago schrenkii*. На маршах высокого уровня среди до-

минантов обычны *Calamagrostis deschampsoides*, *Dupontia psilosantha* и др. [43].

По мере удаления от уреза воды, изменения режима затопления и степени засоленности происходит смена сообществ. Из-за новейших тектонических движений, намыва береговой линии и приноса материала, размытого у абразионных берегов, площади, доступные для формирования маршей, расширяются, но при этом изменения климата угрожают уже существующим маршевым сообществам из-за изменений ледовых условий и осенних и зимних штормов [44]. С течением времени при продолжающемся подъеме суши происходит формирование морских террас, на которых влияние моря ослабляется и формируются зональные экосистемы. Для тундровой зоны продолжительность первичных сукцессий варьирует от нескольких столетий до нескольких тысяч лет и определяется характером локальных условий, субстратом и климатическими условиями [2; 45].

На острове Колгуев, имеющем сравнительно высокие темпы неотектонических поднятий суши (до 18,5 мм в год [15] при среднем темпе подъема моря 2,22±0,4 мм/год [29]), нами на маршах заложены модельные профили — от «низкого уровня» до первой морской террасы с растительным покровом, близким к зональному, и постоянные пробные площадки для изучения сукцессий растительности (рис. 3).

Хроно-хорологический ряд растительности демонстрирует относительно высокую скорость освоения растительностью первичного субстрата (500—800 лет для маршей низкого уровня) и корот-



а

б

Рис. 4. Марши острова Колгуев (а) и фрагменты зональной растительности на первой морской террасе (б). Фото А. Е. Гнеденко
Fig. 4. Marches of Kolguev Island (a) and fragments of zonal vegetation on the first marine terrace (b). Photo by A. E. Gnedenko

кий период появления фрагментов зональной растительности (кустарничково-моховых и кустарничково-моховых тундр) — около 1000—1200 лет (рис. 4), что согласуется с ранее полученными для этого региона оценками возраста подобных по абсолютной высоте поверхностей и темпов сукцессии с помощью C^{14} [3; 15; 45].

Заключение

Анализ литературных и собственных данных о современной динамике «новой суши» в регионах АЗРФ, связанной с разными факторами (неотектоника, подъем уровня моря, таяние ледников, высыхание озер, криогенная эрозия, эоловые и аллювиальные процессы и пр.), показал возможность ее интегральной количественной оценки. Важно, что наши выводы, как правило, совпадают с данными других исследователей. Выявлено, что простое сопоставление площадей «перманентной суши» и «перманентной воды» за определенный период в условиях «быстрых» климатических изменений в Арктике не дает выражения актуального состояния суши в целом. Его инвариантная составляющая существенно меньше, чем в более южных континентальных биомах, где скорости первичных сукцессий значительно выше. Но оценка интенсивности формирования новых поверхностей — ключ к пониманию биогеографических последствий изменений климата в арктическом регионе.

Именно динамичность земной поверхности и осваивающей ее биоты — главная отличительная черта ландшафтов Арктики. Необходимо знать, какая часть «новой суши» вовлечена в данный момент в первичное освоение флорой и фауной и как она соотносится со «стабильной» частью ландшафта. Наши выводы сводятся к тому, что аренами активного образования «новой суши» в АЗРФ в условиях потепления климата становятся дельты арктических рек, области усыхания термокарстовых озер, примор-

ские зоны архипелагов с отступающими ледниками и аккумулятивными берегами, территории и акватории с высокими скоростями поднятия (выше скорости поднятия уровня океана — $2,22 \pm 0,4$ мм/год). Используя новые методики синтеза многолетних данных дистанционного зондирования Земли для модельного участка побережья (западный сектор российской Арктики, где преобладают абразивные берега), мы установили, что за последние 30 лет соотношение «перманентной суши» к «перманентной воде» составило 1:3. В местах распространения аккумулятивных берегов (например, на северо-востоке острова Колгуев), где скорости поднятия суши выше, чем рост уровня океана, идет активное формирование «новой суши» и развиваются первичные сукцессии. Определяющими появление «новой суши» на фоне потепления климата и роста уровня океана становятся неотектонические процессы, происходящие с разной интенсивностью повсеместно в АЗРФ, отступление ледников, высыхание озер, криогенные процессы и пр. Перспективы их изучения, в том числе дистанционными методами, очевидны и важны как с теоретических, так и с прикладных позиций — геополитических, экономических и экологических.

Статья подготовлена по гранту РНФ № 22-17-00168 «Биогеографические последствия изменений климата в Российской Арктике».

Авторы благодарят А. Ф. Глазовского за помощь в оценке оледенения АЗРФ и анонимного рецензента за ценные замечания и рекомендации по рукописи.

Литература

1. Тишков А. А. Биосферные функции природных экосистем России. — М.: Наука, 2005. — 309 с.
Tishkov A. A. Biospheric functions of natural ecosystems in Russia. Moscow, Nauka, 2005, 309 p. (In Russian).

2. Тишков А. А. Сукцессии растительности зональных экосистем: сравнительно-географический анализ, значение для сохранения и восстановления биоразнообразия // Изв. Самар. науч. центра РАН. — 2012. — Т. 14, № 1 (5). — С. 1387—1391.
Tishkov A. A. Vegetation successions of zonal ecosystems: comparative geographical analysis, significance for the conservation and restoration of biodiversity. Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN, 2012, vol. 14, no. 1 (5), pp. 1387—1391. (In Russian).
3. Serebryanny L. R., Tishkov A. A., Malyasova E. S., Solomina O. N., Ilves E. O. Reconstruction of the development of vegetation in Arctic high latitudes. Polar geography and geology, 1985, vol. 9, pp. 308—321.
4. Замятин А. В., Марков Н. Г. Анализ динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли. — М.: Физматлит, 2007. — 176 с.
Zamyatin A. V., Markov N. G. Analysis of the dynamics of the earth's surface according to the data of remote sensing of the Earth. Moscow, Fizmatlit, 2007, 176 p. (In Russian).
5. Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature, 2016, vol. 540, pp. 418—422.
6. Тишков А. А., Кренке-мл. А. Н. «Позеленение» Арктики в XXI в. как эффект синергизма действия глобального потепления и хозяйственного освоения // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 4. — С. 28—38.
Tishkov A. A., Krenke Jr A. N. "Greening" of the Arctic in the XXI century as a synergy effect of global warming and economic development. Arctic: Ecology and Economy, 2015, no. 4, pp. 28—38. (In Russian).
7. Тишков А. А., Вайсфельд М. А., Глазов П. М. и др. Биотически значимые тренды климата и динамика биоты российской Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 1 (33). — С. 71—87.
Tishkov A. A., Weisfeld M. A., Glazov P. M., Morozova O. V., Puzachenko A. Yu., Tertitsky G. M., Titova S. V. Biotically significant climate trends and biota dynamics in the Russian Arctic. Arctic: Ecology and Economy, 2019, no. 1 (33), pp. 71—87. (In Russian).
8. Тишков А. А., Белоновская Е. А., Глазов П. М. и др. Антропогенная трансформация арктических экосистем России: подходы, методы, оценки // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 4 (36). — С. 38—51.
Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Glazov P. M., Krenke A. N., Titova S. V., Tsarevskaya N. G., Shmatova A. G. Anthropogenic transformation of Arctic ecosystems in Russia: approaches, methods, assessments. Arctic: Ecology and Economy, 2019, no. 4 (36), pp. 38—51. (In Russian).
9. Тишков А. А., Белоновская Е. А., Глазов П. М. и др. Тундра и лес российской Арктики: вектор взаимодействия в условиях современного потепления климата // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 3 (39). — С. 48—61.
Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Glazov P. M., Krenke A. N., Puzachenko A. Yu., Tertitsky G. M., Titova S. V. Tundra and forests of the Russian Arctic: a vector of interaction in the conditions of modern climate warming. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 3 (39), pp. 48—61. (In Russian).
10. Тишков А. А., Белоновская Е. А., Кренке А. Н. и др. Изменения биологической продуктивности наземных экосистем российской Арктики в XXI в. // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 1. — С. 29—41. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-29-40.
Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Krenke A. N., Titova S. V., Tsarevskaya N. G. Changes in the biological productivity of terrestrial ecosystems in the Russian Arctic in the XXI century. Arctic: Ecology and Economy, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 29—41. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-29-40. (In Russian).
11. Тишков А. А., Асоян Д. С. Географические открытия XX века // Природа. — 2020. — № 2. — С. 25—37.
Tishkov A. A., Asoyan D. S. Geographical discoveries of the XX century. Priroda, 2020, no. 2, pp. 25—37. (In Russian).
12. Лукин Ю. Ф. Российская Арктика прирастает островами // Арктика и Север. — 2015. — № 18. — С. 61—80.
Lukin Yu. F. The Russian Arctic grows with the islands. Arktika i Sever, 2015, no. 18, pp. 61—80. (In Russian).
13. В Арктике официально открыты пять новых островов. — URL: <https://www.rgo.ru/ru/article/v-arktike-oficialno-otkryty-pyat-novyh-ostrovov>.
Five new islands have been officially discovered in the Arctic. Available at: <https://www.rgo.ru/ru/article/v-arktike-oficialno-otkryty-pyat-novyh-ostrovov>. (In Russian).
14. Баранская А. В. Роль новейших вертикальных тектонических движений в формировании рельефа побережий Российской Арктики: Дис. ... канд. геогр. наук. — СПб.: С.-Петерб. гос. ун-т, 2015. — 258 с.
Baranskaya A. V. The role of the latest vertical tectonic movements in the formation of the relief of the coasts of the Russian Arctic. Diss. for the degree of Candidate Geogr. Sciences. St. Petersburg, S.-Petersb. gos. un-t, 2015, 258 p. (In Russian).
15. Материалы Всероссийской научной конференции «Поздне- и постгляциальная история Белого моря: геология, тектоника, седиментационные обстановки, хронология»: сборник статей. — М.: «КДУ», «Унив. книга», 2018. — 196 с.
Proceedings of the All-Russian scientific conference "Late and post-glacial history of the White Sea: geology, tectonics, sedimentation settings, chronology": collection of articles. Moscow, KDU, Univ. kniga, 2018. 196 p. (In Russian).
16. Баранская А. В., Романенко Ф. А. Новейшие вертикальные движения земной коры Карельского берега Белого моря // Материалы Всероссийской научной конференции «Поздне- и постгляциальная история Белого моря: геология, тектоника, седиментационные обстановки, хронология». — М.: «КДУ», «Унив. книга», 2018. — С. 13—19.
Baranskaya A. V., Romanenko F. A. The latest vertical movements of the earth's crust of the Karelian coast

of the White Sea. Proceedings of the All-Russian scientific conference "Late and post-glacial history of the White Sea: geology, tectonics, sedimentation settings, chronology": collection of articles. Moscow, KDU, Univ. kniga, 2018, pp. 13—19. (In Russian).

17. Колька В. В., Евзеров В. Я., Мёллер Я. Й., Корнер Д. Г. Последледниковые гляциоизостатические поднятия на северо-востоке Балтийского щита // Новые данные по геологии и полезным ископаемым Кольского полуострова. — Апатиты: КНЦ РАН, 2005. — С. 15—25.

Kolka V. V., Evzerov V. Ya., Møller J. J., Korner G. D. Post-glacial glacioisostatic uplifts in the northeast of the Baltic Shield. New data on geology and minerals of the Kola Peninsula. Apatity, KSC RAS, 2005, pp. 15—25. (In Russian).

18. Романенко Ф. А., Шилова О. С. Последледниковые поднятия карельского берега Белого моря по данным радиоуглеродного и диатомового анализа озерно-болотных отложений п-ва Киндо // Докл. РАН. — 2012. — Т. 442. — С. 544—548.

Romanenko F. A., Shilova O. S. Post-glacial uplifts of the Karelian coast of the White Sea according to the data of radiocarbon and diatom analysis of lacustrine-marsh deposits of the Kindo Peninsula. Doklady RAN, 2012, vol. 442, pp. 544—548. (In Russian).

19. Олюнина О. С., Романенко Ф. А. Поднятие Карельского берега Белого моря в голоцене по результатам изучения торфяников // Материалы V Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода: «Фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований». — М.: ГЕОС, 2007. — С. 312—315.

Olyunina O. S., Romanenko F. A. Uplift of the Karelian coast of the White Sea in the Holocene based on the results of the study of peat bogs. Materialy V Vserossiiskogo soveshchaniya po izucheniyu chetvertichnogo perioda: "Fundamental'nye problemy kvartera: itogi izucheniya i osnovnye napravleniya dal'neishih issledovaniy". Moscow, GEOS, 2007, pp. 312—315. (In Russian).

20. Кожин М. Н. Флористическое разнообразие островов Кандалакшского залива // Вестн. Моск. унта. Сер. 5. География. — 2011. — № 6. — С. 85—90.

Kozhin M. N. Floristic diversity of the islands of the Kandalaksha Bay. Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya, 2011, no. 6, pp. 85—90. (In Russian).

21. Черенков А. Б., Семашко В. Ю., Тertiцкий Г. М. Птицы Соловецких островов и Онежского залива. — Архангельск, 2014. — 383 с.

Cherenkov A. B., Semashko V. Yu., Tertitsky G. M. Birds of the Solovetsky Islands and Onega Bay. Arkhangelsk, 2014, 383 p. (In Russian).

22. Субетто Д. А. Донные отложения озер: палеоклиматические реконструкции. — СПб.: Наука, 2009. — 338 с.

Subetto D. A. Bottom sediments of lakes: paleoclimatic reconstructions. St. Petersburg, Nauka, 2009, 338 p. (In Russian).

23. Corner G. D., Kolka V. V., Yevzerov V. Y., Møller J. J. Postglacial relative sea-level change and stratigraphy

of raised coastal basins on Kola Peninsula, northwest Russia. Global and Planetary Change, 2001, vol. 31, pp. 155—177.

24. Corner G. D., Yevzerov V. Y., Kolka V. V., Møller J. J. Isolation basin stratigraphy and Holocene relative sea—level change at the Norwegian-Russian border north of Nikel, northwest Russia. Boreas, 1999, vol. 28, pp. 146—166.

25. Rose S. K., Andersen O. B., Passaro M., Ludwigsen C. A., Schwatke C. Arctic Ocean Sea Level Record from the Complete Radar Altimetry Era: 1991—2018. Remote Sensing, 2019, vol. 11 (14), 1672. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs11141672>.

26. Лемешко Е. Е., Лемешко Е. М. Тренды уровня Северного Ледовитого океана // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. — 2020. — № 2. — С. 28—40.

Lemeshko E. E., Lemeshko E. M. Trends in the level of the Arctic Ocean. Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon morya, 2020, no. 2, pp. 28—40. (In Russian).

27. Лихачёва Э. А., Кошкарев А. В., Морозова А. В. и др. Эколого-геоморфологический анализ Арктической зоны Российской Федерации. — М.: Медиа-Пресс, 2020. — 120 с.

Likhacheva E. A., Koshkarev A. V., Morozova A. V., Nekrasova L. A., Chesnokova I. V., Chernogaeva G. M. Ecological and geomorphological analysis of the Arctic zone of the Russian Federation. Moscow, Media-Press, 2020, 120 p. (In Russian).

28. Хромова Т. Е., Носенко Г. А., Глазовский А. Ф. и др. Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016—2019 гг.) // Лед и Снег. — 2021. — Вып. 61 (3). — С. 341—358.

Khromova T. E., Nosenko G. A., Glazovsky A. F., Muravyov A. Ya., Nikitin S. A., Lavrentiev I. I. New Catalog of Russian Glaciers Based on Satellite Data (2016—2019). Lyod i Sneg, 2021, vol. 61 (3), pp. 341—358. (In Russian).

29. Carr J. R., Bell H., Killick R., Holt T. Exceptional retreat of Novaya Zemlya's marine-terminating outlet glaciers between 2000 and 2013. The Cryosphere, 2017, vol. 11, pp. 2149—2174. Available at: <https://doi.org/10.5194/tc-11-2149-2017>.

30. White A., Copland L. Area change of glaciers across Northern Ellesmere Island, Nunavut, between ~1999 and ~2015. J. of Glaciology, 2018, vol. 64 (246), pp. 609—623.

31. Nuth C., Kohler J., König M., von Deschwanden A., Hagen J. O., Käb A., Moholdt G., Pettersson R. Decadal changes from a multi-temporal glacier inventory of Svalbard. The Cryosphere, 2013, vol. 7, pp. 1603—1621. Available at: <https://doi.org/10.5194/tc-7-1603-2013>.

32. Mernild S. H., Malmros J. K., Yde J. C., De Villiers S., Tvis K. N., Wilson R. Glacier changes in the circumpolar Arctic and subArctic, mid-1980s to late-2000s/2011. Geografisk Tidsskrift-Danish J. of Geography, 2015, vol. 115, no. 1, pp. 39—56. Available at: <https://doi.org/10.1080/00167223.2015.1026917>.

33. Каталог ледников СССР. — Т. 3: Северный край / Ин-т географии АН СССР. — М.: Гидрометеоздат, 1965. — 147 с.
Catalog of glaciers of the USSR. Vol. 3. Northern Territory. Institut geografii AN SSSR. Moscow, Gidrometeoizdat, 1965, 147 p. (In Russian).
34. Smith L. C., Sheng Y., MacDonald G. M., Hinzman L. D. Disappearing Arctic lakes. *Science*, 2005, vol. 308, pp. 1429.
35. Anisimov O. A., Vaughan D. G., Callaghan T. V., Furgal C., Marchant H., Prowse T. D., Vilhjalsson H., Walsh J. E. Polar regions (Arctic and Antarctic). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, C. E. Hanson, Eds. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2007, pp. 653—685.
36. Кирпотин С. Н., Полищук Ю. М., Брыксина Н. А. Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления // *Вестн. Том. гос. ун-та*. — 2008. — № 311. — С. 185—196.
Kirpotin S. N., Polishchuk Yu. M., Bryksina N. A. Dynamics of areas of thermokarst lakes in continuous and discontinuous permafrost zones of Western Siberia in the context of global warming. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo universiteta*, 2008, no. 311, pp. 185—196. (In Russian).
37. Брыксина Н. А., Кирпотин С. Н. Ландшафтно-космический анализ изменений площади и количества термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири // *Вестн. Том. гос. ун-та. Биология*. — 2012. — № 4 (20). — С. 185—194.
Bryksina N. A., Kirpotin S. N. Landscape and space analysis of changes in the area and number of thermokarst lakes in the permafrost zone of Western Siberia. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, 2012, no. 4 (20), pp. 185—194. (In Russian).
38. Родионова Т. В. Исследование динамики термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук / Геогр. фак. МГУ им. М. В. Ломоносова. — М., 2013. — 26 с.
Rodionova T. V. Investigation of the dynamics of thermokarst lakes in various regions of the permafrost zone of Russia based on space images. Abstract of the dissertation for the degree of candidate of geography sciences, Moscow, Geograficheskii fakul'tet MGU im M. V. Lomonosova. Moscow, 2013, 26 p. (In Russian).
39. Долгополова Е. Н. Роль многолетнемерзлых пород в формировании гидролого-морфологического режима устьев рек водосбора Северного Ледовитого океана // *Арктика: экология и экономика*. — 2018. — № 4 (32). — С. 70—85.
Dolgoplova E. N. The role of permafrost in the formation of the hydrological and morphological regime of river mouths in the catchment area of the Arctic Ocean. *Arctic: Ecology and Economy*, 2018, no. 4 (32), pp. 70—85. (In Russian).
40. Алексеевский Н. И., Магрицкий Д. В., Михайлов В. Н. Антропогенные и естественные изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек Российской Арктики // *Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление*. — 2015. — № 1. — С. 14—31.
Aleksееvsky N. I., Magritsky D. V., Mikhailov V. N. Anthropogenic and natural changes in hydrological restrictions for nature management in the river deltas of the Russian Arctic. *Vodnoe hozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2015, no. 1, pp. 14—31. (In Russian).
41. Лавриненко И. А., Лавриненко О. В., Добрынин Д. В. Многолетняя динамика и гибель растительности маршей Колоколковой губы Баренцева моря // *Растительность России*. — 2012. — № 21. — С. 66—77.
Lavrinenko I. A., Lavrinenko O. V., Dobrynin D. V. Long-term dynamics and death of vegetation in the marshes of the Kolokolkova Bay of the Barents Sea. *Rastitel'nost' Rossii*, 2012, no. 21, pp. 66—77. (In Russian).
42. Мосеев Д. С. Динамика растительности маршей приливных устьев рек Белого моря и Чёшской губы Баренцева моря // *Океанолог. исслед.* — 2019. — Т. 47, № 4. — С. 32—52.
Moseev D. S. Vegetation dynamics of marshes of tidal estuaries of the White Sea and the Chosha Bay of the Barents Sea. *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2019, vol. 47, no. 4, pp. 32—52. (In Russian).
43. Sergienko L. A. Salt marsh flora and vegetation of the Russian Arctic coasts. *Czech polar reports*, 2013, vol. 3 (1), pp. 30—37.
44. Hampton-Miller C. J., Neitlich P. N., Swanson K. D. A high-resolution map of coastal vegetation for two Arctic Alaskan parklands: An object-oriented approach with point training data. *PlosOne*, 2022, vol. 17 (8), e0273893. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273893>.
45. Tishkov A. A. Primary succession in arctic tundra on the west coast of Spitsbergen (Svalbard). *Polar Geography and Geology*, 1986, vol. 10, pp. 148—156. Available at: <https://doi.org/10.1080/10889378609377282>.

Информация об авторах

Тишков Аркадий Александрович, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29, стр. 4), e-mail: tishkov@biodat.ru.

Добрянский Александр Сергеевич, младший научный сотрудник, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29, стр. 4), alex@igras.ru.

Кренке Александр Николаевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29, стр. 4), e-mail: ankrenke@mail.ru.

Гнеденко Ангелина Евгеньевна, ведущий инженер-исследователь, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29, стр. 4), gnedenko.a.e@igras.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Тишков А. А., Добрянский А. С., Кренке А. Н., Гнеденко А. Е. Изменение площади суши российской Арктики для освоения биотой // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 2. — С. 188—200. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-188-200.

CHANGES IN THE LAND AREA OF THE RUSSIAN ARCTIC FOR THE BIOTA DEVELOPMENT

Tishkov, A. A., Dobryansky, A. S., Krenke, A. N., Gnedenko, A. E.

Institute of Geography RAS (Moscow, Russian Federation)

Abstract

A distinguishing feature of the Arctic zone landscapes is the abundance of open young surfaces, devoid of vegetation, on which primary successions of biota develop. They are formed mainly along the shores of the Arctic Ocean and are actively developed by flora and fauna. The emergence of a «new land» is due to the wide of neotectonic uplifts in the Arctic, the retreat of glaciers, the drying up of thermokarst lakes, and alluvial and eolian processes. Along with this, as a result of the widespread rise in sea level, there is an increase in the area of water, retreat and destruction of coasts, especially in permafrost regions. The authors, using original methods for analyzing satellite images of 1990—1995 and 2018—2022 and synthesizing published data, try to assess the balance of the outcomes of the multidirectional processes of the appearance of the “new land” and the rise of the ocean level in the western sector of the Arctic coast of Russia under the conditions of climate change.

Keywords. *Arctic, Arctic zone of the Russian Federation (AZRF), new land, primary successions, sea level rise, neotectonic land uplift, accumulative coasts, marches, biota.*

The study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 22-17-0168, <https://rscf.ru/project/22-17-00168/> “Biogeographical consequences of climate change in the Russian Arctic”.

The authors are grateful to A. F. Glazovsky for help in assessing the glaciation of the Russian Arctic and an anonymous reviewer for valuable comments and recommendations on the manuscript.

Information about the authors

Tishkov, Arkady Aleksandrovich, Doctor of Geography, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, head of laboratory, Institute of Geography of the RAS (119017, Russia, Moscow, Staromonetny per., 29), e-mail: tishkov@biodat.ru.

Dobryansky, Alexander Sergeevich, Junior Researcher, Institute of Geography of the RAS (119017, Russia, Moscow, Staromonetny per., 29), alex@igras.ru.

Krenke, Alexander Nikolaevich, PhD of Geography, Senior Researcher, Institute of Geography of the RAS (119017, Russia, Moscow, Staromonetny per., 29), e-mail: ankrenke@mail.ru.

Gnedenko, Angelina Evgenievna, Leading Research Engineer, Institute of Geography of the RAS (119017, Russia, Moscow, Staromonetny per., 29), gnedenko.a.e@igras.ru.

Bibliographic description of the article

Tishkov, A. A., Dobryansky, A. S., Krenke, A. N., Gnedenko, A. E. Changes in the land area of the Russian Arctic for the biota development. *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 188—200. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-188-200. (In Russian).

© Tishkov A. A., Dobryansky A. S., Krenke A. N., Gnedenko A. E., 2023