

ИЗМЕНЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ В XXI В.

А. А. Тишков, Е. А. Белоновская, А. Н. Кренке, С. В. Титова, Н. Г. Царевская
Институт географии РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 30 сентября 2020 г.

Проведено сравнение современных оценок продуктивности с данными, полученными в 1960–1970-х годах в процессе Международной биологической программы для экосистем российской Арктики. Это позволяет объективно выявить климатогенные тренды их продуктивности в XXI в. Используются архивы и текущие спутниковые данные для российской Арктики, в том числе AVHRR, LANDSAT, MODIS TERRA и др., представленные 30-летними и более периодами. Выявлено, что к XXI в. запасы фитомассы зональных экосистем в среднем выросли на 15–30%, а первичная продукция – на 10–15%. По сравнению с данными полевых измерений 1960–1970-х годов в конкретных точках этот рост достигал 50% и более. По показателям роста продуктивности лидируют экосистемы Европейского сектора Арктики, хотя в XXI в. тренд потепления здесь не самый высокий (0,4–0,5 °C/10 лет). Прогноз продуктивности на 2025 г. (отклонение линейного тренда в сравнении с 2000–2019 гг.) показал продолжение ее роста на Кольском полуострове, в Большеземельской тундре, полуостровах Ямал и Гыдан, а снижение – на Полярном Урале, севере Сибири и Колымской низменности. Рост удельных показателей продуктивности в XXI в. вышел на плато и, как и в случае потепления 1920–1940-х годов, не способен привести к зональным перестройкам.

Ключевые слова: продуктивность наземных экосистем, запас фитомассы, чистая первичная продукция (NPP), российская Арктика, тундра, полевые и дистанционные измерения, карта первичной продукции.

Введение

По итогам реализации Международной биологической программы (МБП, 1964–1974 гг.) на основе данных по нескольким сотням полевых измерений ранее были подготовлены обзор и карты продуктивности (запасов и продукции фитомассы) полярных пустынь, тундр и лесотундры Северной Евразии на середину 1980-х годов, т. е. до начала современного потепления климата [1; 2]. Также для «Национального атласа почв Российской Федерации» [3] одним из авторов настоящей статьи были составлены карты продуктивности экосистем России по 2700 точкам полевых измерений второй половины XX в., в том числе карты запасов и «чистой первичной продукции» (NPP) «восстановленного растительного покрова»,

где реальные показатели продуктивности экстраполируются на контуры исходной растительности, а также «актуального растительного покрова», построенные исходя из пропорции площадей экосистем с разной степенью антропогенных нарушений. На анализируемый период эти карты для регионов российской Арктики были практически идентичны, так как площади антропогенной трансформации составляли не более 1–3% площади биома. Для карт запасов и продукции углерода в экосистемах России, подготовленных для прототипа Национального доклада по экосистемным услугам России [4], использовались уже оценки первого десятилетия XXI в. Они имели существенные отличия от карт, составленных по итогам МБП. Насколько существенны изменения продуктивности арктических экосистем в условиях динамики климата в конце XX — начале XXI в.? Ответ на этот вопрос — в материалах данной статьи.

Для Арктики в условиях «быстрого» роста средне-многолетних температур изменения продуктивности растительности — наиболее интегральная характеристика последствий температурных аномалий. Последствия глобального потепления в Арктике приоритетно оцениваются посредством мониторинга площади многолетних морских льдов и глубины протаивания многолетнемерзлых грунтов. Однако более дифференцированно прямые и опосредованные воздействия динамики климата на растительный покров отражают климатогенные тренды, циклы и погодичные флуктуации запасов фитомассы и NPP. Анализ позволяет выявить ведущие факторы этой изменчивости: рост продолжительности вегетационного периода, температуры верхних слоев почвы, суммы активных температур, глубины протаивания мерзлоты, интенсивность нагрева поверхности, смена режима увлажнения, дренажа и др. Одновременно можно проследить и реальные тренды продуктивности в разных регионах российской Арктики. Построенные нами в рамках данной работы карты как раз показывают, что, несмотря на всеобщий рост продуктивности арктических экосистем с начала глобального потепления в конце XX в. и его замедление и даже выход на плато, сам процесс имеет региональные особенности и по интенсивности, и по удельным показателям, и по срокам. Вполне разумен вопрос о сопоставимости данных измерения продуктивности арктических экосистем в 1960—1980-х годах, полученных полевыми методами, с таковыми в 2000-х годах по данным дистанционного зондирования.

Технологии оценки продуктивности арктических экосистем дистанционными методами в XXI в. практически полностью вытеснили ее полевые измерения (укосы, промывка монолитов для определения запасов подземных органов, сбор и взвешивание мортмассы и пр.), а также пространственные экстраполяции на локальном и региональном уровнях. В то же время именно в Арктике, где тепло наряду с азотом и фосфором выступает лимитирующим фактором, изменения климата не действуют на растительность напрямую, а только опосредованно — через изменения мощности деятельного слоя, удельные объемы доступных питательных веществ, химизм надмерзлотных вод, микрорельеф, экспозицию склона, зоогенное эвтрофирование и др. А эти функциональные и пространственные особенности продукционного процесса в Арктике не всегда проявляются при использовании дистанционных технологий в обычных для зондирования масштабах (разрешении). Кроме того, принимаемый как эквивалент показателей продуктивности вегетационный индекс NDVI, основанный на способности растений поглощать солнечную радиацию, должен быть приведен к определенному временному интервалу, его точность зависит от сопоставления повторных измерений. Публикаций, использующих такие технологии, практически нет.

Измерение NDVI в высоких широтах сопряжено с обилием ограничений и технических сложностей (учет магнитного угла Солнца, самой геометрии наблюдений, характера атмосферы, дрейфа орбиты спутника, искажений изображения при наблюдении «не в надир» и т. д.), и получается, что результаты таких исследований слабо сопоставимы. По-видимому, самое важное при дистанционных оценках продуктивности тундр и полярных пустынь — естественно низкие запасы фитомассы в Арктике и относительно невысокие параметры ее проективного покрытия приводят к тому, что кривые спектральной яркости часто при мультizonальной съемке и распознавании исследуемой растительности дают кривые спектральных коэффициентов яркости, характерные для лишенных зеленой массы поверхностей.

В целом, как показано нами ранее [5—11], получаемые со спутников спектральные и радиометрические характеристики арктических экосистем свидетельствуют о возрастании к началу XXI в. NDVI в Арктике, отражающего степень «позеленения» территории, что обусловлено увеличением интенсивности фотосинтеза, запасов надземной фитомассы и NPP в условиях роста продолжительности вегетационного периода, улучшения теплового режима почв и большей доступности питательных веществ для растений.

Косвенно продуктивность арктических экосистем можно оценить через измерение запасов и эмиссии углерода [12—16]. Понятно, что увеличение минерализации органических соединений, образования CO₂ и минеральных соединений азота при росте активных температур возможно в тундрах далеко не повсеместно, а преимущественно в экосистемах с высокой долей участия в покрове трав. Это позволяет предположить, что возможный механизм увеличения продуктивности растений при потеплении климата в Арктике связан с интенсификацией активности микроорганизмов в почве и ростом доступности биогенов для растений. Пик роста продуктивности тундр пришелся на конец 1990-х — начало 2000-х годов при росте концентрации CO₂ в атмосфере и проявлялся не столько в увеличении прироста растительного покрова *in situ*, сколько во внутриландшафтном перераспределении и расширении площади более продуктивных сообществ: на северной границе леса и в южных тундрах — лесных и кустарниковых, в типичных тундрах — кустарниковых и травяных, в арктических тундрах — кустарничковых и злаковых.

Для Циркумполярного региона увеличение параметров NDVI, отражающих степень «позеленения» суши, отмечено почти повсеместно [17—19]. В российской Арктике подобные оценки также проведены в целом для зоны [5—7; 10], для островов Колгуев и Вайгач, где рост максимальных значений NDVI составил 15% и 30% соответственно [19]. Здесь оно произошло как за счет увеличения запасов зеленой части фитомассы (трав, листьев кустарников и ку-

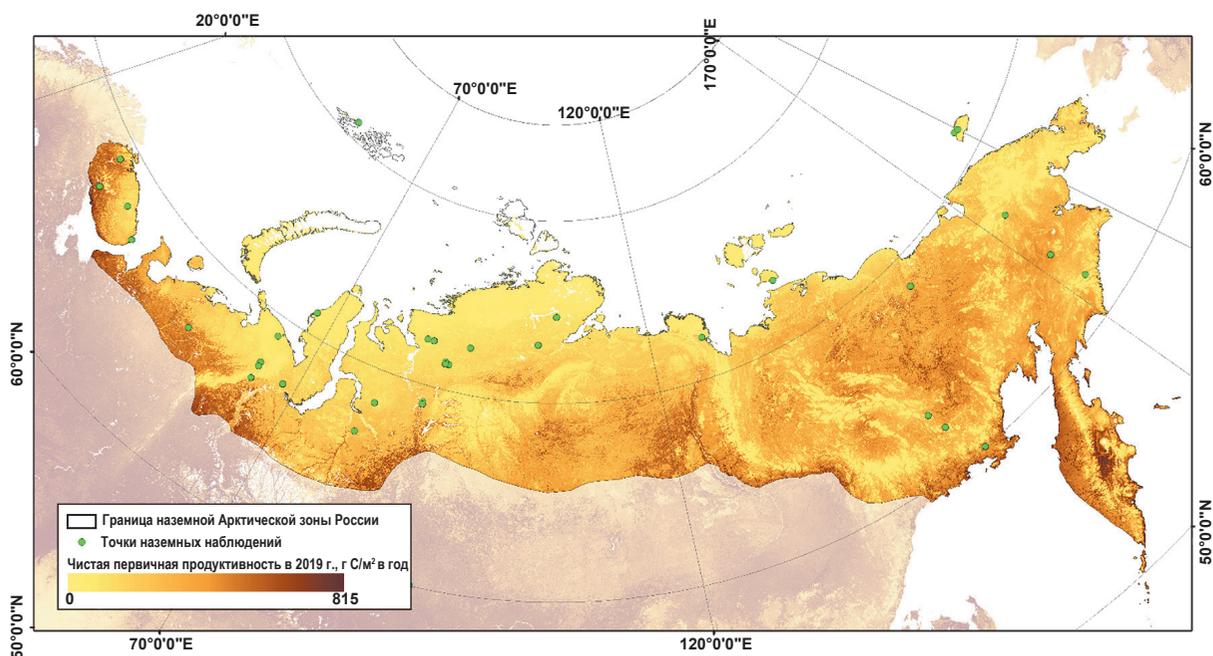


Рис. 1. Чистая первичная продукция (NPP) наземной фитомассы российской Арктики за 2019 г., г C/m² в год. Зеленые точки – основные пункты полевых измерений запасов и продукции фитомассы в период МБП 1964–1974 гг. (<http://biodat.ru/db/prod/>)
 Fig. 1. Net primary production (NPP) of aboveground phytomass in the Russian Arctic for 2019, g C/m² per year. Green dots – the main points of field measurements of phytomass stocks and production during the period of the IBP 1964–1974 (<http://biodat.ru/db/prod/>)

старничков), так и в результате расширения площадей более продуктивных сообществ — злаков, осок, пушиц («олуговение») и ивняков («закустаривание»), хотя на циркумполярной карте изменений MaxNDVI в Арктике для прилегающих к островам материковых территорий Большеземельской тундры отмечены отрицательные тренды MaxNDVI (–4...–6%), а максимальные значения с 1980-х годов показаны для канадской Арктики и севера Аляски [19]. В отношении российской Арктики прирост показателей запасов и продукции фитомассы отмечается для юга восточного Таймыра. Здесь возрастание запасов и продукции фитомассы тесно коррелирует с ростом средних летних температур, увеличением продолжительности вегетационного периода, а также с увеличением глубины деятельного слоя, что в 1970—1980-х годах не наблюдалось [21].

Всегда ли рост продуктивности можно рассматривать только как позитивный фактор динамики арктических экосистем? Принимая во внимание, что аномально высокие температуры, наблюдаемые здесь в последние десятилетия, — это только фрагмент 60-летних циклов «ледовитости океана» и, возможно, проявление циклов атмосферной циркуляции, отметим, что «инерция» наблюдаемых климатогенных сукцессий в Арктике может быть очень высокой. Причины здесь в разнонаправленности процессов функционирования экосистемы и их влиянии на тренды температуры, фиксации углерода, протаивания мерзлоты, снегонакопления, альbedo, продолжительности вегетационного периода и пр. Устано-

вить вектор изменений оказывается крайне трудно. Рост поступления метана при окислении плейстоценовой органики из тающей мерзлоты, как и меняющееся альbedo, накопление снега при закустаривании тундры и прочие климатогенные процессы, усиливает эффект потепления в Арктике. Но, с другой стороны, проявляются процессы с другим знаком вектора. Например, с повышением продуктивности тундр и интенсивности накопления мортмассы в условиях роста средних температур приземного слоя воздуха отмечается подъем уровня мерзлоты из-за усиления теплоизолирующих свойств торфянистого горизонта, а рост интенсивности фотосинтеза однозначно сопровождается усилением транспирации растительного покрова, т. е. «охлаждающего эффекта» для поверхности. Добавим к этому разные сроки старта и разную интенсивность потепления климата в регионах Арктики [11], которое, как и в случае потепления 1920—1940-х годов, происходит по естественным причинам, связанным с циклами осцилляции температуры океанических вод в североатлантическом и северотихоокеанском секторах и с циклами циркуляции атмосферы [22].

Материалы и методы исследований

В основе анализа динамики запасов и прироста фитомассы арктических экосистем России лежат материалы полевых измерений, обобщенные в Базе данных им. Н. И. Базилевич (зарегистрирована в Роспатенте 20 декабря 2017 г., № 2017621515). Для анализа она была оцифрована и интегрирована-

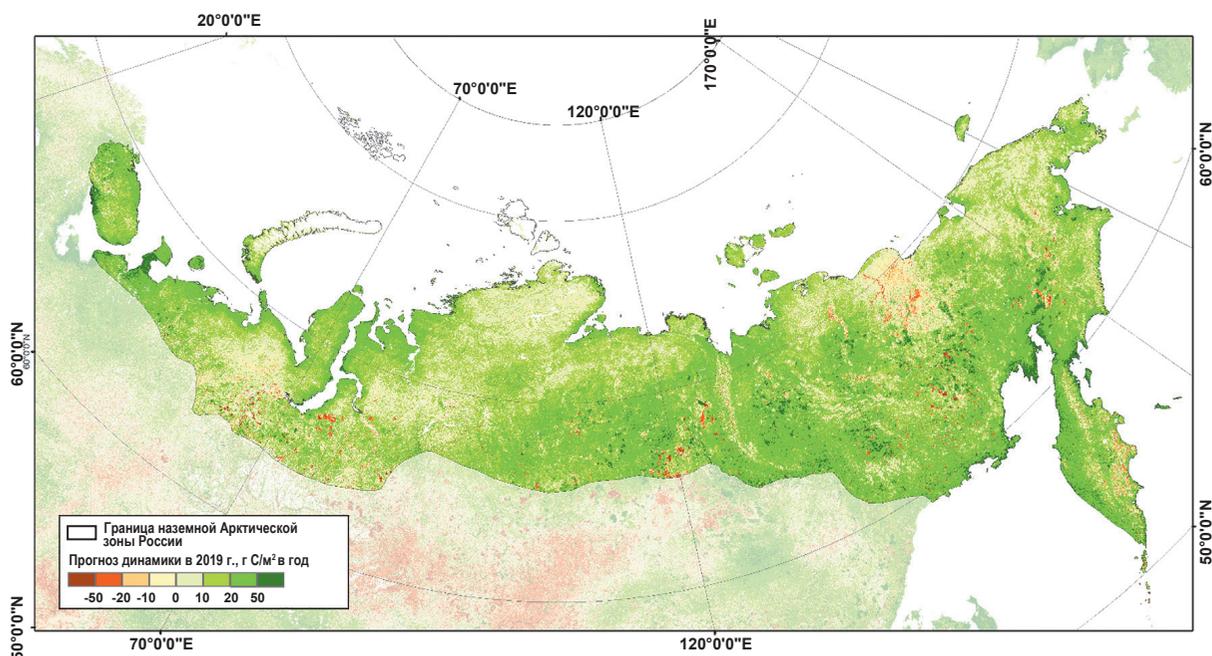


Рис. 2. Прогноз продуктивности наземных экосистем российской Арктики – отклонение линейного тренда на 2025 г. в сравнении с периодом 2000–2019 гг., г С/м² в год. Красный цвет – участки с масштабными антропогенными механическими нарушениями и пожарами

Fig. 2. Production forecast of the Russian Arctic land ecosystems – deviation of the linear trend for 2025 in comparison with the period 2000–2019, g C/m² per year. Red color – areas with large-scale anthropogenic mechanical disturbances and fires

на в ГИС с атрибутивной информацией. Российская Арктика как область исследований здесь понимается не узко (как Арктическая зона Российской Федерации), а расширительно — близко к границам, принятым Всемирным фондом дикой природы и программой «Conservation Arctic Flora and Fauna» Арктического совета [5]. Она включает полярные пустыни, арктические, типичные и южные (кустарниковые) тундры, лесотундру и тундролесья северо-востока Сибири и их аналоги тихоокеанского побережья России.

Продуктивность растительного покрова (запас и продукция фитомассы, выраженные в удельных показателях г/м², т/га, г/м² в год, т/га в год соответственно или в углеродном эквиваленте — г С/м², г С/м² в год) является наиболее интегральной характеристикой изменчивости и динамики экосистем. Но современные данные полевых измерений довольно немногочисленны, так как требуют больших временных и материальных затрат. Имеющиеся материалы по продуктивности в г/м² и тоннах абсолютно сухой массы на гектар мы также пересчитали на г С/м², используя коэффициент 0,45 для оценки содержания углерода в абсолютно сухой массе растительности. Эти материалы синтезированы в виде карт (рис. 1 и 2). Примеры региональных оценок их погодичной динамики в последние два десятилетия для некоторых точек в разных географических условиях представлены на рис. 3, чтобы дать представление о размахе флуктуаций параметров продуктивности, зависящих в том числе и от темпера-

турных аномалий последних десятилетий. Для подавляющего большинства точек с 1980-х годов до начала 2000-х годов отмечен рост продуктивности.

Необходимо отметить, что данные по продуктивности, полученные дистанционным зондированием в XXI в. и наземными измерениями 1960—1980-х годов, плохо сравнимы. Во-первых, укосы берутся с небольшой площади (от 0,25×0,25 до 1,0×1,0 м) и с малой повторностью, а одна точка (растр) для определения NPP при космической съемке имеет размер 25 га (500×500 м). В эту точку попадает множество зональных и интразональных растительных сообществ с разными показателями продуктивности. Поэтому напрямую их нельзя сопоставлять. Во-вторых, сравнительно низкая точность координат измерений XX в. не позволяет корректно проводить экстраполяции.

В нашей работе [1] и в базе данных по продуктивности экосистем Северной Евразии были представлены данные более 130 прямых полевых измерений наземной и подземной фитомассы полярных пустынь, тундр и лесотундры для почти 30 точек (<http://biodat.ru/db/prod/>; см. рис. 1). На основе материалов базы данных была проведена зональная дифференциация продуктивности экосистем российской Арктики и составлена карта [2]. За прошедшие после этой публикации годы в базу добавилось всего несколько новых точек (например, по Северной Фенноскандии [16], по Новосибирским островам [23]).

Причины такого ослабления интереса к полевым измерениям продуктивности экосистем связаны не



только с завершением синтеза результатов МБП, но и с тем, что в последнее время активно развиваются дистанционные методы оценки продуктивности. Известно, что архивы и текущие спутниковые данные для российской Арктики, в том числе AVHRR и LANDSAT, представлены 30-летними и более периодами, что позволяет проводить анализ межгодовой изменчивости и тенденций продуктивности. Использование NDVI в качестве визуализации этих процессов именно в Арктике находит распространение среди российских исследователей благодаря широкому спектру приложения получаемых результатов, возможности уточнять оценки и расчеты [20; 24—26] и моделирования климатогенных изменений продуктивности [27]. Наши западные коллеги воспользовались преимуществами применения NDVI в исследованиях продуктивности экосистем раньше [17; 18; 28; 29]. На основе сопоставления данных во времени авторы установили положительный тренд с 1980-х годов — до 15—30% [18].

В данной статье для анализа динамики продуктивности экосистем российской Арктики помимо материалов полевых измерений запасов и продукции фитомассы, собранных в базу данных, использованы архивы MODIS 2000—2015 гг. с разрешением 300 м [5—8] и продукт MOD17A3 с разрешением 500 м (ежегодные материалы по первичной продукции наземной фитомассы спектрометра MODIS) с доступными данными 2000—2019 гг. С использованием ГИС-модуля Trend.Earth, ориентированного на глобальные базы данных для интерпретации трех основных индикаторов: (1) динамики наземного покрова, (2) динамики продуктивности, (3)

Рис. 3. Современная динамика продуктивности тундр за 2000—2019 гг. (г C/м² в год), рассчитанная по данным дистанционного зондирования в сравнении с данными полевых измерений 1960—1970-х годов. Красная точка на графике: а — кустарниковая тундра на склоне водораздела, Мурманская область; б — мелко-бугорковатая кустарниково-моховая тундра на склоне водораздела, Ненецкий АО; в — пятнистая кустарничково-моховая тундра на водоразделе, Таймырский АО

Fig. 3. Current dynamics of tundra productivity in 2000—2019 (g C/m² per year) calculated from remote sensing data in comparison with field measurements of the 1960s and 1970s. Red dot on the graph: а — shrub tundra on the slope of the watershed, Murmansk region; б — pit-and-mount shrub-moss tundra on the slope of the watershed, Nenets A. D.; в — spotted shrub-moss tundra on the watershed, Taimyr A. D.

динамики запасов почвенного органического углерода, — проведены оценки и картографирование результатов.

Чистая первичная продукция наземной биомассы (net primary production, NPP) здесь представлена в г С/м² в год. С целью оценки динамики продуктивности проанализирован весь ряд данных за каждый год с 2000 по 2019 гг. (для отдельных точек — см. рис. 3). Для каждого раstra NPP методом наименьших квадратов вычислены коэффициенты линейного тренда. Далее на основании этих коэффициентов вычислен прогнозный показатель NPP на 2025 г. Затем для этого же ряда данных вычислено среднее значение NPP. Как последний шаг была рассчитана разница между средним и прогнозным значениями на 2025 г. Эта разница характеризует направление динамики продуктивности. Если ее значение положительно, то для соответствующего ряда данных наблюдается рост в данной точке, если отрицательно, то продуктивность демонстрирует отрицательную динамику. Результаты этой оценки приведены на рис. 2.

Поскольку на уровень продуктивности арктических экосистем помимо фоновых климатических трендов (температурных аномалий и изменений в количестве осадков) оказывают влияние и антропогенные факторы (механическая трансформация растительного покрова, загрязнение, высокие пастбищные нагрузки домашнего оленеводства и пр.), в работе использовались и методы дистанционной оценки антропогенной трансформации растительного покрова.

Оценка деградации арктических и приарктических территорий России в XXI в. проведена нами не по показателям площадных нарушений, фиксируемых отраслевой статистикой, а на основе применения методики интерпретации данных дистанционного зондирования и дискриминантного анализа. Тестовый анализ производился на композитах летних изображений системы MODIS TERRA с разрешением 500 м. Были обработаны пять состояний: 2000, 2004, 2008, 2012, 2015 гг. Все распознанные вероятности классов зональной «продуктивной растительности» были просуммированы без заглублиения анализа на уровне индивидуальных спектральных характеристик отдельных классов, и получена общая «продуктивная» вероятность для каждого пикселя. Каждому пикселю соответствует значение от 0 до 100, отражающее вероятность отнесения данного пикселя к зонально обусловленному. В соответствии с теорией 100 — полное заполнение пикселя зональной продуктивной растительностью, 0 — полное отсутствие таковой. Континуальный ряд чисел классифицирован в пять классов состояния растительности: 0—5, 5—20, 20—40, 40—60, 60—80 (выше 80 значения отсутствуют). Для каждого региона было определено соотношение площадей зональной продуктивной растительности и площадей, занимаемых определенным на данный момент классом изменений, а в итоге — территорий с высокой и средней

деградацией, стабильным и восстанавливаемым покровом. Полученные данные были обобщены с учетом площади антропогенной трансформации растительного покрова [9; 10], а в отношении оценок изменений продуктивности использованы в настоящей статье. Они представляют собой результат сравнительных оценок изменений в продуктивности зональных экосистем арктических и субарктических регионов России.

Результаты и обсуждение

Наши данные подтверждают выявляемые на локальном и региональном уровнях тренды роста продуктивности зональной растительности в условиях потепления климата, являющиеся также реакцией на нарушения целостности растительного покрова в конце XX и начале XXI в. Но ни в масштабах всей Арктики, ни применительно к арктическим регионам Северной Евразии сопоставление потерь запасов и продукции фитомассы в результате антропогенной трансформации и их роста в результате потепления и формирования новых местообитаний ранее не проводилось. Поэтому результаты сравнения современных оценок с данными, полученными для экосистем российской Арктики в процессе МБП, позволяют более объективно выявить климатогенные тренды их продуктивности.

Выявляемый в конце XX — начале XXI в. рост продуктивности наземных арктических экосистем. Еще в начале 2000-х годов [18] был проведен анализ спутниковой съемки с 1982 по 2008 гг. Установлено, что в высоких широтах Северной Америки и Евразии в отдельных районах рост максимальных значений NDVI достигал 15%, что связывалось с глобальным потеплением. Выявленные тенденции в последние годы были подтверждены наземными исследованиями тундровой растительности на модельных площадках в рамках проектов ITEX (International Tundra Experiment) и BTF (Back to the Future), а в последние годы и PEEX (Pan-Eurasian Experiment). В течение последних 30 лет наиболее заметные изменения в Арктике, в том числе рост наземной фитомассы, произошли к началу XXI в. повсеместно. Они были ответом на повышение температуры в конце XX в. Росту запасов фитомассы сопутствовали рост продолжительности вегетационного периода и увеличение протаивания мерзлоты, что было отмечено в конце 1990-х годов [2]. В тот период средние запасы фитомассы в Арктике были ниже современных и сильно колебались в зависимости от климата. Запас и продукция фитомассы для полярных пустынь составляли в среднем 0,5—2,0 т/га и 0,1—0,3 т/га в год, для арктических тундр — 5,0—10,0 т/га и 1,0—3,0 т/га в год, для субарктических тундр — 10,0—40,0 т/га и 2,0—4,0 т/га в год соответственно. Сейчас (см. рис. 1—3) эти показатели достоверно выросли в среднем на 10—15%.

Для выявления трендов биологической продуктивности нами ранее был проведен анализ продукта

Yearly Gross productivity, рассчитанного на основе мозаик MODIS, определена доля трендовой составляющей и убраны краткосрочные колебательные процессы (погодичные флуктуации NDVI), так как многие авторы за последние десятилетия рост первичной продукции определяют как направленный и зависимый от начала и интенсивности потепления. По данным Второго оценочного доклада Росгидромета [31] он составляет от 0,13% до 1,02% в год от начального года наблюдений (1982 г.).

Очевидно, рост запасов фитомассы и NPP — ответная реакция растительности на абиотические изменения в Арктике и не ограничивается изменением индивидуального роста растений и состава арктических сообществ. Например, экспансия трав, кустарников и деревьев в тундру, как показано ранее [9—11], способствует аккумуляции снега, увеличению зимних почвенных температур, повышению микробной активности почвы и соответственно накоплению в ней биогенов, что стимулирует рост в тундре лугов и леса.

Для иллюстрации современной ситуации в российской Арктике построена карта показателей чистой первичной продукции (см. рис. 1) за 2019 г., которая отражает зонально-провинциальные особенности продукционного процесса, повышение его интенсивности в приокеанических районах на западе и на востоке, закономерный рост вдоль южной границы (фактически градиент между тундрой и северной тайгой), слабое проявление зональной дифференциации продуктивности в центральной части российской Арктики (полуострова Ямал и Таймыр, где отмечены самые высокие тренды потепления — до 0,8—0,9 °C за 10 лет), неожиданно высокие показатели NPP в криоаридных редколесьях северо-востока Сибири и аномально высокие для Камчатки.

Современная динамика и прогноз первичной продукции наземных экосистем российской Арктики. Рост продуктивности арктических и субарктических экосистем Северной Евразии, индцированный «позеленением» тундры, был отмечен нами ранее [4—11]. Анализ ее годовых флуктуаций (межгодовой изменчивости) (см. рис. 3) и их последовательное сопоставление с использованием метода наименьших квадратов позволили вычислить коэффициенты линейного тренда и дать краткосрочный прогноз изменений продукции региона (см. рис. 2). По всей территории российской Арктики отмечается рост продуктивности за исключением локальных участков, на которые оказали влияние пожары. Но величина этого роста имеет региональные отличия, определяемые собственно пространственными эффектами влияния изменений климата на растительность (начало и интенсивность потепления и проявления климатических аномалий в целом). Наибольшее увеличение отмечено для приморских территорий Белого, Карского и Охотского морей, а наименьшее — для континентальных участков Центральной и Восточной Сибири.

Сопоставление данных рис. 1 и 2 и материалов других авторов дает неоднозначную картину и век-

тор изменчивости продуктивности [17; 18; 20; 24—28; 31; 32]. Некоторые отечественные [31; 32] и зарубежные [33] специалисты по данным моделирования прогнозируют ее дальнейший рост в Арктике к середине XXI в. за счет смены биомов, в том числе сокращение площади полярных пустынь и арктических тундр, расширение площади лугов и кустарников, расширение на север лесотундры и северной тайги. Наши исследования [10; 11] показали, что температурные тренды и тренды осадков в последние три десятилетия различались в регионах существенно по началу, по вектору и по интенсивности (в два раза и более), что привело к соответствующим региональным различиям в реакции растительности на эти изменения климата. Анализ предыдущих внутривековых циклов потепления в Арктике выявил, что их характерное время (около 60 лет) было меньше характерного времени климатогенных сукцессий зональной растительности (более 100—200 лет), что не позволяло проявляться движениям кустарников и леса на север. В то же время многовековые и тысячелетние циклы оставили в Арктике следы таких перестроек, предвестником которых был аномальный рост продуктивности зональной растительности и повышение ее средообразующих функций.

Интегральная оценка дистанционными методами изменений продуктивности наземных экосистем Арктики в процессе антропогенной трансформации. Получаемые дистанционными методами спектральные и радиометрические характеристики арктических экосистем свидетельствуют о росте к началу XXI в. усредненного значения нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI в российской Арктике, отражающего степень климатогенного «позеленения», и одновременно реакцию растительности на антропогенную трансформацию — механические нарушения, загрязнение, перевыпас, пожары и пр. [10]. Дистанционные оценки, использующие спутниковые материалы сравнительно низкого разрешения (например, с разрешением более 30 м), учитывают влияние антропогенной трансформации и фрагментации растительного покрова арктических экосистем на их продукционные характеристики достаточно условно. Хотя даже на циркумполярной карте изменений MaxNDVI с 1982 по 2012 гг. [18] показано, что наряду с ростом в российской Арктике NDVI на 15—30% выделяются территории (Большеземельская тундра, юг Ямала, западный Таймыр, север Чукотки), где уже наблюдается падение продуктивности на 6—10% [17; 18].

Наряду с крупномасштабными очаговыми нарушениями (техногенные ландшафты вокруг мест добычи и переработки углеводородов — радиус до нескольких километров, горно-металлургических комбинатов — радиус до нескольких десятков километров) в Арктике в последние годы росла площадь диффузных нарушений. Они меняют картину реакции растительности на климатические тренды, выявляемые по NDVI. На это обратили внимание

специалисты IPCC, посчитавшие актуальным наряду с мониторингом изменений климата проводить и мониторинг трансформации земель [34]. Для оценки продуктивности экосистем Арктики это актуально, так как на нарушенных человеком участках усиливается эмиссия парниковых газов [35] и формируются более продуктивные вторичные фитоценозы — мелководные водоемы, минеральные болота, луга с доминированием осок, злаков и разнотравья. В них отсутствуют типичные для тундр низкопродуктивные группы растений — лишайники, мохообразные и кустарнички. В ряду зональных экосистем полярные пустыни и тундры показывают рост продуктивности антропогенно нарушенного покрова [36].

Наиболее катастрофические ситуации изменений в структуре растительности и ее продуктивности, если исходить из динамики площади деградируемых земель, по абсолютным показателям отмечаются на севере Тюменской области, в Республике Коми и Красноярском крае (по 200—300 тыс. км²), но по относительным показателям лидируют Мурманская область (около 37%), Тюменская область (15,5%), Республика Коми (около 15,5%). По дистанционным оценкам NPP в последние десятилетия здесь растет, а запасы фитомассы имеют тенденцию к снижению [9].

Но в целом учет антропогенной трансформации в Арктике при оценке тренда запасов фитомассы и продуктивности показал, что его влияние на их современные показатели незначительно. Хотя в большинстве регионов российской Арктики площади деградирующих экосистем преобладают над восстанавливаемыми своей почвенно-растительный покров территориями. Исключение составляют прогрессирующие ареалы разрушения растительности в Ненецком АО (добыча углеводородов), Ямало-Ненецком АО (добыча газа, деградация пастбищ домашних оленей), Таймырском, Долгано-Ненецком районе Красноярского края (территории вокруг предприятий РАО «Норникель»), а в последние годы и в Чукотском АО (ландшафтные пожары). Эти очаговые трансформации влияют на такие важные показатели биофизических свойств ландшафта, как запас надземной фитомассы (т/га, г/м²) и ее удельная плотность (т/м³, г/дм³) в занимаемом объеме экосистемы. Последний показатель важен именно для Арктики, так как определяет противозероизонную и почвозащитную функции растительности, ее теплоизолирующие свойства в отношении мерзлых грунтов и деятельного слоя почвы, регуляции водного режима (транспирации, испарения, фильтрация надмерзлотных вод) и газовых потоков от почвы в атмосферу.

Закключение и выводы

Выявлено следующее:

- в российской Арктике к началу XXI в. запасы фитомассы зональных экосистем выросли в среднем на 15—30%, а NPP — на 10—15%, но в дальнейшем (в 2000—2019 гг.) демонстрировали погодичные флуктуации без тренда;

- по сравнению с 1960—1970-ми годами в конкретных точках тундровой зоны рост запасов надземной фитомассы мог достигать 50% и более (см. рис. 3), а при экспансии кустарников — удвоиться (см. рис. 3а);
- по удельным показателям NPP (см. рис. 1) лидируют экосистемы европейской Арктики, хотя в XXI в. тренд потепления здесь не самый высокий (0,4—0,5 °C/10 лет); на полуостровах Ямал и Таймыр, где отмечены высокие тренды потепления (до 0,8—0,9 °C/10 лет), современные показатели NPP низки и слабо выражена их зональная дифференциация;
- прогноз NPP наземных экосистем российской Арктики на 2025 г. (отклонение линейного тренда по сравнению с периодом 2000—2019 гг.) показал (см. рис. 2), что ее рост может продолжиться на Кольском полуострове, в Большеземельской тундре, на полуостровах Ямал и Гыдан, а снижение — на Полярном Урале, севере Западной Сибири, Кольской низменности.

В арктических регионах Северной Евразии все прогнозы климатогенных изменений продуктивности экосистем подразумевают последовательное замещение полярно-пустынных и тундровых биомов более термофильными и продуктивными — субарктическими и бореальными по вектору «север-юг». При современных наблюдаемых трендах температуры уже сейчас можно было бы говорить о сдвигах зональных параметров и градиентов температуры на границах зон и подзон (рост на несколько градусов!) и градиентов продуктивности. А это подразумевает, что и комплексы биоты (комбинация тысяч видов растений и животных, объединенных в экосистемы) должны меняться вслед за сменой доминантов и пр. Однако этого не происходит, характерное время таких изменений, как мы уже писали [11], в Арктике иное — сотни и первые тысячи лет, т. е. они продолжительнее естественных климатических циклов. Аналогичные процессы потепления, обусловленного природными причинами с близкими современным величинами температурных аномалий и градиентов и с ярко выраженными трендами в зимний период, наблюдались в Циркумполярном регионе в 1920—1940-х годах и не привели к зональным перестройкам в Арктике. Нелинейный и краткосрочный тренд ответной реакции арктических экосистем на современное глобальное потепление гарантирует относительную стабильность функционирования экосистем и сохранение их зональной биоты и в будущем.

Работа выполнена по гранту РФФИ № 18-05-60057 «“Позеленение” тундры как драйвер современной динамики арктической биоты» и по теме госзадания Института географии РАН № 0148-2019-0007 «Оценка физико-географических, гидрологических и биотических изменений окружающей среды и их последствий для создания основ устойчивого природопользования».

Литература/References

1. *Базилевич Н. И., Гребенщиков О. С., Тишков А. А.* Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. — М.: Наука, 1986. — 297 с. *Bazilevich N. I., Grebenshchikov O. S., Tishkov A. A.* Geograficheskie zakonomernosti struktury i funktsionirovaniya ekosistem. [Geographical regularities of the structure and functioning of ecosystems]. Moscow, Nauka, 1986, 297 p. (In Russian).
2. *Bazilevich N. I., Tishkov A. A.* Live and dead reserves and primary production in polar desert, tundra and forest tundra of the former Soviet Union. *Ecosystems of the world 3. Polar and alpine tundra.* Ed.: F. E. Wielgolaski. Amsterdam; Lausanne; New York; Oxford; Shannon; Singapore; Tokyo, Elsevier publ., 1997, pp. 509—539.
3. Национальный атлас почв Российской Федерации / Под ред. чл.-кор. РАН С. А. Шобы. — М.: Астрель, 2011. — 632 с. *Natsional'nyi atlas pochv Rossiiskoi Federatsii.* [National soil Atlas of the Russian Federation]. Pod red. chl.-kor. RAN S. A. Shoby. Moscow, Astrel, 2011, 632 p. (In Russian)
4. *Bobylev S. N., Bukvareva E. N., Danilkin A. A., Dgebuadze Y. Y., Drozdov A. V., Filenko O. F., Grabovsky V. I., Khoroshev A. V., Kraev G. N., Perelet R. A., Smelyansky I. E., Striganova B. R., Tishkov A. A., Zamolodchikov D. G.* Ecosystem services of Russia: prototype national report. Vol. 1. Terrestrial ecosystems services. Adapted English version. Moscow, 2018, 115 p.
5. *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 (20). — С. 28—38. *Tishkov A. A., Krenke Jr A. N.* "Pozeleneniye" Arktiki v XXI v. kak effekt sinergizma deystviya global'nogo potepleniya i khozyaystvennogo osvoyeniya. ["Greening" of the Arctic in the 21st century as an effect of synergy between global warming and economic development]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2015, no. 4 (20), pp. 28—38. (In Russian).
6. *Тишков А. А., Белоновская Е. А., Вайсфельд М. А. и др.* «Позеленение» ландшафтов Арктики как следствие современных климатогенных и антропогенных трендов растительности // Изв. РГО. — 2016. — Т. 148, № 3. — С. 14—24. *Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Vaisfeld M. A., Glazov P. M., Krenke Jr A. N., Morozova O. V., Pokrovskaya I. V., Tsarevskaya N. G., Tertitsky G. M.* "Pozeleneniye" landshaftov Arktiki kak sledstvie sovremennykh klimatogennykh i antropogennykh trendov rastitel'nosti. ["Greening" of Arctic landscapes as a consequence of modern climatogenic and anthropogenic vegetation trends]. *Izv. RGO*, 2016, vol. 148, no. 3, pp. 14—24. (In Russian).
7. *Белоновская Е. А., Тишков А. А., Вайсфельд М. А. и др.* «Позеленение» Арктики и современные тренды ее биоты // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2016. — № 3. — С. 28—39. *Belonovskaya E. A., Tishkov A. A., Vaisfeld M. A., Glazov P. M., Krenke Jr A. N., Morozova O. V., Pokrovskaya I. V., Tsarevskaya N. G., Tertitsky G. M.* "Pozeleneniye" Arktiki i sovremennyye trendy ee bioty. ["Greening" of the Arctic and modern trends of its biota]. *Izv. RAN. Ser. geogr.*, 2016, no. 3, pp. 28—39. (In Russian).
8. *Тишков А. А., Белоновская Е. А., Вайсфельд М. А. и др.* «Позеленение» тундры как драйвер современной динамики арктической биоты // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 2 (30). — С. 31—44. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-31-44. *Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Vaisfel'd M. A., Glazov P. M., Krenke Jr A. N., Tertitsky G. M.* "Pozeleneniye" tundra kak drayver sovremennoy dinamiki arkticheskoy bioty. ["Greening" of the tundra as a driver of the modern dynamics of the Arctic biota]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2018, no. 2 (30), pp. 31—44. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-31-44. (In Russian).
9. *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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-38-51. *Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Glazov P. M., Krenke Jr A. N., Titova S. V., Tsarevskaya N. G., Shmatova A. G.* Antropogennaya transformatsiya arkticheskikh ekosistem Rossii: podkhody, metody, otsenki. [Anthropogenic transformation of the Russian Arctic ecosystems: approaches, methods, assessments]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2019, no. 4 (36), pp. 38—51. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-38-51. (In Russian).
10. *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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-71-87. *Tishkov A. A., Vaisfeld M. A., Glazov P. M., Morozova O. V., Puzachenko A. Yu., Tertitsky G. M., Titova S. V.* Bioticheski znachimyye trendy klimata i dinamika bioty rossiiskoi Arktiki. [Biotic significant climate trends and biota dynamics of the Russian Arctic]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2019, no. 1 (33), pp. 71—87. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-71-87. (In Russian).
11. *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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-48-61. *Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Glazov P. M., Krenke A. N., Puzachenko A. Yu., Tertitsky G. M., Titova S. V.* Tundra i les Rossiiskoi Arktiki: vektor vzaimodeystviya v usloviyakh sovremennogo potepleniya klimata. [Tundra and forest of the Russian Arctic: the interaction vector in the context of current climate warming]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2020, no. 3 (39), pp. 48—61. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-48-61. (In Russian).
12. *Карелин Д. В., Гильманов Т. Г., Замолодчиков Д. Г.* К оценке запасов углерода в наземных экосистемах тундровой и лесотундровой зон российского севе-

- ра: фитомасса и первичная продукция // Докл. Акад. наук. — 1994. — Т. 335, № 4. — С. 530—532.
- Karelin D. V., Gilmanov T. G., Zamolodchikov D. G. K otsenke zapasov ugleroda v nazemnykh ekosistemakh tundrovoi i lesotundrovoi zon rossiiskogo severa: fitomassa i pervichnaya produktsiya. [On the assessment of carbon reserves in terrestrial ecosystems of tundra and forest-tundra zones of the Russian North: phyto-mass and primary production]. Dokl. Akad. nauk, 1994, vol. 335, no. 4, pp. 530—532. (In Russian).
13. *Замолодчиков Д. Г.* Баланс углерода в тундровых и лесных экосистемах России: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. — М., 2003. — 56 с.
- Zamolodchikov D. G. Balans ugleroda v tundrovykh i lesnykh ekosistemakh Rossii. [Carbon balance in tundra and forest ecosystems of Russia]. Avtoref. dis. ... d-ra biol. nauk. Moscow, 2003, 56 p. (In Russian).
14. *Замолодчиков Д. Г., Карелин Д. В., Иващенко А. И.* Углеродный баланс тундровых ландшафтов центральной Сибири: наблюдения и моделирование на геоинформационной основе // Журн. общей биологии. — 1997. — Т. 58, № 2. — С. 15—33.
- Zamolodchikov D. G., Karelin D. V., Ivashchenko A. I. Uglernodnyi balans tundrovykh landshaftov tsentral'noi Sibiri: nablyudeniya i modelirovanie na geoinformatsionnoi osnove. [Carbon balance of tundra landscapes of Central Siberia: observations and modeling based on geoinformation]. Zhurn. obshchei biologii, 1997, vol. 58, no. 2, pp. 15—33. (In Russian).
15. *Тишков А. А.* Продуктивность и баланс углерода природных экосистем России // Бюл. «Использование и охрана природ. ресурсов в России». — 2005. — № 1. — С. 74—90.
- Tishkov A. A. Produktivnost' i balans ugleroda prirodnykh ekosistem Rossii. [Productivity and carbon balance of nature ecosystems in Russia]. Byul. "Ispol'zovanie i okhrana prirodnykh resursov v Rossii", 2005, no. 1, pp. 74—90. (In Russian).
16. *Маслов М. Н.* Углерод, азот и фосфор в тундровых экосистемах Северной Фенноскандии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — М., 2015. — 24 с.
- Maslov M. N. Uglernod, azot i fosfor v tundrovykh ekosistemakh Severnoi Fennoskandii. [Carbon, nitrogen and phosphorus in tundra ecosystems of Northern Fennoscandia]. Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. Moscow, 2015, 24 p. (In Russian).
17. *Bhatt U. S., Kade A. N., Vonlanthen C. M., Tichy L.* Environment, vegetation and greenness (NDVI) along the North America and Eurasia Arctic transects. Environ. Res. Lett., 2012, no. 7, pp. 1—17.
18. *Bhatt U. S., Walker D. A., Reynolds M. K. et al.* Recent declines in warming and arctic vegetation greening trends over pan-Arctic tundra. Remote Sens. (Special NDVI3g Iss.), 2013, № 5, pp. 4229—4254.
19. *Walker D. A., Epstein H. E., Reynolds M. K. et al.* Environment, vegetation and greenness (NDVI) along the North America and Eurasia arctic transects. Environ. Research Lett., 2012, vol. 7, № 1, pp. 015504.
20. *Лавриненко И. А., Лавриненко О. В.* Влияние климатических изменений на растительный покров островов Баренцева моря // Труды КНЦ РАН. — 2013. — Вып. 6. — С. 5—16.
- Lavrinenko I. A., Lavrinenko O. V. Vliyaniye klimaticheskikh izmenenii na rastitel'nyi pokrov ostrovov Barentseva morya. [Influence of climate changes on the vegetation cover of the Barents sea islands]. Trudy KNTs RAN, 2013, iss. 6, pp. 5—16. (In Russian).
21. *Поспелова Е. Б., Василевская В. Д.* Первичная продуктивность тундр Таймыра // Ботан. журн. — 1985. — Т. 70, № 2. — С. 190—191.
- Pospelova E. B., Vasilevskaya V. D. Pervichnaya produktivnost' tundr Taimyra. [Primary productivity of the tundra of Taimyr]. Botan. zhurn., 1985, vol. 70, no. 2, pp. 190—191. (In Russian).
22. *Малинин В. Н., Вайновский П. А.* О причинах первого потепления Арктики в XX столетии // Ученые зап. РГГМУ. — 2018. — № 53. — С. 34—55.
- Malinin V. N., Vainovsky P. A. O prichinakh pervogo potepleniya Arktiki v XX stoletii. [On the causes of the first Arctic warming in the XX century]. Uchenye zap. RGGMU, 2018, no. 53, pp. 34—55. (In Russian).
23. *Николин Е. Г.* К продуктивности растительных сообществ арктических тундр о-ва Большой Ляховский (Новосибирские острова, Якутия) // Наука и образование. — 2017. — № 1. — С. 113—121.
- Nikolin E. G. K produktivnosti rastitel'nykh soobshchestv arkticheskikh tundr o-va Bol'shoi Lyakhovskii (Novosibirskie ostrova, Yakutiya). [On the productivity of plant communities in the arctic tundra of Bol'shoi Lyakhovsky island (Novosibirsk Islands, Yakutia)]. Nauka i obrazovanie, 2017, no. 1, pp. 113—121. (In Russian).
24. *Гопп Н. Г., Смирнов В. В.* Использование вегетационного индекса для оценки запасов надземной фитомассы тундровых сообществ растений // Интерэкспо Гео-Сибирь. Биол. науки. — 2009. — Т. 4, № 1. — С. 187—191.
- Gopp N. G., Smirnov V. V. Ispol'zovanie vegetatsionnogo indeksa dlya otsenki zapasov nadzemnoi fitomassy tundrovykh soobshchestv rastenii. [Use of the vegetation index (NDVI) for estimation the aboveground biomass of tundra plant communities]. Inter ekspso Geo-Sibir'. Biol. nauki, 2009, vol. 4, no. 1, pp. 187—191 (In Russian).
25. *Елсаков В. В., Телятников М. Ю.* Изменения индекса NDVI на территории Европейского северо-востока России и Западной Сибири в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2013. — № 3. — С. 260—271.
- Elsakov V. V., Telyatnikov M. Yu. Izmeneniya indeksa NDVI na territorii Evropeiskogo severo-vostoka Rossii i Zapadnoi Sibiri v usloviyakh klimaticheskikh fluktuatsii poslednikh desyatiletii. [NDVI in the European North-East Russia and Western Siberia in the climatic fluctuations of the last decades]. Sovrem. problemy distants. zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2013, no. 3, pp. 260—271. (In Russian).
26. *Рязанова Н. Е., Сорокин П. А.* Опыт применения дистанционного зондирования растительности при

исследовании динамики экосистем российской Арктики // Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра: Материалы Международной научной конференции. — СПб.: Свое изд-во, 2017. — С. 7—12.

Ryazanova N. E., Sorokin P. A. Opyt primeneniya distantsionnogo zondirovaniya rastitel'nosti pri issledovanii dinamiki ekosistem rossiiskoi Arktiki. [Experience of using remote sensing of vegetation in the study of ecosystem dynamics in the Russian Arctic]. Nauki o Zemle: vchera, segodnya, zavtra: Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. St. Petersburg, Svoe izd-vo, 2017, pp. 7—12. (In Russian).

27. Анисимов О. С., Жильцова Е. Л., Разживин В. Ю. Моделирование биопродуктивности в арктической зоне России с использованием спутниковых наблюдений // Исследования Земли из космоса. — 2015. — № 3. — С. 60—70.

Anisimov O. S., Zhiltsova E. L., Razzhivin V. Yu. Modelirovanie bioproduktivnosti v arkticheskoi zone Rossii s ispol'zovaniem sputnikovyykh nablyudenii. [Modeling of bioproductivity in the Arctic zone of Russia using satellite observations]. Issledovaniya Zemli iz kosmosa, 2015, no. 3, pp. 60—70. (In Russian).

28. Jia G. J., Epstein Y. E., Walker D. A. Greening of Arctic Alaska. Geophys. Res. Lett., 2003, vol. 30 (20), pp. 1981—2001.

29. Walker D. A., Reynolds M. K., Daniëls F. J. A., Einarsson E., Elverbakk A. et al. The Circumpolar Arctic vegetation map. J. of Vegetation Science, 2005, vol. 16, pp. 267—282.

30. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменении климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М.: Изд-во Росгидромета, 2014. — 1003 с.

Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. [The second assessment report of Roshydromet on climate change and their effects on the territory of the Russian Federation]. Moscow, Izd-vo Roshydrometa, 2014, 1003 p. (In Russian).

31. Жильцова Е. Л., Анисимов О. С. Динамика растительности Северной Евразии: анализ современных наблюдений и прогноз на XXI век // Арктика XXI век. Естеств. науки. — 2015. — № 2 (3). — С. 48—59.

Zhiltsova E. L., Anisimov O. S. Dinamika rastitel'nosti Severnoi Evrazii: analiz sovremennykh nablyudenii i

prognoz na XXI vek. [Vegetation dynamics of Northern Eurasia: analysis of modern observations and forecast for the 21st century]. Arktika XXI vek. Estestv. nauki, 2015, no. 2 (3), pp. 48—59. (In Russian).

32. Иванова К. В. Динамика индекса NDVI для разных классов территориальных единиц растительности типичных тундр // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2019. — Т. 16, № 5. — С. 194—202.

Ivanova K. V. Dinamika indeksa NDVI dlya raznykh klassov territorial'nykh edinit rastitel'nosti tipichnykh tundr. [Dynamics of the NDVI index for different classes of territorial vegetation units of typical tundras]. Sovr. problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2019, vol. 16, no. 5, pp. 194—202. (In Russian).

33. Bala G., Caldeira K., Mirin A. et al. Multicentury Changes to the Global Climate and Carbon Cycle: Results from a Coupled Climate and Carbon Cycle Model. J. of Climate, 2005, vol. 18, iss. 21, pp. 4531—4544.

34. Climate Change and Land. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Summary for Policymakers. Bonn, 2019, 41 p.

35. Карелин Д. В., Зазовская Э. П., Шишков В. А. и др. Наблюдения за потоками CO₂ на архипелаге Шпицберген: использование территории человеком меняет газообмен арктической тундры // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2019. — № 5. — С. 56—66.

Karelin D. V., Zazovskaya E. P., Shishkov V. A. et al. Nablyudeniya za potokami SO₂ na arhipelage Shpitsbergen: ispol'zovanie territorii chelovekom menyaet gazoobmen arkticheskoi tundry. [Observations of CO₂ flows in the Svalbard archipelago: human use of the territory changes the gas exchange of the Arctic tundra]. Izv. RAN. Ser. geogr., 2019, no. 5, pp. 56—66. (In Russian).

36. Тишков А. А., Царевская Н. Г. Продуктивность природных, полуприродных и антропогенно модифицированных экосистем России // Регион. проблемы экологии. — 2005. — № 1. — С. 6—21.

Tishkov A. A., Tsarevskaya N. G. Produktivnost' prirodnykh, poluprirodnykh i antropogenno modifitsirovannykh ekosistem Rossii. [Productivity of natural, semi-natural and anthropogenic modified ecosystems of Russia]. Region. problemy ekologii, 2005, no. 1, pp. 6—21. (In Russian).

Информация об авторах

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

Белоновская Елена Анатольевна, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29), e-mail: belena@igras.ru.

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

Титова Светлана Владимировна, научный сотрудник, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29), e-mail: canoruss@yandex.ru.

Царевская Надежда Григорьевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт географии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29), e-mail: ngtsar@yandex.ru.

Библиографическое описание данной статьи

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. 30—41. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-30-41.

CHANGES IN THE BIOLOGICAL PRODUCTIVITY OF THE RUSSIAN ARCTIC LAND ECOSYSTEMS IN THE 21ST CENTURY

Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Krenke A. N., Titova S. V., Tsarevskaya N. G.
Institute of Geography, Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on September 30, 2020

Annotation

The authors compare current productivity estimates with the data obtained in the 1960s and 1970s for the ecosystems of the Russian Arctic in the course of the International Biological Program. This makes it possible to identify objectively climate-related trends in their productivity in the 21st century. The authors used archives and current satellite data for the Russian Arctic, including AVHRR, LANDSAT, MODIS TERRA, and others, represented by periods of 30 years or more. They have revealed that by the 21st century, the phytomass stocks (reserves) of zonal ecosystems increased on average by 15—30%, and primary production by 10—15%. Compared with field measurements of the 1960—1970s at specific points, this growth reached 50% or more. In terms of productivity growth, the ecosystems of the Arctic European sector are leading, although in the 21st century the warming trend is not the highest here (0.4—0.5 °C/10 years). The production forecast for 2025 (deviation of the linear trend in comparison with 2000—2019) showed its continued growth in the Kola Peninsula, in the Bolshezemel'mkaya tundra, the Yamal and Gydan Peninsulas, and a decrease in the Polar Urals, northern Siberia and Kolyma lowland. The growth of specific indicators of productivity in the 21st century reached a plateau and, similar to the warming case of the 1920—1940s, is unable to lead to zonal restructuring.

Keywords: productivity of land ecosystems, phytomass stock, net primary production (NPP), Russian Arctic, tundra, field and remote measurements, map of primary production.

The research is done in the framework of the RFBR grant No. 18-05-60057 “Greening” the tundra as a driver of the Arctic biota current dynamics”, and according to the topic of the State assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences № 0148-2019-0007 “Assessment of physical, geographical, hydrological and biotic changes in the environment and their implications for laying the foundations of sustainable nature management”.

Information about the authors

Tishkov Arkadiy Aleksandrovich, Doctor of Geography, Corresponding Member of RAS, Professor, Deputy Director, Institute of Geography, RAS (29, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: tishkov@biodat.ru.

Belonovskaya Elena Anatol'evna, PhD of Geography, Leading Researcher, Institute of Geography, RAS (29, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: belena@igras.ru.

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

Titova Svetlana Vladimirovna, Researcher, Institute of Geography, RAS (29, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: canopuss@yandex.ru.

Tsarevskaya Nadezhda Grigor'evna, PhD of Biological Sciences, Leading Researcher, Institute of Geography, RAS (29, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: ngtsar@yandex.ru.

Bibliographic description

Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Krenke A. N., Titova S. V., Tsarevskaya N. G. Changes in the biological productivity of the Russian Arctic land ecosystems in the 21st century. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 1, pp. 30—41. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-30-41. (In Russian).