

УДК 911.5:502.2

ИЗМЕНЕНИЯ НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ В XXI ВЕКЕ

© 2021 г. Член-корреспондент РАН А. А. Тишков^{1,*}, А. Н. Кренке¹, С. В. Титова¹,
Е. А. Белоновская^{1,**}, Н. Г. Царевская¹

Поступило 11.01.2021 г.

После доработки 13.01.2021 г.

Принято к публикации 14.01.2021 г.

По результатам моделирования и анализа мультиспектральной космической съемки (архивы MODIS 2000–2020 гг.) прослежены изменения запасов фитомассы экосистем Северной Евразии. Установлено, что с конца XX века отмечался рост запасов, обусловленный изменениями климата (рост концентрации CO₂, среднегодовых температур и пр.). Использование геоинформационных продуктов на базе MODIS – проективное покрытие растительности (MODIS/006/MOD44B), эвапотранспирация и тепловое поле (MOD16A2) и биологическая продукция (MOD17A3HGF) – позволило провести ретроспективное моделирование тренда надземных запасов углерода (тС/га). Выявлено, что в 2000–2020 гг. сохранился незначительный тренд роста запасов фитомассы лесных экосистем (1.2–6.0%), пойменных и горных лугов и кустарников (8.1–9.8%). В безлесных биомов в последние 17 лет отмечен отрицательный тренд: в тундрах (–6.0%), в луговых и типичных степях (–9.0%), в опустыненных степях (–11.3%). Разнонаправленные изменения запасов углерода в надземной фитомассе биомов, помимо внутренних (сукцессии) и внешних (климат и антропогенная трансформация – рубки, ландшафтные пожары и пр.) факторов, обусловлены и синергизмом их действия.

Ключевые слова: Северная Евразия, Великий Евразийский Природный Массив, надземная фитомасса, углеродный эквивалент, тренды, мультиспектральная съемка, моделирование, биомы, тундра, лес, степь

DOI: 10.31857/S2686739721040162

ВВЕДЕНИЕ

Если запасы и продукция фитомассы – наиболее интегральные показатели функционирования экосистемы, напрямую зависящие от климатического фона, они как биофизические параметры ландшафта должны меняться вслед за изменениями климата с определенным лагом времени. Флуктуации климата в безлесных экосистемах (луга, степи) определенно влияют на оба показателя, а в лесах – только на продукцию, которая в чистом выражении (*net primary production*) достигает максимума на средних стадиях сукцессии, а в зрелом возрасте приближается к 0 [1]. Локальные факторы (рельеф, подстилающие породы, почвы, водный режим и др.) определяют характер преобразования солнечной энергии в фитомассу и в целом условия функционирования. Изменения климата меняют как удельные величины продук-

тивности экосистем (т/га, т/га в год), так и их биофизические свойства (плотность фитомассы – т/м³, проективное покрытие растений, листовую поверхность, эвапотранспирацию и т.д.), определяющие термодинамические и информационные свойства поверхности Земли и отраженные в мультиспектральных космических снимках. Дистанционная информация consistently описывает динамику трансформации солнечной энергии на протяжении многих лет. Это позволяет строить статистические модели продуктивности ландшафтов и косвенно определять свойства его элементов, в т.ч. и запасы фитомассы. При этом у различных типов экосистем наблюдаются различные стратегии преобразования энергии. Они могут меняться в процессе сукцессии, филоценогенетической и географической смены. Мы можем одновременно наблюдать реализацию различных стратегий – одни экосистемы могут максимизировать первичную продукцию, другие увеличивать эвапотранспирацию для поддержания локального гомеостаза и т.д. [2]. В рамках одной статистической модели исследовать взаимосвязь преобразования радиации и запасов фито-

¹ Институт географии, Российская академия наук, Москва, Россия

*E-mail: tishkov@igras.ru

**E-mail: belena@igras.ru

массы не корректно — необходимо построение независимых моделей.

Выявление закономерностей динамики запасов фитомассы в условиях меняющегося климата сталкивается с проблемой генерализации данных в рядах дистанционной информации. Для каждого конкретного периода космической съемки наблюдается дифференциация отклика экосистемы на поступающую энергию. В случае мелкошабной дифференциации Великого Евразийского Природного Массива, сохранившегося на просторах Северной Евразии, проблема неоднородности отражения стоит еще более остро. Необходимы синхронная обработка дистанционной информации по огромной территории и использование соответствующих мозаик или деривативных продуктов. Здесь вариативность наблюдается на уровне отдельных сцен и на уровне межгодовой и межсезонной динамики. Если речь идет о построении модели относительно стационарного показателя, которым является фитомасса, то прямое использование дистанционной информации неприменимо. Необходимо осуществить поиск параметров порядка или интегральных переменных, описывающих исходную информацию.

Все это важно оговорить, чтобы понять относительную сложность цели настоящей статьи — установление средствами дистанционного зондирования Земли пространственного распределения и вектора изменений величин наземной фитомассы территории Великого Евразийского Природного Массива за период 2000–2020 гг. Именно тренд, возникающий в наземной фитомассе, сигнализирует о старте длительных обратимых климатогенных смен или циклов растительности, обусловленных ростом проективного покрытия, расширением спектра жизненных форм в составе фитоценозов (например, появлением кустарников и деревьев в тундрах, степях или на альпийских лугах). В одних случаях происходит внутриландшафтное перераспределение более продуктивных сообществ, а в других — их географические смены [3].

В продукционных трендах наземных экосистем по данным мультиспектральной съемки относительно низкого разрешения (300×300 м, 500×500 м и мельче) может прослеживаться влияние антропогенной трансформации ландшафтов (лесные и травяные пожары, рубки, очаги фитофагов и пр.). Запас наземной фитомассы антропогенно трансформированных зональных экосистем закономерно ниже, чем природных [4], что сказывается на результатах синтеза дистанционной информации. Восстановление этого показателя до зонально обусловленного уровня растягивается на десятки и сотни лет и выходит на “плато” на близких к климаксу состояниях. В горах в условиях транзитного режима и контрастности условий

функционирования помимо антропогенной трансформации на результат синтеза данных дистанционного зондирования низкого разрешения влияет и генерализация ландшафтной мозаики и условий увлажнения [5, 6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных данных о динамике фитомассы использован набор “Global Aboveground and Belowground Biomass Carbon Density” [7]. Он представляет собой пространственную интеграцию данных в углеродном эквиваленте (тС/га). Для моделирования привлечены два временных ряда: 2000–2003 и 2017–2020 гг. В каждом скомпилерованы 8-дневные композиты MOD09A1, объединенные в общие мозаики по сезонам (весна, лето, осень) с разрешением 300×300 м, а также продукты MODIS — эвапотранспирация и тепловое поле (MOD16A2), проективное покрытие растительности (MODIS/006/MOD44B) и биологическая продукция (MOD17A3HGF).

Задача выделения стационарных компонент в наборах исходных данных мультиспектральной космической съемки решается поэтапным применением процедур сокращения размерности — иерархическим факторным анализом. При решении данной задачи производится поэтапное обобщение факторного пространства — (1) сначала строятся факторы, описывающие каждую конкретную сцену временного ряда дистанционной информации, (2) полученные факторы для индивидуальных сцен еще раз обобщаются в рамках одного года, (3) они интегрируются для всего периода временного ряда. Данная процедура позволяет осуществлять прямые сравнения различных видов спутниковых данных. Каждый временной ряд данных был подвергнут процедуре иерархического факторного анализа, с помощью которого были выделены инвариантные компоненты.

Число общих интегральных компонент составило 5 для обоих периодов, что в целом согласуется с результатами предыдущих исследований, например для тундр [9, 10]. Интегральные компоненты описывают 93.6% общего варьирования для периода 2000–2003 гг., и 94.8% для периода 2017–2020 гг. Семантика интегральных компонент в основном описывает дифференциацию поглощения спектра солнечной радиации по сезонам. Первая компонента для обоих сроков описывает способность к поглощению энергии и эвапотранспирацию. Вторая — поведение системы весной, а третья — осенью. Первые три компоненты для каждого периода описывают 88 и 89% соответственно.

Для каждого ряда были использованы данные классификации ландшафтов на основе MCD12Q1 и регионализация “Terrestrial ecoregions of the world:

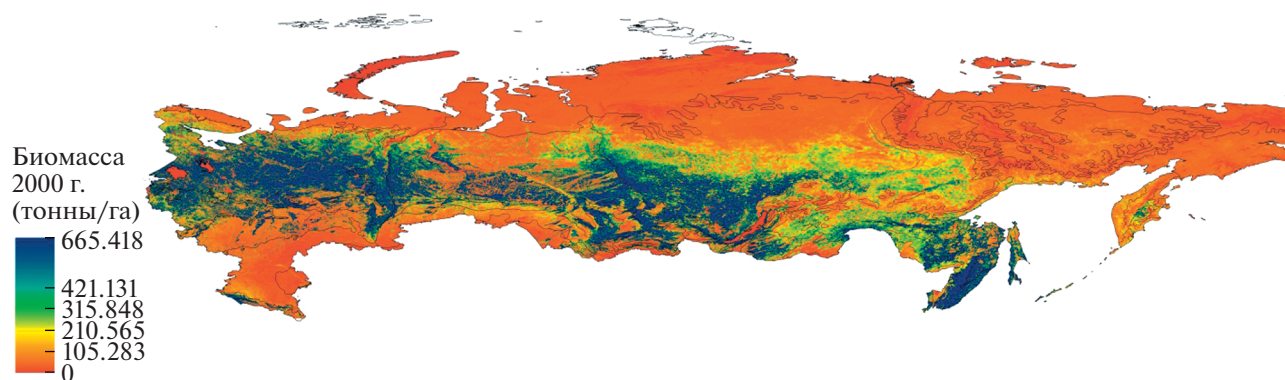


Рис. 1. Запасы надземной фитомассы экосистем Северной Евразии в 2000–2003 гг.

a new map of life on Earth” [11]. Классификация позволяет осуществить моделирование запасов надземной фитомассы в контексте различных типов трансформации энергии для биомов. Наша задача состояла в определении естественных трендов фитомассы для 8 типов биомов: 1 – широколиственные и смешанные леса умеренного пояса, 2 – хвойные леса умеренного пояса, 3 – бореальные темнохвойные леса, 4 – степи и луга умеренного пояса, 5 – пойменные луга, 6 – горные луга и кустарники, 7 – тундра, 8 – опустыненные степи и пустыни. Расширительно они совпадают с выявляемыми Институтом космических исследований РАН по космоснимкам элементами растительности Северной Евразии [12].

При подготовке к моделированию данные о запасах фитомассы были разбиты на категории для каждого биома исходя из принципа равных перцентилей. Наибольшая дробность соответствует наиболее часто встречающимся значениям. Для удобства синтеза выделено 10 классов запасов фитомассы, что необходимо для применения метода дискриминантного анализа как инструмента статистического моделирования. Значительная гетерогенность территории и ранговое распределение частот встречаемости различных классов фитомассы не позволяют строить регрессионные модели, так как они будут нечувствительны к экстремальным значениям и могут дать смещение результатов при формально высокой степени достоверности. Таким образом, необходимо применение метода машинного обучения для распознавания образов (в пространстве инвариантных факторов). При этом сохраняются интерпретируемость результатов и относительная простота процедуры обучения на большом массиве данных. Дискриминантные модели были построены для 2 периодов для каждого типа биомов. Для обратного перехода от классификации запасов к континуальным значениям использовалась сумма вероятности принадлежности к каждому типу, умноженная на медианное значение фитомассы.

Для верификации и сравнения привлекались материалы Базы данных им. Н.И. Базилиевича Института географии РАН, № 2017621515, которая оцифрована и интегрирована в ГИС с атрибутивной информацией (в удельных показателях – г/м^2 , т/га или в углеродном эквиваленте с коэффициентом 0.45 – гС/м^2).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Тренды запасов надземной фитомассы экосистем Северной Евразии. На рис. 1 и 2 представлены результаты моделирования запасов надземной фитомассы (тС/га) Северной Евразии для 2 временных рядов – 2000–2003 гг. и 2017–2020 гг. Для каждого использовались продукты MODIS – проективное покрытие (MODIS/006/MOD44B), эвапотранспирация и тепловое поле (MOD16A2) и биологическая продукция (MOD17A3HGF). Сопоставление данных, представленных на картах в углеродном эквиваленте, позволило выявить масштабы и вектор их изменений в XXI веке (рис. 3; табл. 1).

Масштабы и векторы изменений запасов надземной фитомассы экосистем Северной Евразии в XXI веке. В табл. 1 приведены данные общих изменений для рассматриваемых биомов Северной Евразии ($+\text{тС/га}$). Из балансовых оценок видно, что в каждом биоме наблюдаются как положительные, так и отрицательные изменения.

Суммарно отрицательный тренд наблюдается только в 3 биомов: тундры, степи и пустыни. Анализ пространственной картины выделяет сильную кластеризацию именно отрицательных трендов и более размытую положительных трендов запасов. Кластеризация отрицательных изменений наблюдается в лесах, что, очевидно, является отражением очаговых трансформаций экосистем (пожары, рубки, очаги вредителей и болезней леса, усыхание лесов при изменении дренажа). Более умеренные изменения отражают сукцессии и естественное развитие экосистем.

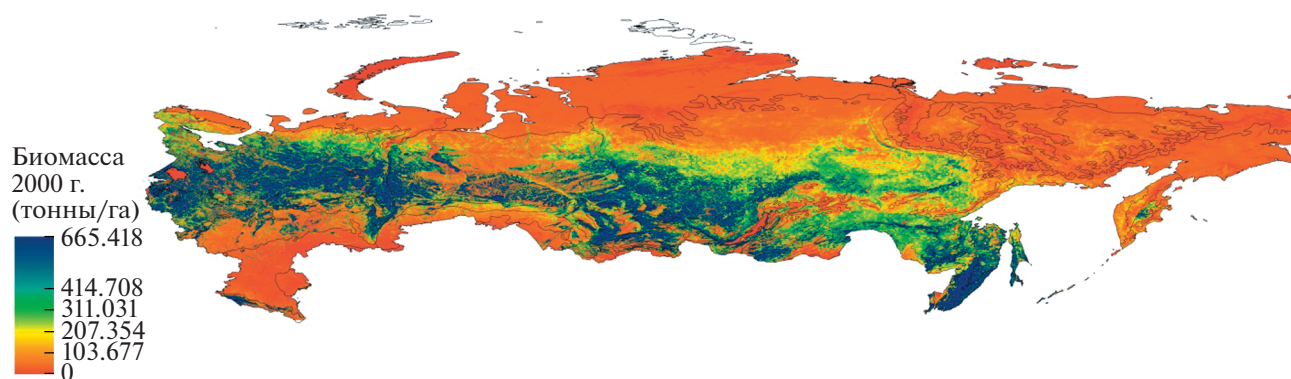


Рис. 2. Запасы надземной фитомассы экосистем Северной Евразии в 2017–2020 гг.

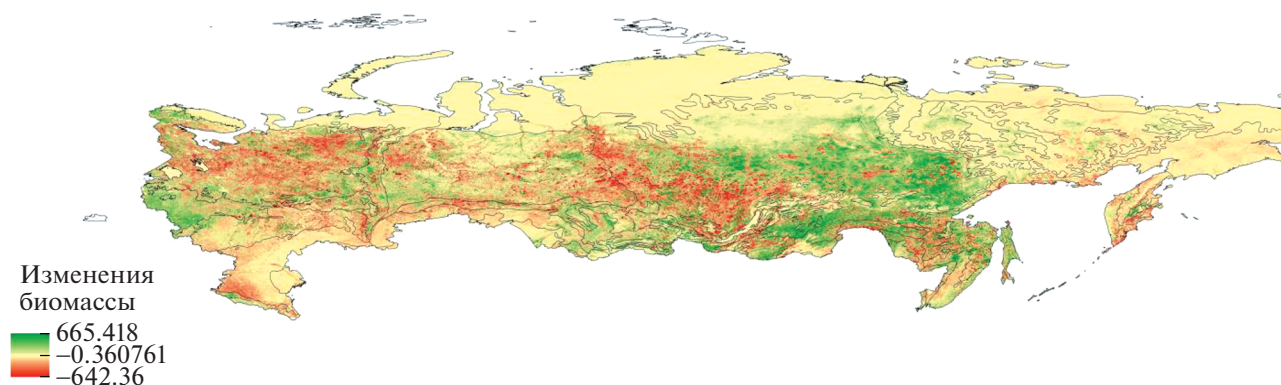


Рис. 3. Изменения запасов надземной фитомассы (биомассы) экосистем Северной Евразии в XXI веке по данным дистанционного анализа продуктов MODIS и моделирования.

Рост запасов фитомассы в XXI веке наблюдается в лесных биоммах Центральной и Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, что связано, по-видимому, с процессами лесовосстановления после массовых рубок и пожаров. Это подтверждается кластеризованностью участков при фоновом положительном тренде.

В биоммах *лесостепи, степи и опустыненных земель* значительное влияние на баланс удельных и площадных параметров фитомассы оказывают, помимо климатических трендов (засухи, межсезонные изменения осадков и пр.), ведение сельского хозяйства (распашка, выпас скота и пр.) и другие экономико-географические факторы. Однако можно отметить фоновый отрицательный тренд запасов. Так же наблюдается расширение площадей послелесных лугов по южной границе лесных биомов, например на Дальнем Востоке, где из-за частых пожаров формируется «саванноидный» тип ландшафта.

В границах *тундрового биом* в XXI веке отмечено снижение запасов надземной фитомассы в южной полосе, тогда как в типичной и арктической тундре, наоборот, наблюдается слабый положительный тренд (в том числе за счет эффекта

«позеленения» — олуговения и закустаривания), при этом прослеживается зональность этих изменений, по всей видимости, связанная с климатическими факторами. Общий тренд изменений в тундре нарушается также ростом запасов фитомассы вдоль долин рек, который распространяется в северном направлении — это отражение продвижения лесов на север по наиболее защищенным участкам ландшафта [10].

ГЕОГРАФИЯ ТРЕНДОВ ЗАПАСОВ НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ В XX И XXI ВЕКАХ

Глобальные изменения климата (потепление) в Северной Евразии в последние десятилетия XX и XXI века географически были не однородны [13, 14], что отражено на рис. 1–3, детерминировано не только биомной дифференциацией. Эффект «позеленения» «vegetation greening» (см. специальный доклад IPCC «Climate and Land» [14]), больше проявился в Европе, Северной Америке, Бразилии и Австралии. О Северной Евразии не сказано в резюме ни слова, хотя именно здесь сформировались *области роста запасов фитомассы* — в Арктике, на западе Русской равнины

Таблица 1. Изменения запасов надземной фитомассы экосистем Великого Евразийского Природного Массива в период с 2000 по 2020 г. по данным дистанционного анализа, тС/га

Биом	Положительные тренды		Отрицательные тренды		Баланс изменений	
	Средние запасы надземной фитомассы, т/га	Суммарные запасы надземной фитомассы, тт	Средние запасы надземной фитомассы, т/га	Суммарные запасы надземной фитомассы, тт	Суммарных запасов, тт	Относительно общих запасов фитомассы, %
1	63.8	80773300.0	–44.6	–69749018.7	11024281.3	1.4
2	77.3	31630663.8	–46.2	–14936389.3	16694274.5	6.0
3	57.0	529693722.3	–47.6	–475227863.7	54465858.6	1.2
4	38.2	26664162.2	–28.3	–48609617.7	–21945455.5	–9.6
5	67.0	4652751.7	–38.9	–2506679.9	2146071.8	8.1
6	61.8	4117044.7	–20.2	–1458493.0	2658551.7	9.8
7	9.2	27712651.4	–7.3	–48286324.3	–20573672.9	–6.0
8	19.3	938543.5	–13.4	–1469811.0	–531267.4	–11.3

Примечание. Биомы: 1 – широколиственные и смешанные леса умеренного пояса, 2 – хвойные леса умеренного пояса, 3 – бореальные темнохвойные леса, 4 – степи умеренного пояса, 5 – пойменные луга, 6 – горные луга и кустарники, 7 – тундра, 8 – опустыненные степи и пустыни.

ны, в Западной и на юге Восточной Сибири, а также области снижения запасов надземной фитомассы – в полосе типичных и сухих степей, на Урале, юге Дальнего Востока. Выявляемые биогеографические рубежи в Евразии имеют разный климатический, биогеографический, мерзлотный и почвенный фон, а продукционные тренды связаны с ослаблением/усилением действия лимитирующих факторов – мерзлоты (Северо-Восток Сибири), засух (Прикаспий и др.), частоты пожаров и роста площади послелесных лугов (Дальний Восток).

Несомненно, к разряду ключевых факторов современных трендов надземной фитомассы могут быть отнесены циклы атмосферной циркуляции, сдвиги индекса сухости, континентальность и океаничность [13]. Но желание вслед зональному климатическому градиенту проследить и последствия изменений в продукционном градиенте экосистем оказалось необоснованным. Так, в тундрах к началу XXI века запасы выросли в среднем на 15–30% [9, 15], но в дальнейшем (2000–2019) демонстрировали лишь погодичные флуктуации. На п-вах Ямал и Таймыр, где отмечены высокие тренды потепления (0.8–0.9 °C/10 лет), надземная фитомасса в XXI веке не растет [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведенный анализ показал различные для отдельных типов экосистем, биомов и регионов Великого Евразийского Природного Массива формы и направления динамики запасов надземной фитомассы. При сохранении общего тренда ее увеличения в период 2000–2020 гг. – для лесных биомов от 2 до 9%, процесс, по-видимому,

носит осцилляционный характер, и для более детального анализа необходимо провести факторную дифференциацию различных типов динамики. Выделены биомы, в которых в XXI веке наблюдается отрицательный тренд запасов фитомассы (до начала 2000-х годов был положительным): степи и луга умеренного пояса (–9.6%), тундра (–6.0%), опустыненные степи и пустыни (–11.3%). Эта группа безлесных биомов имеет более короткое характерное время реакции на климатические тренды, чем леса.

Можно отметить статистически значимое положительное сальдо роста запасов надземной фитомассы экосистем Великого Евразийского Природного Массива в XXI веке. Но проведенный анализ определил круг нерешенных задач и направление дальнейших исследований. Для определения природной (климатогенной) динамики запасов фитомассы необходимо исключить антропогенную составляющую – в первую очередь аграрную. Эта задача относительно просто решается технологически с использованием “маски” сельскохозяйственных земель, но сохраняет проблему оценки процессов на заброшенных полях. Также значительные искажения в анализ вносят рубки, пожары и лесовосстановление. Если динамику пожаров считать естественной компонентой баланса растительной массы, то рубки на территории Великого Евразийского Природного Массива по продукционным эффектам неотличимы от природных пожаров.

В период 2000–2020 гг. в экосистемах Северной Евразии происходили значительные изменения фитомассы, обусловленные эндогенными факторами или фоновыми изменениями среды. По результатам анализа мы находим отражение

как этих трендов, так и изменений, вызванных шокowymi внешними воздействиями. Поэтому направление дальнейшей работы заключается в разделении этих двух типов динамики, что позволит оценить дифференцированно вклад филоценогенетических, сукцессионных и дигрессивно-демутационных изменений в продукционные процессы и выделить климатогенную составляющую. Также необходимо совместить полученные оценки с сопоставимой по масштабу геоботанической и ландшафтной картой и продолжить сопоставление удельных параметров фитомассы, накопленных в Базе данных им. Н.И. Базилевич (более 2700 полевых определений 1960–1980-х годов; [1]).

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования поддержаны грантом РФФИ-РГО № 17-05-4120 и темой госзадания Института географии РАН № 0148-2019-0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базилевич Н.И., Гребенников О.С., Тишков А.А. Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М.: Наука, 1986. 297 с.
2. Sandlersky R., Krenke A. // *Entropy*. 2020. V. 22. P. 11–32.
3. Исаков Ю.А., Казанская Н.С., Тишков А.А. Зональные закономерности динамики экосистем. М.: Наука, 1986. 148 с.
4. Тишков А.А., Царевская Н.Г. // *Регион. проблемы экологии*. 2005. № 1. С. 6–21.
5. Грачева Р.Г., Белоновская Е.А., Шоркунов И.Г. // *Геоморфология*. 2014. № 5. С. 78–93.
6. Виноградова В.В., Титкова Т.Б., Белоновская Е.А., Грачева Р.Г. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 6. С. 35–47.
7. Spawn S.A., Sullivan C.C., Lark T.J., et al. // *Sci. Data*. 2020. № 7. P. 112.
8. Тишков А.А., Кренке-мл. А.Н. // *Арктика: экология и экономика*. 2015. № 4. С. 28–38.
9. Тишков А.А., Вайсфельд М.А., Глазов П.М., Морозова О.В., Пузаченко А.Ю., Тертицкий Г.М., Титова С.В. // *Арктика: экология и экономика*. 2019. № 1. С. 71–87.
10. Olson D.M., Dinerstein E., Wikramanayake E.D., Burgess N.D., Powell G.V.N., Underwood E.C., D'Amico J.A., Itoua I., Strand H.E., Morrison J.C., Loucks C.J., Allnutt T.F., Ricketts T.H., Kura Y., Lamoreux J.F., Wettenberg W.W., Hedao P., Kassem K. // *Bioscience*. 2001. V. 51(11). P. 933–938.
11. Тишков А.А., Белоновская Е.А., Глазов П.М., Кренке А.Н., Пузаченко А.Ю., Тертицкий Г.М., Титова С.В. // *Арктика: экология и экономика*. 2020. № 3. С. 48–61.
12. Бартаев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
13. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Изд-во Росгидромета, 2014. 1003 с.
14. 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 / P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, et al. (eds.). IPCC, 2020. 41 p.

CHANGES IN ABOVEGROUND PHYTOMASS IN NORTHERN EURASIA ECOSYSTEMS IN THE 21st CENTURY

Corresponding Member of the RAS A. A. Tishkov^{a,*}, A. N. Krenke^a, S. V. Titova^a,
E. A. Belonovskaya^{a,**}, and N. G. Tsarevskaya^a

^a Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

*E-mail: tishkov@igras.ru

**E-mail: belena@igras.ru

Based on the results of modeling and analysis of multispectral satellite imagery (MODIS archives 2000–2020), changes in the phytomass of the ecosystems of Northern Eurasia were traced. It is established that since the end of the 20th century, there has been an increase in reserves due to climate changes (an increase in the concentration of CO₂, average annual temperatures, etc.). The use of GIS-information products based on MODIS-projective vegetation cover (MODIS/006/MOD44B), evapotranspiration and thermal field (MOD16A2) and biological production (MOD17A3HGF) allowed us to conduct retrospective modeling of the trend of aboveground carbon stocks (tC/ha). It was revealed that in 2000–2020, a slight trend in the growth of phytomass of forest ecosystems (1.2–6.0%), floodplain and mountain meadows and shrubs (8.1–9.8%) remained. In the last 17 years, a negative trend has been observed in treeless biomes: –6.0% in tundra, –9.0% in meadow and typical steppes, and –11.3% in deserts. Multidirectional changes in carbon stocks of biomes, in addition to internal (succession) and external (climate and anthropogenic transformation – fires, etc.) factors are also due to the synergy of their action.

Keywords: Northern Eurasia, Great Eurasian Natural Massif, aboveground phytomass, carbon equivalent, trends, multispectral survey, modeling, biomes, tundra, forests, steppe