

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

КЛИМАТООБУСЛОВЛЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ БИОПРОДУКТИВНОСТИ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ БЕЛАРУСИ

© 2019 г. С. А. Лысенко

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь
E-mail: lysenkorfe@gmail.com

Поступила в редакцию 23.07.2019 г.

Исследованы пространственно-временные особенности изменений нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) территории Беларуси в текущем столетии и установлена их связь с изменениями климата. Примерно на 84% площади Беларуси наблюдается рост NDVI, а на 35% площади, преимущественно приходящейся на лесные массивы и неосвоенные территории, этот рост является статистически значимым при 5%-м уровне ошибки по критерию Стьюдента. Вегетационный индекс территорий сельскохозяйственного назначения преимущественно понижается. Главным фактором межгодовой изменчивости биопродуктивности земель сельскохозяйственного назначения является количество осадков в вегетационный период, определяющее свыше 60% дисперсии их NDVI. Долгопериодные изменения NDVI объясняются сочетанием усиливающего фотосинтез действия углекислого газа и угнетающего растительность потепления воздуха при практически неизменном количестве осадков. При сохранении наблюдаемых климатических тенденций биопродуктивность сельскохозяйственных земель во многих регионах Беларуси к середине текущего столетия может снизиться более чем на 20% по сравнению с 2000-м годом. Влияние изменений климата на биопродуктивность неосвоенных земель Беларуси незначительно на фоне ее роста в условиях повышающегося содержания углекислого газа в атмосфере.

Ключевые слова: биопродуктивность, изменения климата, межгодовая изменчивость, долгопериодные изменения

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019677-88>

ВВЕДЕНИЕ

Исследования глобальных изменений наземных экосистем за период спутниковых наблюдений однозначно указывают на то, что антропогенная деятельность ведет к увеличению общей наземной биомассы (Chen et al., 2019; Liu et al., 2015; Xu et al., 2013; Zhu et al., 2016). Это происходит как за счет эмиссии углекислого газа (CO₂) в атмосферу, так и за счет антропогенного «озеленения» планеты (восстановления лесов, насаждения деревьев и расширения посевных площадей в ранее засушливых районах). Анализ спутниковых измерений листового индекса земной поверхности показывает, что с 2000 по 2017 гг. среднее листовое покрытие суши увеличилось примерно на 5%, что эквивалентно 5.4×10^6 км² и сопоставимо с общей площадью всех тропических лесов Амазонской низменности (Chen et al., 2019).

В зависимости от почвенно-климатических особенностей региона и типа наземной экосистемы изменения климата способны как усиливать, так и подавлять рост биологической продуктивности, вызванный увеличением содержания CO₂ в атмосфере (Алексеев и др., 2014; Павлова, Сиротенко, 2012; Сиротенко и др., 2011; Duveiller et

al., 2018; Green et al., 2017; Bjorkman et al., 2018; Buermann et al., 2018; Forzieri G. et al., 2017; Liu et al., 2018; Swann et al., 2016; Xu et al., 2013; Zeng Z. et al., 2017; Zhu et al., 2016). Однако в количественных оценках влияния климата на биопродуктивность наземных экосистем существует большая неопределенность, причем не только по величине, но и по знаку. В большинстве публикаций по данной проблематике рассматриваются глобальные аспекты взаимодействия климата и наземных экосистем. Метеорологические поля в этих исследованиях, как правило, представлены данными реанализов (расчетами моделей общей циркуляции атмосферы и океана на основе доступной спутниковой и наземной измерительной информации), отражающими лишь общие пространственные особенности изменений климата. Однако при переходе от глобального к региональному уровню исследований атмосферно-биосферных связей начинает проявляться высокая пространственная неоднородность биофизических свойств подстилающей поверхности. Для учета этой неоднородности необходимы гораздо более детальные пространственные распределения метеорологических полей на исследуемой территории, чем те, которые способен дать реанализ.

Ниже представлены результаты исследований пространственных особенностей современных изменений биопродуктивности наземных экосистем Беларуси, а также количественные оценки климатообусловленной составляющей этих изменений. Для получения детальной картины пространственных особенностей межгодовой изменчивости и долгопериодных изменений климата Беларуси используется сеточный архив метеорологических данных, разработанный в Институте природопользования НАН Беларуси на основе интерполяции данных метеорологических наблюдений на территории Беларуси и соседних государств.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Основным параметром растительных сообществ, характеризующим их биопродуктивность, является чистая первичная продукция (NPP, Net Primary Production) — масса зеленого органического вещества, образующегося за единицу времени на единице площади земной поверхности. К сожалению, этот параметр невозможно восстановить напрямую из характеристик отраженного солнечного или собственного теплового излучения Земли. Его можно только рассчитать на основании моделей продукционного процесса растений с привлечением большого количества вспомогательных данных: о типе подстилающей поверхности, нисходящей солнечной радиации, обеспеченности растений теплом и влагой, эффективности использования света растениями в ходе фотосинтеза и др. (Running, 2004; Xiao et al., 2014). Одновременное получение всех этих данных с пространственной детальностью, присущей спутниковым методам исследования Земли, крайне проблематично, а накопленная статистическая информация далеко не всегда отражает метеорологические и биопродуктивные условия в исследуемом регионе на момент спутниковых измерений. Кроме того, учитывая большие сложности проведения наземных измерений NPP и ничтожно малое покрытие ими земной поверхности, модели NPP, калибруемые на основе этих измерений, могут быть построены только под самые общие типы экосистем. Такие модели вполне пригодны для исследований глобального атмосферно-биосферного цикла углерода, однако могут давать существенные ошибки при изучении его региональных особенностей.

Большие перспективы в дистанционном мониторинге биопродуктивных характеристик экосистем, таких как фитомасса и чистая

первичная продукция, открывают быстроразвивающиеся технологии гиперспектральной аэрокосмической съемки. Обладая изображениями подстилающей поверхности в сотнях спектральных каналов, можно достаточно детально характеризовать состояние почвенно-растительного покрова (Козодеров и др., 2012; Козодеров, Дмитриев, 2017). Анализ спектральных и контурных признаков природных объектов на гиперспектральных изображениях позволяет распознавать различные древесные породы и межкрановую растительность (Kozoderov, Dmitriev, 2016), а методы решения краевых обратных задач атмосферной оптики — определять проекционные характеристики растительного полога, относящиеся к направлению визирования (Kozoderov, Dmitriev, 2011). Зная базовые проекционные характеристики полога — сомкнутость полога и плотность кроны, — его биопродуктивные характеристики можно рассчитать по эмпирическим зависимостям, получаемым на основе одновременных наземных и аэрокосмических обследований тестовых территорий (Козодеров, Дмитриев, 2017). Таким образом, на основании серии многолетних гиперспектральных спутниковых наблюдений почвенно-растительного покрова Земли в перспективе можно будет решать задачи оценки абсолютных изменений наземной биомассы и устанавливать их связи с климатом. Однако в настоящее время проведение такого рода измерений затрудняется технической сложностью получения гиперспектральных изображений Земли в высоком пространственном разрешении со спутниковых платформ и малым пространственным охватом земной поверхности гиперспектральной аэросъемкой.

В связи с отмеченными выше трудностями измерений и расчетов биопродуктивных характеристик наземных экосистем на больших территориях в настоящей работе используются их косвенные оценки на основе разностного нормализованного вегетационного индекса NDVI. Данный индекс достаточно легко определяется по спутниковым измерениям яркости подстилающей поверхности в красном и ближнем инфракрасном диапазонах спектра, имеет длительные ряды наблюдений и не требует использования априорных предположений о подстилающей поверхности. В то же время, значения NDVI тесно связаны со многими биофизическими параметрами наземной растительности, в частности с параметром эффективности поглощения света растениями, лежащим в основе моделей чистой первичной продукции (Myneni, Williams, 1994; Ganguly et al., 2014). Разумеется, для пересчета NDVI в значение

соответствующей ему наземной биомассы необходимы параллельные спутниковые и наземные калибровочные измерения, однако для оценок относительных изменений биомассы конкретного типа растительности в пределах одной и той же территории такая калибровка, в принципе, не обязательна.

Анализ межгодовой изменчивости и долгопериодных изменений наземной биомассы на территории Беларуси проводился на основе рядов NDVI, полученных спутниковым прибором MODIS за 2000–2018 гг. Исходные данные представлены в виде 16-дневных композиционных карт NDVI (информационный продукт MOD13A1) с пространственным разрешением около 500 м. Учитывая большое количество дней с облачностью в весенне-осенний период года, препятствующей измерениям отражательных характеристик подстилающей поверхности из космоса, использовались карты NDVI только для летних месяцев. Усредненные карты NDVI за каждый летний месяц формировались на основе 16-дневных композитов MODIS с учетом доли периода усреднения, охватываемой каждым композитом.

Поток солнечной радиации на нижней границе атмосферы в фотосинтетически активной области спектра (400–700 нм) на сети метеорологических станций непосредственно не измеряется, поэтому его значения на исследуемой территории взяты из базы данных реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA-Interim. Равномерные пространственно-временные распределения температуры воздуха и количества осадков получены путем интерполяции данных метеорологических наблюдений на территории Республики Беларусь и соседних государств. Интерполяция исходных данных проводилась методом обыкновенного кригинга, учитывающим статистические свойства поля восстанавливаемого параметра (Каневский и др., 1999; Goovaerts, 1997).

При интерполяции данных методом кригинга значение искомой переменной Z в некоторой точке пространства \mathbf{r} вычисляется как среднее взвешенное значение этой переменной во всех измерительных пунктах:

$$Z(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^n w_i Z(\mathbf{r}_i), \quad (1)$$

где i и w_i — номер и весовой коэффициент измерительного пункта, n — общее количество таких пунктов в заданной окрестности точки \mathbf{r} . Веса w_i определяются с учетом требований несмещенности оценки переменной Z в точке \mathbf{r} (среднее значение ошибки оценивания равно нулю) и минимума дисперсии ошибки (наилучшая в статистическом

смысле оценка). В итоге получается следующая система из $n + 1$ уравнения для нахождения w_i :

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n w_j \gamma(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) + \mu &= \gamma(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|), i = 1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n w_j &= 1 \end{aligned}, \quad (2)$$

где $|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$ — расстояние между точками \mathbf{r}_i и \mathbf{r}_j , $\gamma(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|)$ — функция, характеризующая ковариацию переменных в этих точках (вариограмма), μ — множитель Лагранжа.

Функция $\gamma(h)$, где h — произвольное расстояние между точками в исследуемой области, подбирается методом наименьших квадратов на основе эмпирической вариограммы, вычисляемой по формуле:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(\mathbf{r}_i) - Z(\mathbf{r}_j)]^2, \quad (3)$$

где \mathbf{r}_i и \mathbf{r}_j — координаты измерительных пунктов, удаленных друг от друга на расстояние от h до $h + \Delta h$, $N(h)$ — общее количество таких пунктов. Для задания функции $\gamma(h)$ во всей анализируемой пространственной области, эмпирические значения вариограммы (3) аппроксимируются экспоненциальной моделью, предполагающей, что пространственная автокорреляция уменьшается экспоненциально с увеличением расстояния:

$$\gamma(h) = a + b \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{c}\right) \right], \quad (4)$$

где a , b и c — параметры аппроксимации, получаемые методом наименьших квадратов.

Пример, иллюстрирующий интерполяцию метеорологических параметров на равномерную сетку географических координат с пространственным разрешением 0.02° , приведен на рис. 1. Видно, что эмпирическая вариограмма для количества осадков выходит на плато примерно с 200 км, т.е. на больших расстояниях между точками корреляция между осадками в них практически отсутствует. Вариограмма температуры воздуха продолжает возрастать вплоть до максимального расстояния между пунктами метеорологических наблюдений, что связано с наличием сильной широтной зональности в поле температуры в теплый период года.

Сопоставление измеренных значений метеопараметров с картами их интерполированных пространственных распределений (рис. 1 в, г) показывает достаточно высокую точность воспроизведения пространственных особенностей

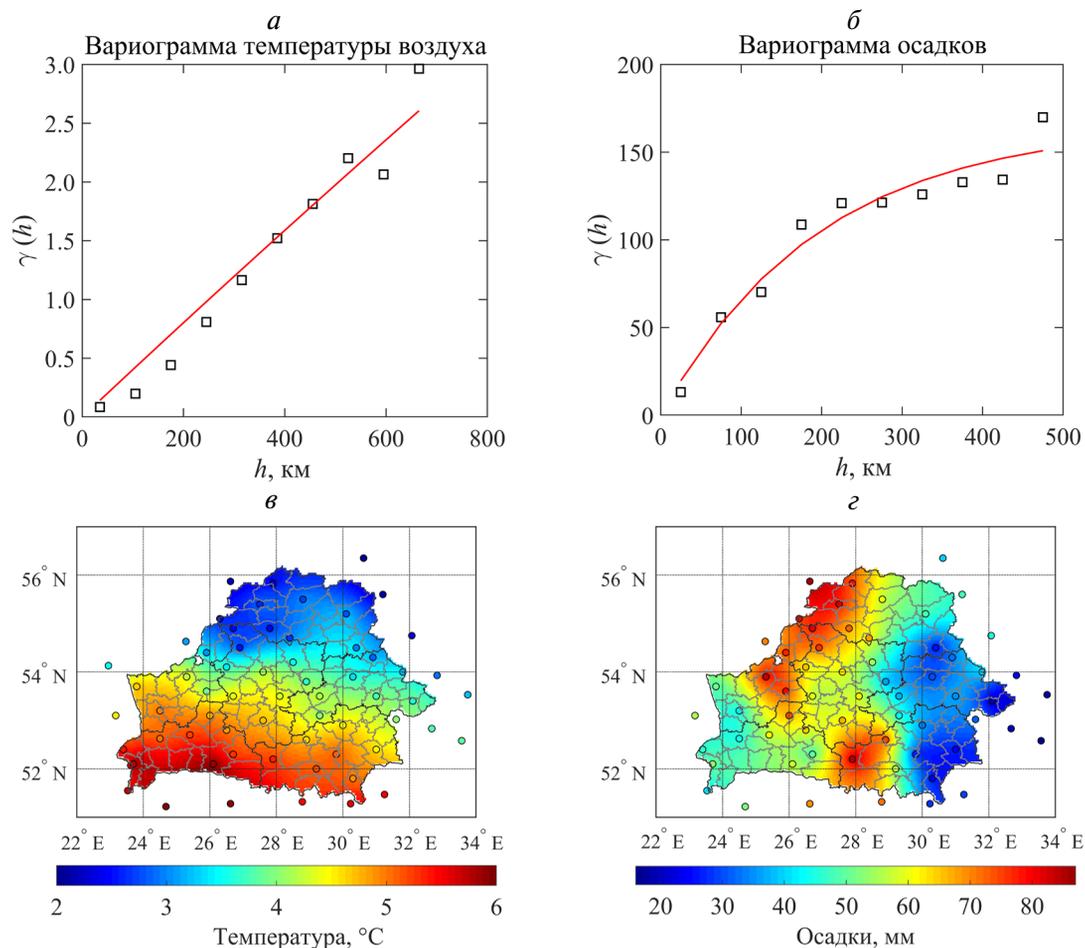


Рис. 1. Пример реконструкции пространственных полей температуры воздуха (*а, в*) и количества осадков (*б, з*) методом обыкновенного кригинга по данным метеонаблюдений в марте 2017 г.: *а и б* — эмпирические вариограммы (символы) и их аппроксимации экспоненциальной моделью (4) (линии); *в и з* — карты пространственных распределений температуры воздуха и количества осадков на территории Беларуси (точками отмечены их значения, измеренные на сети метеостанций).

метеорологический полей на основе их интерполяции методом кригинга. Некоторые отличия между измеренными и интерполированными значениями метеопараметров связаны со сглаживающим действием оператора кригинга (1) и неизбежно возникают при любом методе интерполяции. Среднеквадратическая ошибка интерполяции поля температуры, приведенного на рис. 1, составляет $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}$. Аналогичная ошибка для поля осадков — 7.2 мм или 14% от их среднего по Беларуси уровня за рассматриваемый месяц. Ошибки реконструкции других временных слоев сеточного архива данных не сильно отличаются от указанных выше значений. В целом для всего архива, охватывающего период с 1945 по 2017 гг., среднеквадратические ошибки оценивания температуры воздуха и количества осадков составляют $\sim 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 20% . Стоит заметить, что сравнительно высокая ошибка оценивания количества осадков связана с сильной неоднородностью его

пространственного распределения и с недостатком высокой плотности метеорологической сети. Тем не менее, это ошибка носит в значительной мере случайный характер и слабо отражается на результатах вычисления статистических характеристик временных рядов данных.

ИЗМЕНЕНИЯ БИОПРОДУКТИВНОСТИ ЗЕМЕЛЬ БЕЛАРУСИ В ТЕКУЩЕМ СТОЛЕТИИ

Изменения биопродуктивности земель Беларуси оценивались по величине линейного тренда NDVI, рассчитываемого методом наименьших квадратов в предположении равноточных измерений NDVI для каждого года. Карта коэффициента линейного тренда NDVI для территории Беларуси в период с 2000 по 2018 гг. приведена на рис. 2. Для характеристики структуры подстилающей поверхности использовались векторные ландшафтные карты, задающие контуры и расположение

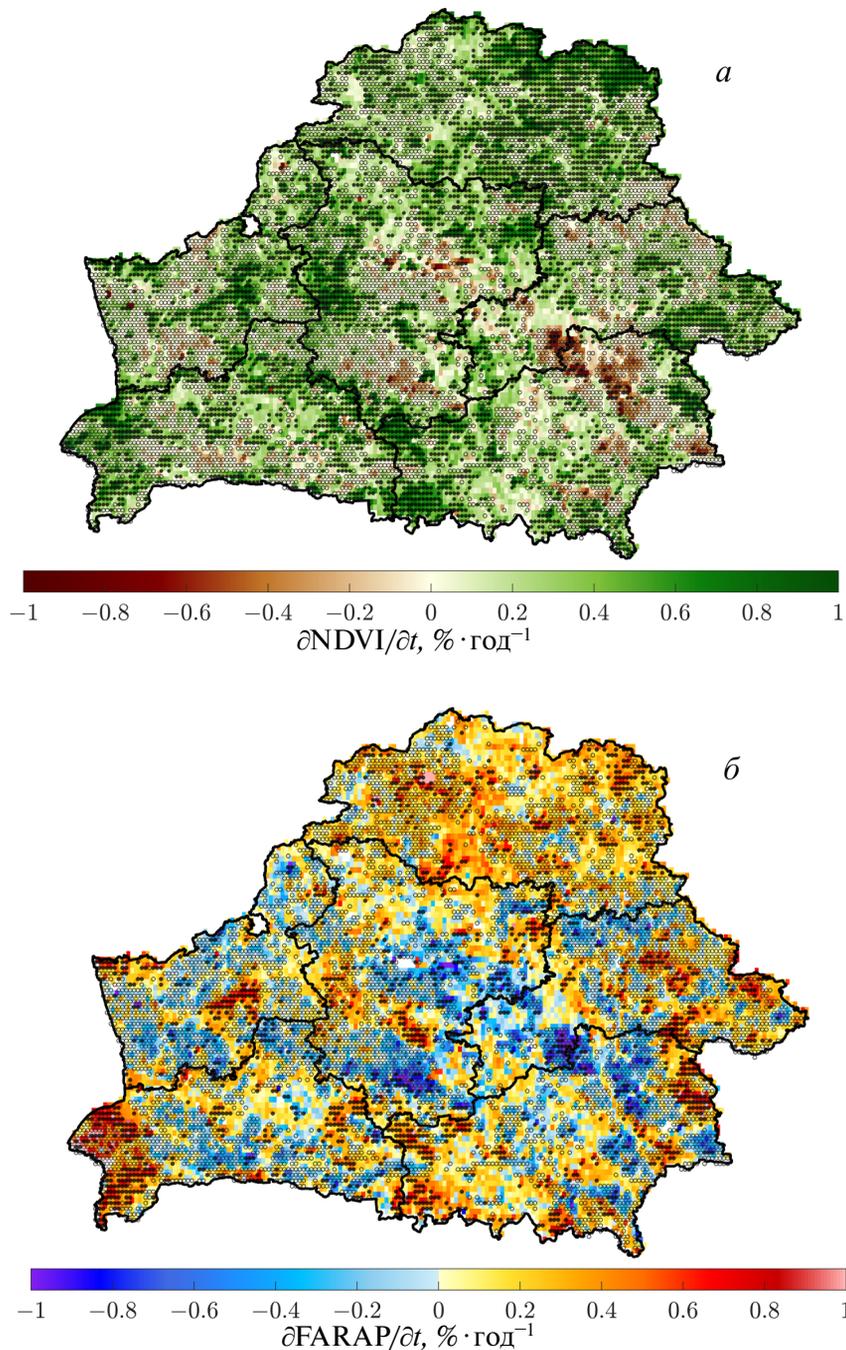


Рис. 2. Линейный тренд NDVI (а) и FAPAR (б) для территории Беларуси с начала текущего столетия по данным спутникового прибора MODIS. Точками отмечены районы с достоверным изменением NDVI и FAPAR при 5%-м уровне ошибки по критерию Стьюдента, кружочками — территории сельскохозяйственного назначения.

лесов, водоемов, болот, районных центров и деревень. Полагалось, что территории, не входящие в границы перечисленных объектов, главным образом относятся к пашням и сельскохозяйственным угодьям.

О корректности использования индекса NDVI для оценок долгопериодных изменений биопродуктивности наземных экосистем можно судить

на основании сопоставления карт трендов NDVI и FAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation). Индекс FAPAR определяет долю нисходящей фотосинтетически активной солнечной радиации (400–700 нм), поглощаемой растительным покровом. Этот индекс при неизменных метеорологических условиях вегетационного периода характеризует скорость образования

надземной биомассы в экосистеме (чистую первичную продукцию).

Из рис. 2 видно, что пространственное распределение тренда NDVI в деталях повторяет аналогичное распределение тренда FAPAR. Коэффициент корреляции между этими распределениями составляет 0.87, что свидетельствует о пропорциональности NDVI и FAPAR на каждом участке подстилающей поверхности. Таким образом, для анализа относительных изменений биопродуктивности, в принципе, можно использовать любой из этих индексов. Однако, учитывая большую достоверность спутниковых измерений NDVI по сравнению с измерениями FAPAR, в дальнейшем будем исходить из оценок изменений биопродуктивности на основе индекса NDVI.

На большей части площади Беларуси (примерно на 84%) наблюдается рост NDVI с начала текущего столетия, причем на 35% площади этот рост является статистически значимым при 5%-м уровне ошибки по критерию Стьюдента. Средняя по территории Беларуси скорость увеличения NDVI составляет 0.32%/год, а на отдельных территориях она достигает величин около 1%/год. В структуре площадей со статистически значимым ростом биопродуктивности (точки на рис. 2) преобладают лесные массивы и неосвоенные территории. Увеличение общей биопродуктивности территории Беларуси согласуется с установленным ранее фактом «озеленения» земной поверхности в средних и высоких северных широтах в условиях увеличения содержания углекислого газа в атмосфере и продолжительности вегетационного периода (Liu et al., 2015; Xu et al., 2013; Zhu et al., 2016). В то же время, как видно из рис. 2, вегетационный индекс большинства территорий сельскохозяйственного назначения изменяется незначительно или даже понижается. В отдельных регионах скорость уменьшения NDVI достигает величин около -1%/год и является статистически значимой. Это говорит о том, что в этих регионах положительный эффект от увеличения содержания CO₂ в атмосфере и продолжительности вегетационного периода нивелируется какими-то другими естественными или антропогенными факторами.

КЛИМАТОУСЛОВЛЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ БИОПРОДУКТИВНОСТИ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Для того чтобы выделить вклад климата в наблюдаемые изменения биопродуктивности наземных экосистем рассмотрим корреляции между NDVI и основными метеорологическими параметрами, определяющими эффективность

продукционного процесса растений: температурой воздуха, количеством осадков и солнечной радиацией. Поскольку наземные экосистемы реагируют на условия окружающей среды с некоторой задержкой, то период года, выбранный для усреднения метеорологических величин, начинается месяцем ранее периода для усреднения NDVI (с мая). Для исключения ложных корреляций между рассматриваемыми величинами, связанных с наличием трендовых компонент в их временной динамике, временные ряды всех величин предварительно освобождались от линейных трендов. Многофакторный статистический анализ проводился для отклонений NDVI и метеорологических параметров от их линейных трендов.

Анализ корреляций между межгодовой изменчивостью (отклонениями от трендов) рассматриваемых метеорологических параметров показал, что температура воздуха и количество осадков на территории Беларуси с мая по август изменяются практически независимо: средний коэффициент корреляции составляет -0.16. В то же время солнечная радиация имеет высокую степень корреляции с количеством осадков: средний коэффициент корреляции примерно -0.81. Столь тесная корреляция солнечной радиации с количеством осадков обусловлена их общей зависимостью от облачности: при увеличении облачности солнечная радиация, поступающая на земную поверхность, снижается, а количество осадков, как правило, увеличивается. Это обстоятельство приводит к тому, что пространственные особенности влияний солнечной радиации и количества осадков на биопродуктивность территории Беларуси практически повторяют друг друга, но с обратным знаком.

Карты коэффициентов корреляции между NDVI и независимыми метеорологическими параметрами приведены на рис. 3. Видно, что на территории Беларуси главным фактором изменчивости NDVI является количество осадков. Наиболее тесная корреляция между NDVI и количеством осадков характерна для территорий, отведенных под пашни и сельскохозяйственные угодья. На большей части сельскохозяйственных земель коэффициент корреляции между NDVI и количеством осадков превышает 0.8, т.е. количеством осадков на этих территориях определяется свыше 60% межгодовой изменчивости наземной биомассы. В целом по Беларуси количество осадков положительно влияет на биологическую продуктивность наземных экосистем, однако в отдельных регионах страны имеет место слабая отрицательная корреляция, обусловленная региональными особенностями гидрофизических

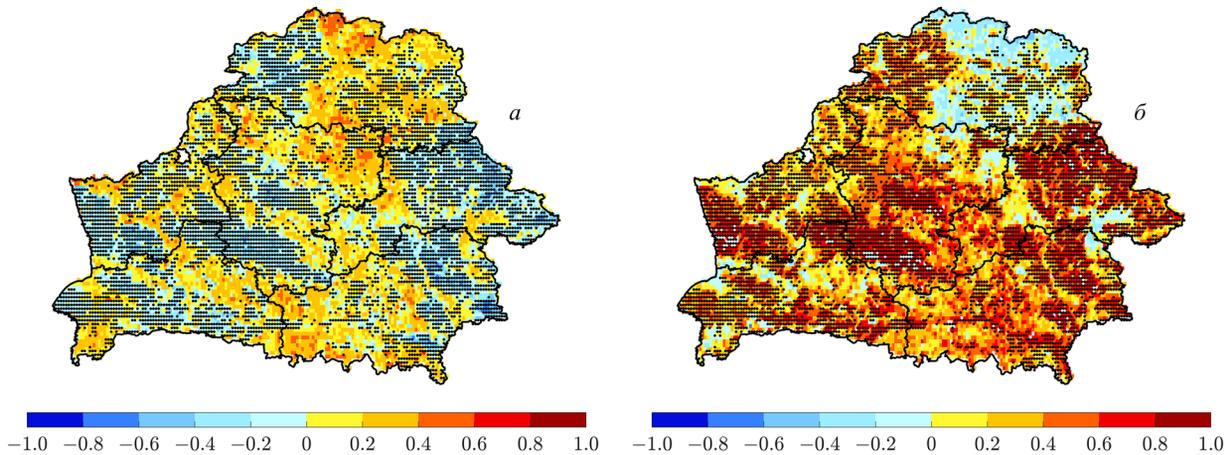


Рис. 3. Карты коэффициентов парной корреляции между NDVI и метеорологическими параметрами: средней температурой воздуха (а) и количеством осадков (б) с мая по август. Точками обозначены пашни и сельскохозяйственные угодья.

характеристик почв. Отрицательная зависимость надземной фотосинтетически активной биомассы от количества осадков преимущественно отмечается в восточной части Витебской области, где процент земель сельскохозяйственного назначения минимален, а в структуре почв преобладают дерново-подзолистые заболоченные почвы тяжелого гранулометрического состава, отличающиеся избыточным увлажнением.

Количественные оценки чувствительности надземной фотосинтетически активной биомассы к вариациям метеорологических параметров получены на основе эмпирических уравнений множественной регрессии вида:

$$\delta\text{NDVI} = a_0 + a_T \cdot \delta T_a + a_P \cdot \delta P, \quad (5)$$

где δNDVI — межгодовые вариации среднего значения NDVI в летние месяцы, δT_a и δP — межгодовые вариации средних значений температуры воздуха и количества осадков соответственно с мая по август; a_0 , a_T , a_P — коэффициенты регрессии, зависящие от региона. Коэффициенты a_T и a_P характеризуют чувствительность NDVI к температуре воздуха и количеству осадков. Зная пространственные распределения этих коэффициентов, а также климатические тенденции изменений метеопараметров, можно достаточно легко оценить климатообусловленные составляющие трендов NDVI на исследуемой территории. При малых изменениях метеорологических параметров относительно их абсолютных значений зависимость NDVI от этих параметров можно разложить в ряд Тейлора, ограничившись только линейными слагаемыми. Таким образом, можно связать скорости изменений NDVI и метеорологических параметров:

$$\frac{\partial\text{NDVI}}{\partial t} = \frac{\partial\text{NDVI}}{\partial T_a} \frac{\partial T_a}{\partial t} + \frac{\partial\text{NDVI}}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (6)$$

где $\partial T_a / \partial t$ и $\partial P / \partial t$ — скорости изменений температуры воздуха (T_a) и количества осадков (P) в данном регионе. Уравнение (6) задает составляющую тренда NDVI, обусловленную долгопериодными изменениями T_a и P . Для оценки частных производных от NDVI используются коэффициенты a_T и a_P уравнения регрессии (5).

Описанная выше процедура вычисления климатообусловленной составляющей тренда NDVI применялась ко всей территории Беларуси при ее пространственной дискретизации в 0.02° по долготу и широте. Карты скоростей изменения средней температуры воздуха и среднего количества осадков с мая по август в период с 1975 по 2017 гг. приведены на рис. 4а, в. Точками на этих картах обозначены районы со статистически значимыми изменениями метеопараметров при 5%-м уровне ошибки по критерию Стьюдента. Видно, что на всей территории Беларуси происходит быстрый и статистически достоверный рост температуры воздуха. Средняя температура воздуха с мая по август увеличивается примерно на 0.54°C за 10 лет. В то же время количество осадков на территории Беларуси изменяется крайне медленно и малозначительно на фоне их большой межгодовой изменчивости.

Составляющие тренда NDVI, связанные с долгопериодными изменениями T_a и P , приведены на рис. 4б, г. Видно, что из рассматриваемых двух метеорологических параметров роль температуры воздуха в долгопериодных изменениях NDVI является доминирующей. Именно изменениями температуры воздуха объясняются основные

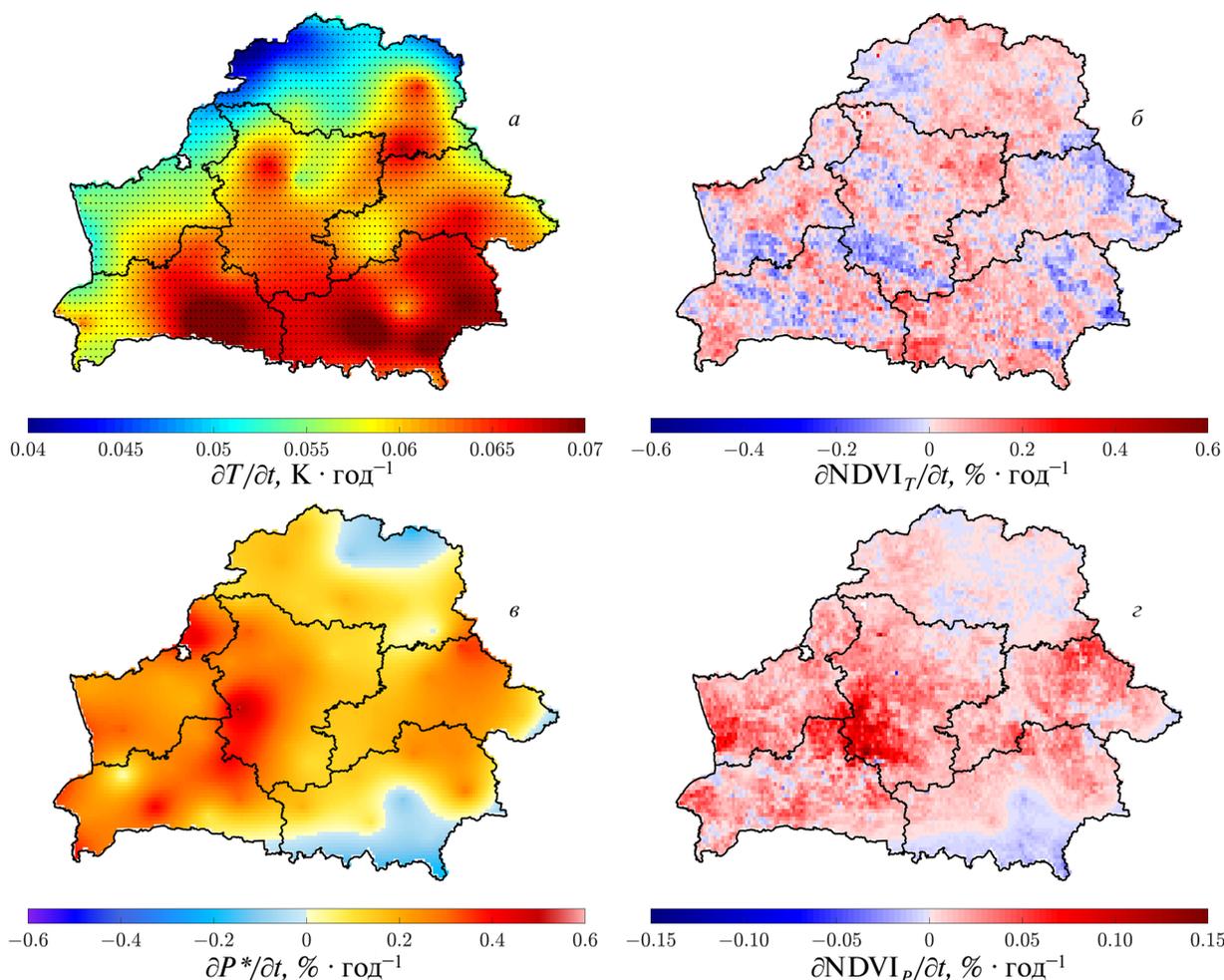


Рис. 4. Карты линейных трендов метеопараметров (а, в) и связанные с ними тренды NDVI (б, з) в период с 1975 по 2017 гг.; а и б — тренды для средней температуры воздуха, в и з — тренды для среднего количества осадков с мая по август.

пространственные особенности фактического тренда NDVI (рис. 2). Однако, в связи с высокой чувствительностью NDVI к количеству осадков, в отдельных регионах Беларуси, где скорость увеличения осадков принимает наибольшие значения, составляющие тренда NDVI, обусловленные осадками и температурой воздуха сопоставимы по величине.

Результирующая составляющая тренда NDVI, обусловленная комплексным влиянием температуры воздуха и количества осадков, приведена на рис. 5 для двух периодов: 1975–2000 гг. и 2000–2017 гг. Пространственное распределение климатообусловленного тренда NDVI в последний период практически полностью согласуется с данными спутниковых наблюдений, представленными на рис. 2. Таким образом, именно климат главным образом определяет пространственные особенности изменения биопродуктивности земель Беларуси. На землях сельскохозяйственного назначения изменения климата в основном приводят к снижению

фотосинтетически активной биомассы. Это связано с быстрым ростом температуры воздуха при практически неизменном количестве осадков в вегетационный период, что способствует усилению сельскохозяйственных засух. Особое опасение вызывает тот факт, что отрицательное влияние изменений климата на биопродуктивность сельскохозяйственных земель со временем усиливается: если до 2000 г. негативное влияние изменений климата в основном проявлялось в западной части Беларуси, то с 2000 г. этому влиянию стал подвержен и восток Беларуси. При сохранении наблюдаемых климатических тенденций биопродуктивность сельскохозяйственных земель во многих регионах Беларуси к середине текущего столетия может снизиться более чем на 20% по сравнению с ее уровнем 2000 г.

Дополнительными факторами снижения биологической продуктивности экосистем являются неблагоприятные климатические явления, частота которых возрастает с глобальным потеплением. В частности, к таким явлениям относятся

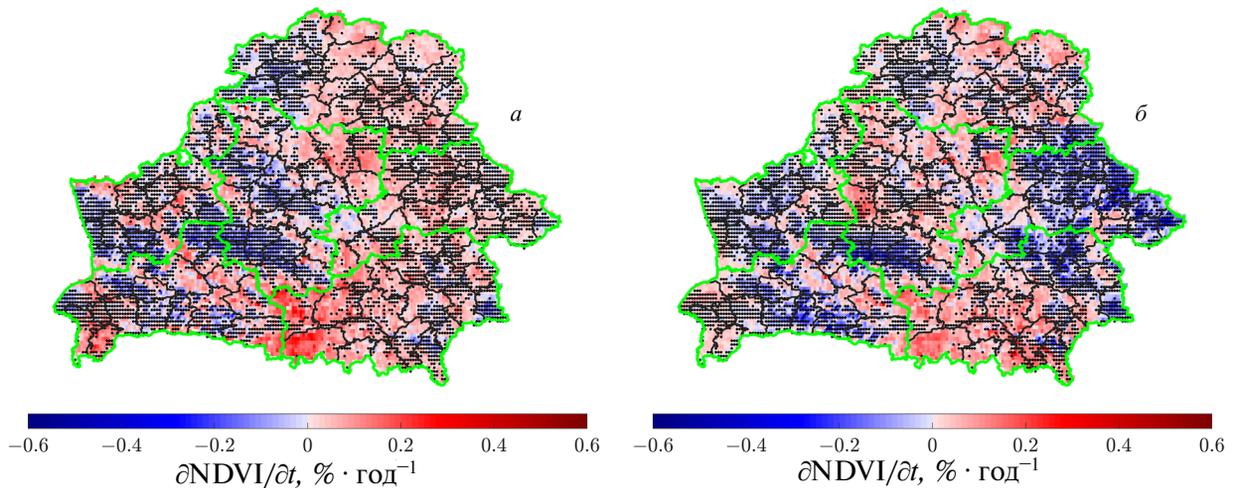


Рис. 5. Климатообусловленные составляющие тренда NDVI за периоды 1975–2000 гг. (а) и 2000–2018 гг. (б). Точками обозначены пашни и сельскохозяйственные угодья.

заморозки в весеннюю фазу вегетационного периода. По данным (Liu et al., 2018) на территории Европы число дней с заморозками в вегетационный период с 1982 по 2012 гг. увеличилось на 82% (2.8 ± 4.6 дней/год), причем основной рост пришелся на весеннюю часть вегетационного периода (2.7 ± 3.3 дней/год). Ранняя вегетация и потребление растениями запасов почвенной влаги делает их более уязвимыми перед последующими засухами, что также не способствует росту биологической продуктивности в жаркие и засушливые летние месяцы (Wuermann et al., 2018).

Однако, несмотря на негативное влияние изменений климата на биопродуктивность сельскохозяйственных земель Беларуси, данные официальной статистики свидетельствуют об увеличении урожайности основных сельскохозяйственных культур с конца 90-х годов прошлого века. Расхождение этих данных со спутниковыми наблюдениями и представленными выше расчетами, по-видимому, обусловлено сравнительно малой для Беларуси ролью климата в изменчивости урожаев сельскохозяйственных культур, по сравнению с ролью технологических факторов, ограничивающих достижение потенциально возможных урожаев (Логинов, 2010). В связи с этим у Республики Беларусь все еще имеется достаточный технологический резерв для противодействия неблагоприятным последствиям изменения климата для сельского хозяйства.

В тоже время, как видно из рис. 5, лесные массивы и неосвоенные территории Беларуси в целом положительно реагируют на изменения климата, что, вероятно, связано с лучшей способностью крупных экосистем удерживать влагу по сравнению с агрокультурами. Кроме того, кроны

деревьев затеняют почву и эффективно охлаждают ее в дневное время. Нельзя также исключать из рассмотрения и естественные способности некультивируемых видов растений адаптироваться к изменениям климата. У многих растений открытие устьиц (микроотверстий в листьях, через которые происходит испарение и газообмен с окружающей средой) зависит в первую очередь от содержания CO_2 в воздухе. Повышенный уровень CO_2 в воздухе ослабляет транспирацию и уменьшает потерю влаги почвой (Keeling et al., 2017; Swann et al., 2016).

Важно отметить, что фактический рост биопродуктивности неосвоенных территорий Республики Беларусь (рис. 2) происходит гораздо быстрее, чем это предсказывается на основе тенденций изменений температуры воздуха и количества осадков (рис. 5). По-видимому, главной причиной увеличения биопродуктивности этих территорий является возрастающий уровень CO_2 в воздухе и лучшая обеспеченность растений этим газом в процессе фотосинтеза. Этот вывод также согласуется с расчетами компьютерных моделей глобальной динамики экосистем (Zhu et al., 2016), отводящих климату лишь около 8% увеличения листового покрова Земли за период с 1982 по 2009 гг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Увеличение содержания CO_2 в атмосфере в целом положительно сказывается на биологической продуктивности в средних и высоких широтах. На территории Беларуси рост вегетационного индекса отмечается, как минимум с начала текущего столетия. На 35% площади Беларуси, преимущественно приходящейся на лесные массивы и неосвоенные территории, рост

вегетационного индекса является статистически значимым. В тоже время вегетационный индекс территорий сельскохозяйственного назначения понижается. В отдельных регионах скорость его понижения достигает значений $-1\%/год$.

Главным фактором межгодовой изменчивости биопродуктивности земель Беларуси является количество осадков. На землях сельскохозяйственного назначения этим параметром определяется около 60% межгодовой изменчивости средней за лето биомассы. Долгопериодные пространственные особенности изменений биопродуктивности земель Беларуси главным образом определяются влиянием температуры воздуха, что связано с ее быстрым ростом (средняя температура воздуха с мая по август растет со скоростью $0.54\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет) при практически неизменном количестве осадков в вегетационный период. При сохранении таких климатических тенденций биопродуктивность сельскохозяйственных земель во многих регионах Беларуси к середине текущего столетия может снизиться более чем на 20% по сравнению с 2000 годом. Однако, в настоящее время роль климата в изменчивости урожаев сельскохозяйственных культур, собираемых в Беларуси, незначительна по сравнению с ролью технологических факторов, ограничивающих достижение потенциально возможных урожаев. В связи с этим в Беларуси пока еще существует достаточный технологический резерв для противодействия неблагоприятным для сельского хозяйства последствиям изменения климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев Г.В. и др. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1007 с.

Каневский М.Ф., Демьянов В.В., Савельева Е.А., Чернов С.Ю., Тимонин В.А. Элементарное введение в геостатистику // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 1999. № 11. 136 с.

Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Казанцев О.Ю., Персев И.В., Щербаков М.В. Обработка данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 5. С. 3–11.

Козодеров В.В., Дмитриев Е.В. Модели распознавания и оценки состояния лесной растительности по гиперспектральным данным дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 6. С. 75–88.

Логинов В.Ф. Изменения климата в Беларуси и их последствия для ключевых секторов экономики (сельское, лесное и водное хозяйство). Мн.: БелНИЦ «Экология», 2010. 151 с.

Павлова В.Н., Сиротенко О.Д. Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского

хозяйства России // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. 2012. Вып. 565. С. 132–150.

Сиротенко О.Д., Клещенко А.Д., Павлова В.Н., Абашина Е.В., Семендяев А.К. Мониторинг изменений климата и оценка последствий // Агрофизика. 2011. № 3. С. 31–39.

Bjorkman A.D. et al. Plant functional trait change across a warming tundra biome // Nature. 2018. V. 562(7725). P. 57–62. doi: 10.1038/s41586-018-0563-7

Buermann W., Forkel M., O'Sullivan M., Stith S., Friedlingstein P., Haverd V., Jain A.K., Kato E., Kautz M., Lienert S., Lombardozzi D., Nabel J.E.M.S., Tian H., Wiltshire A.J., Zhu D., Smith W.K., Richardson A.D. Widespread seasonal compensation effects of spring warming on northern plant productivity // Nature. 2018. V. 562(7725). P. 110–114. doi: 10.1038/s41586-018-0555-7

Chen C., Park T., Wang X., Piao S., Xu B., Chaturvedi R.K., Fuchs R., Brovkin V., Ciais P., Fensholt R., Tømmervik H., Bala G., Zhu Z., Nemani R.R., Myneni R.B. China and India lead in greening of the world through land-use management // Nat. Sustain. 2019. V. 2. P. 122–129. doi: 10.1038/s41893-019-0220-7

Duveiller G., Hooker J., Cescatti A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance // Nat Commun. 2018. V. 9. № 679. P. 679–1–679–12.

Forzieri G., Alkama R., Miralles D.G., Cescatti A. Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth // Science. 2017. V. 356(6343). P. 1180–1184. doi: 10.1126/science.aal1727

Goovaerts P. Geostatistics for natural resources evaluation. New York: Oxford University Press, 1997. 483 p.

Ganguly S., Nemani R.R., Baret F., Bi J., Weiss M., Zhang G., Milesi C., Hashimoto H., Samanta A., Verger A., Singh K., Myneni R.B. Green Leaf Area and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation / J.M. Hanes (ed.). Biophysical Applications of Satellite Remote Sensing. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. P. 43–61. doi: 10.1007/978-3-642-25047-7_2

Green J.K., Konings A.G., Alemohammad S.H., Berry J., Entekhabi D., Kolassa J., Lee J.-E., Gentine P. Regionally strong feedbacks between the atmosphere and terrestrial biosphere // Nat. Geosci. 2017. V. 10. P. 410–414. doi: 10.1038/ngeo2957

Keeling R.F., Graven H.D., Welp L.R., Resplandy L., Bi J., Piper S.C., Sun Y., Bollenbacher A., Meijer H.A.J. Atmospheric evidence for a global secular increase in carbon isotopic discrimination of land photosynthesis // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2017. V. 114. № 39. P. 10361–10366. doi: 10.1073/pnas.1619240114

Kozoderov V.V., Dmitriev E.V. Remote sensing of soils and vegetation: quantitative parameters retrieval using pattern-recognition techniques and forest stand structure assessment // Int. J. Rem. Sens. 2011. V. 32. P. 5699–5717. doi: 10.1080/01431161.2010.507262

Kozoderov V.V., Dmitriev E.V. Testing different classification methods in airborne hyperspectral imagery processing // Opt. Expr. 2016. V. 24. № 10. P. A956–A965. doi: 10.1364/OE.24.00A956

- Liu Q., Piao S., Janssens I.A., Fu Y., Peng S., Lian X., Ciais P., Myneni R.B., Peñuelas J., Wang T. Extension of the growing season increases vegetation exposure to frost // *Nat. Commun.* 2018. V. 9. № 1. P. 426–1–426–8. doi: 10.1038/s41467-017-02690-y
- Liu Y.Y., van Dijk A.I.J.M., de Jeu R.A.M., Canadell J.G., McCabe M.F., Evans J.P., Wang G. Recent reversal in loss of global terrestrial biomass // *Nat. Clim. Chang.* 2015. V. 5. № 5. P. 470–474. doi: 10.1038/nclimate2581
- Myneni R.B., Williams D.L. On the Relationship between FAPAR and NDVI // *Remote Sens. Environ.* 1994. V. 49. № 3. P. 200–211. doi: 10.1016/0034-4257(94)90016-7
- Running S., Nemani R., Heinsch F., Zhao M., Reeves M., Hashimoto H. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production // *BioScience.* 2004. V. 54. № 6. P. 547–560. doi: 10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSMOG]2.0.CO;2
- Swann A.L.S., Hoffman F.M., Koven C.D., Randerson J.T. Plant responses to increasing CO₂ reduce estimates of climate impacts on drought severity // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2016. V. 113. № 36. P. 10019–10024. doi: 10.1073/pnas.1604581113
- Xiao X., Jin C., Dong J. Gross Primary Production of Terrestrial Vegetation / J.M. Hanes (ed.). *Biophysical Applications of Satellite Remote Sensing.* Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. P. 127–148. doi: 10.1007/978-3-642-25047-7_2
- Xu L., Myneni R.B., Chapin F.S., Callaghan T.V., Pinzon J.E., Tucker C.J., Zhu Z., Bi J., Ciais P., Tømmervik H., Euskirchen E.S., Forbes B.C., Piao S.L., Anderson B.T., Ganguly S., Nemani R.R., Goetz S.J., Beck P.S.A., Bunn A.G., Cao C., Stroeve J.C. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands // *Nat. Clim. Chang.* 2013. V. 3. № 6. P. 581–586. doi: 10.1038/nclimate1836
- Zeng Z., Piao S., Li L.Z.X., Zhou L., Ciais P., Wang T., Li Y., Lian X., Wood E.F., Friedlingstein P., Mao J., Estes L.D., Myneni R.B., Peng S., Shi X., Seneviratne S.I., Wang Y. Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades // *Nat. Clim. Chang.* 2017. V. 7. P. 432–436. doi: 10.1038/nclimate3299
- Zhu Z., Piao S., Myneni R.B., Huang M., Zeng Z., Canadell J.G., Ciais P., Sitch S., Friedlingstein P., Arneeth A., Cao C., Cheng L., Kato E., Koven C., Li Y., Lian X., Liu Y., Liu R., Mao J., Pan Y., Peng S., Peñuelas J., Poulter B., Pugh T.A.M., Stocker B.D., Viovy N., Wang X., Wang Y., Xiao Z., Yang H., Sönke Z., Zeng N. Greening of the Earth and its drivers // *Nat. Clim. Chang.* 2016. V. 6. № 8. P. 791–795. doi: 10.1038/nclimate3004

Climate-Forced Changes of Bio-Productivity of Belorussian Terrestrial Ecosystems

S. A. Lysenko

Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

The spatial and temporal particularities of Normalized Differential Vegetation Index (NDVI) changes over territory of Belarus in the current century and their relationship with climate change were investigated. The rise of NDVI is observed at approximately 84% of the Belarus area. The statistically significant growth of NDVI has exhibited at nearly 35% of the studied area (t-test at 95% confidence interval), which are mainly forests and undeveloped areas. Croplands vegetation index is largely descending. The main factor of croplands bio-productivity interannual variability is precipitation amount in vegetation period. This factor determines more than 60% of the croplands NDVI dispersion. The long-term changes of NDVI could be explained by combination of two factors: photosynthesis intensifying action of carbon dioxide and vegetation growth suppressing action of air warming with almost unchanged precipitation amount. If the observed climatic trend continues the croplands bio-productivity in many Belarus regions could be decreased at more than 20% in comparison with 2000 year. The impact of climate change on the bio-productivity of undeveloped lands is only slightly noticed on the background of its growth in conditions of rising level of carbon dioxide in the atmosphere.

Keywords: bio-productivity, climate change, interannual variability, long-term changes

REFERENCES

- Alekseev G.V. et al. Vtoroy ochenochniy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossiyskoy Federacii [Second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation]. Moscow: Roshydromet, 2014. 1007 p. (In Russian)
- Kanevskiy M.F., Dem'yanov V.V., Savel'eva E.A., Chernov S. Yu., Timonin V.A. Elementarnoe vvedenie v geostatistiku [Elementary introduction to geostatistics] // *Problemy okruzhayushey sredy i prirodnyh resursov.* 1999. № 11. 136 p. (In Russian)
- Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V., Kazantsev O. Yu., Persev I.V., Scherbakov M.V. Obrabotka dannyh giperspektral'nogo aerokosmicheskogo issledovaniya [Hyperspectral aerospace research data processing] // *Issledovaniya Zemli iz kosmosa.* 2012. № 5. P. 3–11. (In Russian)
- Kozoderov V.V., Dmitriev E.V. Modeli raspoznavaniya i ochenki sostoyaniya lesnoy rastitel'nosti po giperspektral'nym dannym distancionnogo zondirovaniya [Recognition and estimation models of the state of forest vegetation based on the remote sensing hyperspectral data] // *Issledovaniya Zemli iz kosmosa.* 2017. № 6. P. 75–88. (In Russian)
- Loginov V.F. Izmeneniya klimata v Belarusi i ih posledstviya dlya klyuchevykh sektorov ekonomiki (sel'skoe, lesnoe i vodnoe hozyaystvo) [Climate change in Belarus and its consequences for the key sectors of economy (agriculture,

- forestry and water industry)]. Minsk: BelNIC "Ecology", 2010. 151 p. (In Russian)
- Pavlova V.N., Sirotenko O.D.* Nablydaemye izmeneniya klimata i dinamika produktivnosti sel'skogo hozyaystva [Observed climate change and agriculture productivity dynamics] // Trudy GGO im. A.I. Voeykova. 2012. Is. 565. P. 132–150. (In Russian)
- Sirotenko O.D., Kleschenko A.D., Pavlova V.N., Abashina E.V., Semendyaev A.K.* Monitoring izmeneniy klimata i oценка posledstviy [Climate change monitoring and estimation of consequences] // Agrofizika. 2011. № 3. P. 31–39. (In Russian)
- Bjorkman A.D. et al.* Plant functional trait change across a warming tundra biome // *Nature*. 2018. V. 562(7725). P. 57–62. doi: 10.1038/s41586-018-0563-7
- Buermann W., Forkel M., O'Sullivan M., Sitch S., Friedlingstein P., Haverd V., Jain A.K., Kato E., Kautz M., Lienert S., Lombardozzi D., Nabel J.E.M.S., Tian H., Wiltshire A.J., Zhu D., Smith W.K., Richardson A.D.* Widespread seasonal compensation effects of spring warming on northern plant productivity // *Nature*. 2018. V. 562(7725). P. 110–114. doi: 10.1038/s41586-018-0555-7
- Chen C., Park T., Wang X., Piao S., Xu B., Chaturvedi R.K., Fuchs R., Brovkin V., Ciais P., Fensholt R., Tømmervik H., Bala G., Zhu Z., Nemani R.R., Myneni R.B.* China and India lead in greening of the world through land-use management // *Nat. Sustain.* 2019. V. 2. P. 122–129. doi: 10.1038/s41893-019-0220-7
- Duveiller G., Hooker J., Cescatti A.* The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance // *Nat Commun.* 2018. V. 9. № 679. P. 679–1–679–12.
- Forzieri G., Alkama R., Miralles D.G., Cescatti A.* Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth // *Science*. 2017. V. 356(6343). P. 1180–1184. doi: 10.1126/science.aal1727
- Goovaerts P.* Geostatistics for natural resources evaluation. New York: Oxford University Press, 1997. 483 p.
- Ganguly S., Nemani R.R., Baret F., Bi J., Weiss M., Zhang G., Milesi C., Hashimoto H., Samanta A., Verger A., Singh K., Myneni R.B.* Green Leaf Area and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation / J.M. Hanes (ed.). Biophysical Applications of Satellite Remote Sensing. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. P. 43–61. doi: 10.1007/978-3-642-25047-7_2
- Green J.K., Konings A.G., Alemohammad S.H., Berry J., Entekhabi D., Kolassa J., Lee J.-E., Gentine P.* Regionally strong feedbacks between the atmosphere and terrestrial biosphere // *Nat. Geosci.* 2017. V. 10. P. 410–414. doi: 10.1038/ngeo2957
- Keeling R.F., Graven H.D., Welp L.R., Resplandy L., Bi J., Piper S.C., Sun Y., Bollenbacher A., Meijer H.A.J.* Atmospheric evidence for a global secular increase in carbon isotopic discrimination of land photosynthesis // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2017. V. 114. № 39. P. 10361–10366. doi: 10.1073/pnas.1619240114
- Kozoderov V.V., Dmitriev E.V.* Remote sensing of soils and vegetation: quantitative parameters retrieval using pattern-recognition techniques and forest stand structure assessment // *Int. J. Rem. Sens.* 2011. V. 32. P. 5699–5717. doi: 10.1080/01431161.2010.507262
- Kozoderov V.V., Dmitriev E.V.* Testing different classification methods in airborne hyperspectral imagery processing // *Opt. Expr.* 2016. V. 24. № 10. P. A956–A965. doi: 10.1364/OE.24.00A956
- Liu Q., Piao S., Janssens I.A., Fu Y., Peng S., Lian X., Ciais P., Myneni R.B., Peñuelas J., Wang T.* Extension of the growing season increases vegetation exposure to frost // *Nat. Commun.* 2018. V. 9. № 1. P. 426–1–426–8. doi: 10.1038/s41467-017-02690-y
- Liu Y.Y., van Dijk A.I.J.M., de Jeu R.A.M., Canadell J.G., McCabe M.F., Evans J.P., Wang G.* Recent reversal in loss of global terrestrial biomass // *Nat. Clim. Chang.* 2015. V. 5. № 5. P. 470–474. doi: 10.1038/nclimate2581
- Myneni R.B., Williams D.L.* On the Relationship between FAPAR and NDVI // *Remote Sens. Environ.* 1994. V. 49. № 3. P. 200–211. doi: 10.1016/0034-4257(94)90016-7
- Running S., Nemani R., Heinsch F., Zhao M., Reeves M., Hashimoto H.* A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production // *BioScience*. 2004. V. 54. № 6. P. 547–560. doi: 10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSMOG]2.0.CO;2
- Swann A.L.S., Hoffman F.M., Koven C.D., Randerson J.T.* Plant responses to increasing CO₂ reduce estimates of climate impacts on drought severity // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2016. V. 113. № 36. P. 10019–10024. doi: 10.1073/pnas.1604581113
- Xiao X., Jin C., Dong J.* Gross Primary Production of Terrestrial Vegetation / J.M. Hanes (ed.). Biophysical Applications of Satellite Remote Sensing. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. P. 127–148. doi: 10.1007/978-3-642-25047-7_2
- Xu L., Myneni R.B., Chapin F.S., Callaghan T.V., Pinzon J.E., Tucker C.J., Zhu Z., Bi J., Ciais P., Tømmervik H., Euskirchen E.S., Forbes B.C., Piao S.L., Anderson B.T., Ganguly S., Nemani R.R., Goetz S.J., Beck P.S.A., Bunn A.G., Cao C., Stroeve J.C.* Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands // *Nat. Clim. Chang.* 2013. V. 3. № 6. P. 581–586. doi: 10.1038/nclimate1836
- Zeng Z., Piao S., Li L.Z.X., Zhou L., Ciais P., Wang T., Li Y., Lian X., Wood E.F., Friedlingstein P., Mao J., Estes L.D., Myneni R.B., Peng S., Shi X., Seneviratne S.I., Wang Y.* Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades // *Nat. Clim. Chang.* 2017. V. 7. P. 432–436. doi: 10.1038/nclimate3299
- Zhu Z., Piao S., Myneni R.B., Huang M., Zeng Z., Canadell J.G., Ciais P., Sitch S., Friedlingstein P., Arneeth A., Cao C., Cheng L., Kato E., Koven C., Li Y., Lian X., Liu Y., Liu R., Mao J., Pan Y., Peng S., Peñuelas J., Poulter B., Pugh T.A.M., Stocker B.D., Viomy N., Wang X., Wang Y., Xiao Z., Yang H., Sönke Z., Zeng N.* Greening of the Earth and its drivers // *Nat. Clim. Chang.* 2016. V. 6. № 8. P. 791–795. doi: 10.1038/nclimate3004