

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА В БАССЕЙНЕ РЕКИ ОКИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Т.А. Трифонова<sup>1</sup>, Н.В. Мищенко<sup>2</sup>, П.С. Шутов<sup>3</sup>, Е.П. Быкова<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения

<sup>2,3</sup> Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, институт биологии и экологии

<sup>1</sup> Проф., д-р биол. наук; e-mail: tatrifon@mail.ru

<sup>2</sup> Проф., д-р биол. наук; e-mail: natmich3@mail.ru

<sup>3</sup> Мл. науч. сотр.; e-mail: pav.shutov59@mail.ru

<sup>4</sup> Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: elebyk2008@rambler.ru

Исследование проведено в бассейне р. Оки, площадью 245 тыс. км<sup>2</sup>. Водосбор расположен в европейской части Российской Федерации и относится к Волжскому бассейну. На основе анализа данных дистанционного зондирования рассматривается динамика почвенно-продукционных процессов и структуры землепользования на его территории. Природный комплекс бассейна р. Оки представляет собой сложную комбинацию различных ландшафтов, каждый из которых характеризуется разнообразным составом геоморфологических и почвенно-растительных структур. Для оценки состояния ландшафтов в качестве ключевых участков выделены водосборные бассейны притоков, полностью входящие в каждый определенный ландшафт. В каждом таком бассейне определена структура землепользования. По данным дистанционного зондирования MODIS primary productivity – в 6.1, в программной среде ArcGis 10.8 в каждом из изучаемых бассейнов произведен расчет показателей фитопродуктивности в углеродных единицах с 2000 по 2015 г. для пика вегетационного сезона (середины июля) в малых (ключевых) речных бассейнах. Проведена оценка запаса органического углерода почвы в целом бассейне Оки. Проанализирована тенденция динамики чистой и валовой первичной продукции, запаса органического углерода почв в ключевых речных бассейнах р. Оки, находящихся в различных ландшафтных провинциях. Установлено, что периоды повышения и снижения продукции в разных ландшафтах, в основном, совпадают, однако размах этих изменений и стабильность показателей продуктивности различаются. Показано, что размер и структура земельных угодий значительно влияют на показатели фитопродукции ландшафтов. Выявлены основные тренды динамики чистой первичной продукции в малых речных бассейнах и в бассейне всей Оки. Показано, что для интегральной оценки обширных речных бассейнов необходимо использовать несколько уровней оценки в зависимости от целей исследования. Первый уровень – оценка параметров функционирования целого бассейна. Второй – анализ «вложенных» ландшафтов и бассейнов, который позволяет учесть разнонаправленные процессы внутри единой водосборной системы. В данном случае предлагается использовать ключевые участки, представленные более мелкими репрезентативными речными бассейнами.

**Ключевые слова:** ландшафтный подход исследования, данные дистанционного зондирования MODIS, вегетационные индексы, валовая и чистая первичная продукция экосистем, динамика почвенно-производственных процессов

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.5.3

### ВВЕДЕНИЕ

Продуктивность растительного покрова традиционно считается важнейшей характеристикой состояния и устойчивости экосистем, играющей незаменимую роль в сохранении биоразнообразия. В оценке состояния почвенно-растительного покрова различных территорий широкое применение получили материалы многозональной космической съемки, которые позволяют оперативно оценивать его пространственно-временную динамику и экстраполировать результаты наземных измерений [Золотокрылин и др., 2013; Тишков и др., 2021; Хорошев, 2021].

Большую популярность приобретают модели, позволяющие оценить продуктивность экосистем по ряду индексов, рассчитываемых по дистанционным данным. К наиболее распространенным относятся NDVI – вегетационный индекс, EVI – усовершенствованный вегетационный индекс, LAI – листовой индекс, FPAR – индекс поглощенной фотосинтетической активной радиации. В настоящее время все чаще используются открытые глобальные данные MODIS о валовой первичной продуктивности – GPP, для изучения углеродного цикла, связанного с наземными экосистемами [Hashimoto et al., 2012; Дьяконов и др., 2017;

Zhang, Zeng, 2018; Robinson et al., 2018; Chen et al., 2019; Varghese, Behera, 2019].

Однако, несмотря на многочисленный ряд исследований, отсутствуют общепринятые подходы для оценки, анализа и прогноза биологической продуктивности экосистем. Хотя создана и активно используется обширная база данных биопродукционных характеристик экосистем, полученных наземными методами, их использование не всегда дает сопоставимые результаты при проведении сравнительных оценок различных ландшафтов на протяжении длительного времени [Prince, 2019; Dedeoglu et al., 2020; Васильев, 2020]. Кроме того, получение динамичных рядов наземными методами является очень трудоемким. Использование дистанционных данных в этих случаях является предпочтительным и имеет много преимуществ [Bin et al., 2019; Wang et al., 2020].

Для того чтобы провести комплексную характеристику состояния почвенно-растительного покрова территорий, в исследованиях применяется комплекс углеродных показателей, а также привлекается анализ данных о структуре и особенностях землепользования. Такой набор вполне всеобъемлющее позволяет охарактеризовать устойчивость экосистемы, а также выявить степень антропогенного влияния на территории речного бассейна. Известно, что при определенных почвенно-биоклиматических условиях в течение определенного промежутка времени экосистема способна «самовоспроизводиться», т. е. воспроизводить продукцию – фитомассу [Трифонова, Мищенко, 2013].

В настоящее время чрезвычайно актуальны вопросы функционирования ландшафтов в границах одной или соседствующих природно-климатических зон, отличающихся антропогенной нагрузкой [Vagge, Chiaffarelli, 2023], структурой землепользования [Chen et al., 2023], почвенно-растительным покровом [Герасимова и др., 2014]. Эти характерные черты оказывают влияние на фитопродуктивность и накопление углерода в почве [Nabiollahi et al., 2021]. В связи с этим встает необходимость изучения динамики производственных процессов, а также причин изменения структуры землепользования, выявляя определяющие их факторы в заданном ландшафте [Menichetti, 2017].

В качестве методов оценки состояния почвенно-растительного покрова и его динамики большое распространение получают методы дистанционного зондирования. Наличие разнообразных баз данных позволяет изучать экосистемы в динамическом развитии с использованием таких показателей, как валовая и чистая продукция, затраты растений на дыхание, динамика углерода и др. [Turner et al., 2006; Werf van der et al., 2009; Wu et al., 2010; Dong et al., 2019]. Актуальным является изучение показателей

продуктивности в углеродных единицах, эти данные широко используются для оценки углеродного баланса и стабильности экосистем. В настоящее время все чаще используются открытые глобальные данные MODIS о валовой первичной продукции (GPP) для изучения углеродного цикла, связанного с наземными экосистемами [Turner et al., 2006; Wu et al., 2010; Liu et al., 2023].

Анализ состояния экосистем и особенностей землепользования целесообразно проводить в различных природно-территориальных комплексах, среди которых важная роль отводится речным бассейнам [Трифонова, 2005].

Интенсивно развивается бассейновый подход при таких исследованиях. Методы статистического анализа наиболее эффективны при применении бассейнового подхода к изучению экосистем, т. к. наряду с зональным типом геопространства бассейн является важной функциональной геоморфологической единицей. Бассейн реки необходимо рассматривать как основную биосферную систему, в пределах которой целесообразно проводить анализ состояния природно-антропогенных экосистем и особенностей землепользования [Трифонова, 2005; Богданова и др., 2016].

Настоящее исследование посвящено оценке показателей фитопродуктивности, структуры землепользования и почвенного углерода в динамике за период с 2000 по 2015 г. в пределах водосбора реки Оки и его малых речных бассейнов.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования явился целый водосбор реки Оки, его ландшафтные провинции и малые речные бассейны притоков, расположенные на его территории. Исследование базируется на бассейновом и ландшафтном подходах к районированию территории. Данные подходы основаны на разных принципах и в данном исследовании взаимодополняют друг друга.

В настоящей работе в качестве ключевых участков были определены территории более мелких речных бассейнов, образованных притоками Оки.

Согласно почвенно-ландшафтному районированию Восточно-Европейской равнины, бассейн Оки находится в двух географических поясах ( boreальном и суб boreальном), двух почвенно-биоклиматических областях и трех почвенно-ландшафтных зонах [National Atlas..., 2011].

Работа выполнена с применением геоинформационного анализа данных дистанционного зондирования и картографической информации о почвенно-растительном покрове.

Векторизация речной сети и определение границ водоразделов проведена на основе цифровой моде-

ли рельефа (ЦМР). Входными данными являлась радарная топографическая съемка Земли – SRTM 30 (Shuttle radar topographic mission).

Типы земельных угодий определены на основе HDF растротов за четыре даты: 2001, 2005, 2009, 2017 гг. по открытому данным аппарата MODIS. Для более детального анализа структуры землепользования использовалась система деградации земель Trend.Earth (модуль «Наземный покров», European Space Agency, пространственное разрешение данных 100 м).

Запасы органического углерода в почве определены по данным продовольственной организации ООН (ФАО) на основе модуля Trend.Earth ГИС пакета QGIS v. 2.18. Данные генерализованы по структуре всемирной базы данных почвенного покрова SoilGrids Международного информационного центра по почвам на глубине 0–30 см.

Расчет показателей продукции в углеродных единицах основан на данных MODIS GPP/NPP. В ходе расчета баланса углерода получены следующие показатели (для пика вегетационного сезона (середина июля) в период с 2000 по 2015 г.): валовая первичная продукция (gross primary production),  $\text{гC}/\text{м}^2$  (GPP); чистая первичная продукция (net primary production),  $\text{гC}/\text{м}^2$  (NPP); общие затраты на дыхание автотрофов,  $\text{гC}/\text{м}^2$  (RE).

Полученный набор растровых сцен формата HDF обрабатывался инструментами переклассификации и зональной статистики ГИС пакета ArcGis.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Картографирование и анализ ландшафтно-бассейновой структуры бассейна реки Оки.** В бассейне Оки выделяется восемь ландшафтных провинций (Волжско-Клязьминская, Клинско-Дмитровская, Смоленско-Московская, Мещера, Среднерусская, Окско-Цининская, Мокша-Тешинская, Окско-Донская), характеризующихся разнообразием почвенно-растительного покрова, структурой землепользования, сельскохозяйственной освоенностью.

**Определение ключевых речных бассейнов (ключевых участков).** В пределах всего бассейна р. Оки были выделены более мелкие бассейны, в пределах которых определено состояние почвенно-растительного покрова. Выбор ключевых участков в виде бассейнов объясняется тем, что, как известно, водосборные бассейны имеют однотипную геоморфологическую структуру, сформированную вокруг определенной системы водотоков. Следовательно, особенности строения и функционирования почвенно-растительного покрова внутри бассейна будут в значительной мере определяться характером ландшафта, в пределах которого сформирован конкретный водосбор.

Выполнено сопоставление границ малых речных бассейнов с ландшафтными провинциями и определены ландшафтно-однородные и ландшафтно-неоднородные малые водосборы. Далее из количества ландшафтно-однородных бассейнов выбраны восемь ключевых бассейнов, репрезентативных для каждой из восьми ландшафтных провинций. Таким образом, каждый ключевой бассейн характеризует наиболее типичные сочетания почвенно-растительных условий, морфологических особенностей и условий землепользования в каждой ландшафтной провинции.

Ключевые речные бассейны соответствуют следующим параметрам:

- 1) каждый бассейн представляет одну из ландшафтных провинций бассейна Оки и полностью расположен на ее территории, т. е. характеризуется ландшафтной однородностью;
- 2) имеют сопоставимые площади;
- 3) участки отличаются структурой землепользования, в том числе площадями, занятymi сельскохозяйственными угодьями.

В границах ключевых бассейнов произведена оценка динамики состояния почвенно-растительного покрова и сельскохозяйственной освоенности (структура землепользования, площади сельскохозяйственных угодий, содержание органического углерода в почве, фитопродукционные процессы).

Расположение ключевых речных бассейнов представлено на карте (рис. 1).

**Структура землепользования бассейна Оки.** В целом структура землепользования полного бассейна р. Оки сбалансирована по составу различных земель и на 40% представлена лесными землями, а на 50% – пахотными. За период с 2000 по 2015 г. наблюдается положительная динамика лесных земель (рост на 2%) и отрицательная динамика пастбищно-пахотных земель (снижение от -1 до -2%) (рис. 2).

Основная часть лесных массивов сосредоточена в Волжско-Клязьминской и Мещерской провинциях (63–80%).

В таблице 1 показана структура землепользования в пределах ключевых бассейнов. Бассейны, характеризующие Среднерусскую (4), Мокша-Тешинскую (8) и Окско-Донскую (5) ландшафтные провинции, на 72–85% состоят из пахотных угодий (см. табл. 1; рис. 3).

**Распределение фитопродуктивности в бассейне Оки в целом и на водосборах, образованных ее притоками.** В целом в бассейне р. Оки за период с 2000 по 2015 г. средняя многолетняя величина чистой первичной продукции составила  $37 \text{ гC}/\text{м}^2$ , а вариабельность показателя средняя ( $V = 19\%$ ). Анализ динамики позволил установить, что на фоне годовых колебаний имеется небольшой положительный

тренд чистой первичной продукции (ЧПП). Валовая первичная продукция характеризуется средним многолетним значением 57 гС/м<sup>2</sup> и отличается боль-

шой стабильностью (коэффициент вариации 14%), соответственно затраты на дыхание автотрофов уменьшаются (см. рис. 3).

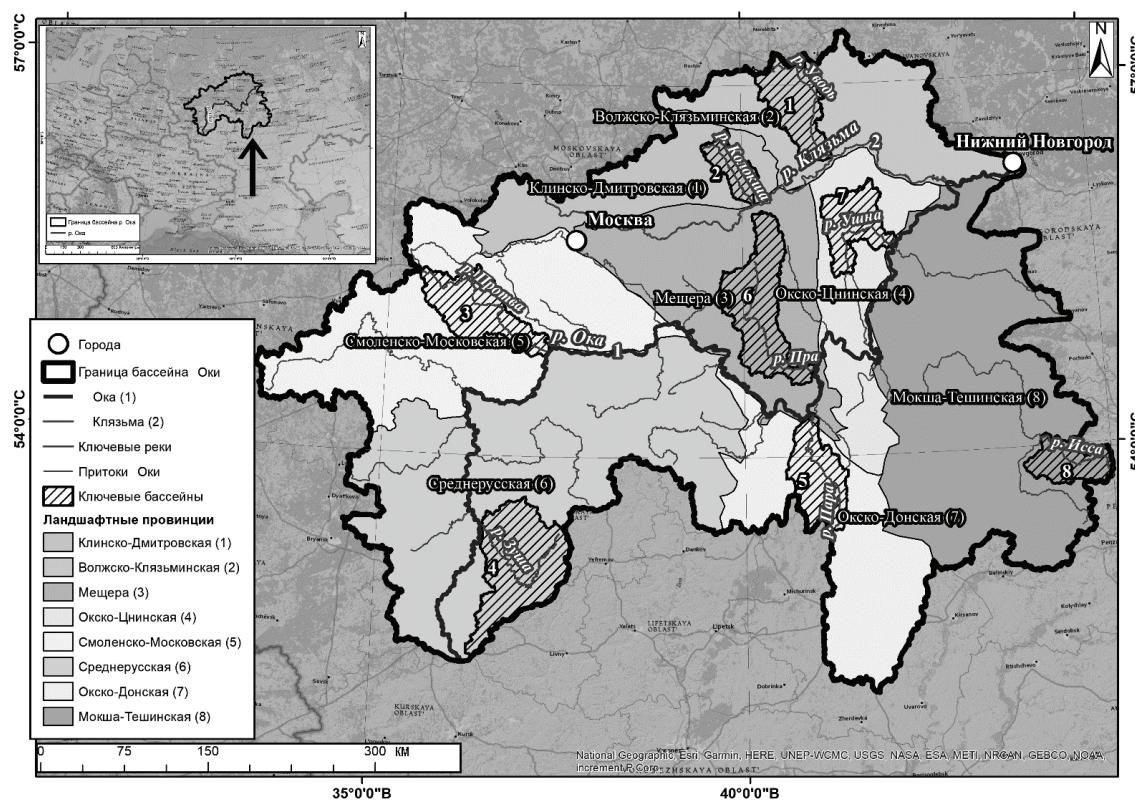


Рис. 1. Ландшафтные провинции и малые ключевые бассейны Оки:  
1 – Уводь; 2 – Колокша; 3 – Пртва; 4 – Зуша; 5 – Пара; 6 – Пра; 7 – Ушна; 8 – Иssa

Fig. 1. Landscape provinces and small key basins within the Oka River catchment area:  
1 – Uvod River; 2 – Koloksha River; 3 – Protva River; 4 – Zusha River; 5 – Para River; 6 – Pra River; 7 – Ushna River; 8 – Issa River

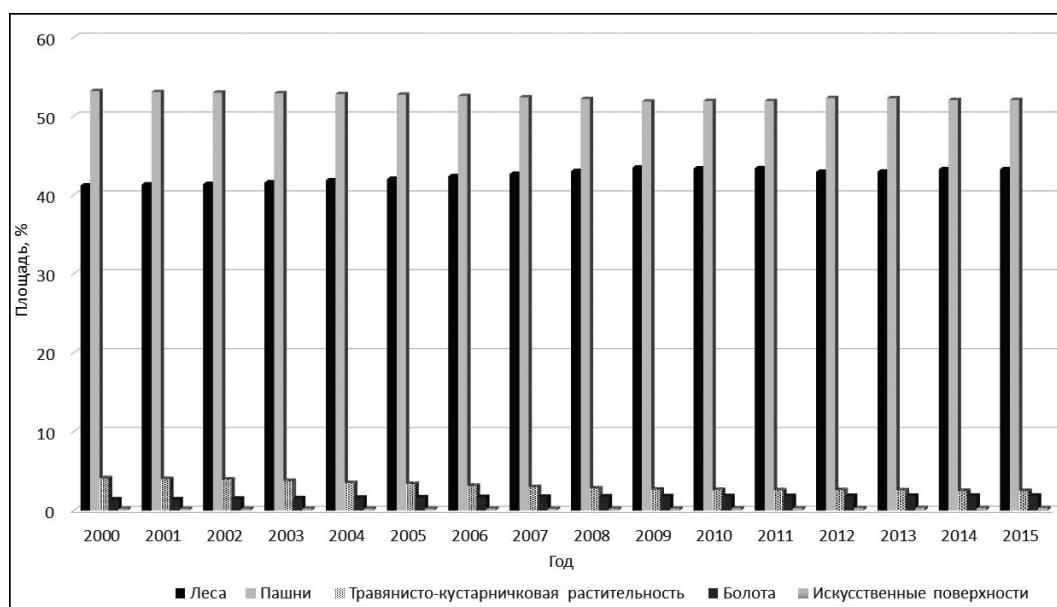


Рис. 2. Динамика структуры землепользования бассейна Оки

Fig. 2. Dynamics of the land use structure in the Oka River catchment area

Таблица 1

## Структура землепользования ключевых речных бассейнов (2015)

Ключевой бассейн	Ландшафтная провинция	Динамика земельных угодий с 2000 по 2015 г., %	Структура землепользования, %					
			Лес	Пашня	Травянисто-кустарниковая растительность	Болота	Населенные пункты	Водные объекты
<b>Речные бассейны с преобладанием лесных земель</b>								
Уводь (1)	Волжско-Клязьминская	Лес 4,9 Пашня -5,9	63	30	5	0,4	1,4	0,7
Пра (6)	Мещерская	Лес -1,5 Пашня 1,9	80	14	2	1,0	0,3	0,0
Протва (3)	Смоленско-Московская	Лес 1,0 Пашня -0,6	57	34	4	0,2	4	0,6
Ушна (7)	Окско-Цнинская	Лес 4,8 Пашня -1,9	76	23	0,9	0,4	0,4	0,1
<b>Речные бассейны с равномерным распределением типов земель</b>								
Колокша (2)	Клинско-Дмитровская	Лес 1,7 Пашня -2,1	50	45	3	0,1	1,0	0,6
<b>Речные бассейны с преобладанием пахотных земель</b>								
Зуша (4)	Среднерусская	Лес 1,5 Пашня -1,6	25	72	2	0,0	0,7	0,2
Исса (8)	Мокша-Тешинская	Лес 1,6 Пашня -1,6	13	85	2	0,0	0,3	0,2
Пара (5)	Окско-Донская	Лес -1,5 Пашня 1,9	12	85	2	0,0	1,0	0,6



Рис. 3. Динамика валовой первичной продукции и чистой первичной продукции в бассейне Оки (линии тренда обозначены сплошным цветом без маркеров)

Fig. 3. Dynamics of gross primary production and net primary production in the Oka River catchment area (trend lines are indicated by solid color without markers)

**Фитопродукционные процессы ключевых речных бассейнов.** Анализ динамики фитопродукционных процессов выполнен для восьми репрезентативных ключевых речных бассейнов, расположенных в различных ландшафтных провинциях. Графики динамики чистой первичной

продукции с линиями трендов за период с 2000 по 2015 г. для речных бассейнов, наиболее отличающихся по данному показателю, представлены на рисунке 4, а вариабельность ЧПП и средние значения продуктивности за анализируемый период – в таблице 2.

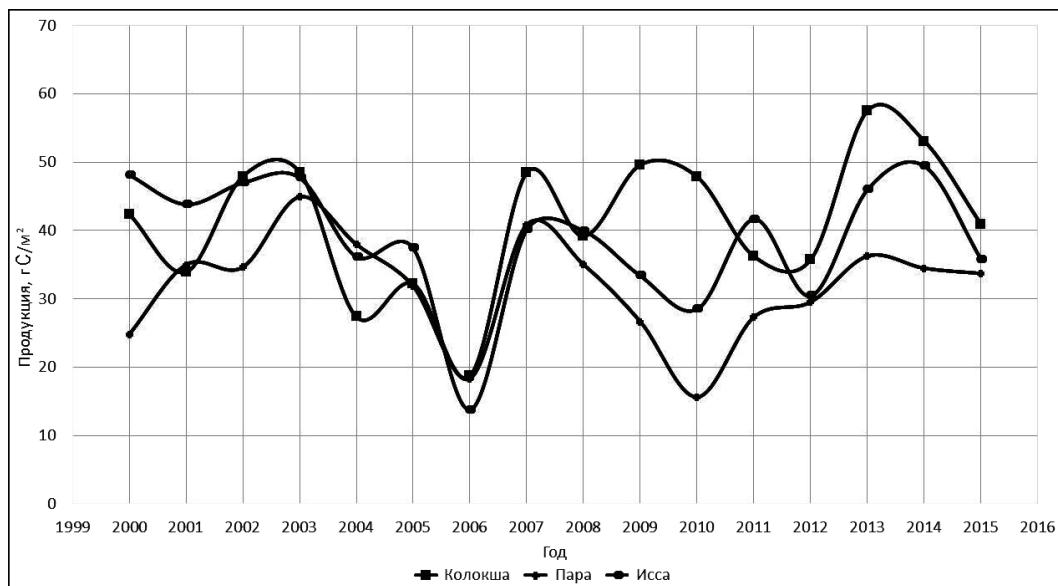


Рис. 4. Динамика чистой первичной продукции ключевых речных бассейнов и бассейна Оки с 2000 по 2015 г.

Fig. 4. Dynamics of net primary production in key river basins and the Oka River catchment area from 2000 to 2015

Таблица 2

**Фитопродуктивность бассейна Оки и ключевых речных бассейнов**

Ключевой бассейн	Ландшафтная провинция	Площадь бассейна, км <sup>2</sup>	Продуктивность, гС/м <sup>2</sup>		GPP V, %	NPP V, %
			GPP, $\bar{x} \pm \sigma$	NPP, $\bar{x} \pm \sigma$		
1. Уводь	Волжско-Клязьминская	3574	60,6±10,9	37,5±6,5	18,1	17,4
2. Колокша	Клинско-Дмитровская	1525	62,8±12,4	41,2±10,2	19,7	24,7
3. Протва	Смоленско-Московская	4479	63,2±10,9	41,2±10,7	17,3	25,9
4. Зуша	Среднерусская	6952	57,3±10,5	37,6±9,2	18,3	24,5
5. Пара	Окско-Донская	3625	51,4±8,5	31,7±7,7	16,5	24,4
6. Пра	Мещера	5611	60,2±9,2	38,9±8,7	15,3	22,2
7. Ушна	Окско-Цнинская	3041	61,7±9,8	41,2±9,5	15,9	23,0
8. Иса	Мокша-Тешинская	2322	58,6±10,9	38,9±9,5	18,7	24,5
Бассейн Оки		245 590	57,0±7,8	36,9±6,8	14,2	18,5

Примечание:  $\bar{x}$  – среднее арифметическое,  $\sigma$  – стандартное отклонение,  $V, \%$  – коэффициент вариации.

Высокие значения ЧПП ключевых бассейнов на протяжении всего анализируемого периода (2000–2015) характерны для бассейна Колокши (2), который расположен на территории Клинско-Дмитровской гряды во Владимирском ополье с самыми плодородными в этом регионе экстразональными

серыми лесными почвами. В бассейне Пары (5) Оксо-Донской провинции чистая первичная продукция самая низкая, несмотря на нахождение его в зоне плодородных оподзоленных и выщелоченных черноземов и серых лесных почв. В данном случае сказывается нехватка влаги и еще более высокая,

чем в бассейне Колокши (2), сельскохозяйственная освоенность территории. Следовательно, высокий продукционный потенциал серых лесных почв более полно реализуется в северной части бассейна, где эти почвы являются экстразональными (бассейн Колокши, участок 2). Здесь сельскохозяйственная нагрузка меньше, а климатические характеристики более благоприятны, в частности выше коэффициент увлажнения [Гавришев, 2023].

Необходимо отметить, что периоды роста и падения продуктивности в целом бассейне Оки и составляющих ее водосборах имеют различный размах, но в основном совпадают по направлениям, за исключением нескольких лет для бассейнов двух рек – Пары (5) и Иссы (8), в отдельные отрезки времени ход их кривых продуктивности существенно отличается от остальных водосборов. Резкое снижение продуктивности отмечается во всех речных бассейнах в 2006 г., а затем – рост в 2007 г. В 2010 г. происходит снижение ЧПП во всех ключевых бассейнах, но наиболее резкое падение наблюдается в бассейнах Пары (5) и Иссы (8), а в 2011 г. их продуктивность восстанавливается, тогда как в остальных бассейнах продолжает медленно снижаться.

Особенности динамики показателей продуктивности бассейнов этих двух водосборов можно объяснить высокой сельскохозяйственной нагрузкой. Около 85% площадей занято сельскохозяйственными угодьями. На лесную растительность приходятся небольшие площади. Именно антропогенная нагрузка оказывает доминирующее влияние на динамику продуктивности этих бассейнов, делая ее отличной от других бассейнов в отдельные годы.

В ключевых бассейнах, где сельскохозяйственная нагрузка средняя или невысокая, доминирующее влияние на продуктивность растений в первую очередь оказывают естественные факторы, в основном это погодные условия, изменяющиеся по годам, а также сам характер растительности.

Таким образом, в основном ход кривых динамики продуктивности речных бассейнов по годам совпадает и в целом соответствует аналогичным кривым для целого бассейна Оки. Но ежегодные изменения анализируемых показателей, являющиеся кратковременными, могут в итоге приводить к различным долговременным трендам динамики. Их анализ выполнен на следующем этапе работы.

Несмотря на отсутствие выраженного тренда в динамике показателей продуктивности всего бассейна Оки, в составляющих ее водосборах были выявлены разнонаправленные изменения, имеются речные бассейны как с трендами на рост и снижение ЧПП разной интенсивности, так и относительно стабильные.

Хорошо идентифицируются ключевые речные бассейны с четко выраженными трендами роста

ЧПП – это бассейны рек Протвы (3) и Ушны (7), находящиеся в различных ландшафтных провинциях. Бассейн Протвы (3) расположен в Смоленско-Московской провинции. Бассейн Ушны (7) представляет Окско-Цнинскую провинцию. Динамика продуктивности по годам у них совпадает, показатели продуктивности относительно высокие. В обоих бассейнах и ландшафтах, которые они представляют, преобладающий тип почвы дерново-подзолистый, большие площади заняты лесами.

Негативная долговременная тенденция выраженного снижения чистой продуктивности выявлена в двух ключевых бассейнах. Первый участок (ключевой участок № 8, бассейн Иссы) приурочен к Мокша-Тешинской провинции, где почвенный покров представлен дерново-подзолистыми почвами левобережья, а на правобережье преобладают светло-серые и серые лесные почвы. Второй (ключевой участок № 5, бассейн реки Пары) находится в Окско-Донской провинции, где значительные площади заняты черноземами. Таким образом, оба речных бассейна характеризуются преобладанием в почвенном покрове высокоплодородных почв, количество лесов небольшое. Их территория относится к самым сельскохозяйственно освоенным в регионе, показатели образования ЧПП низкие, тренды динамики указывают на то, что падение продуктивности будет продолжаться, чего нет ни в одном другом ключевом бассейне. По комплексу параметров можно сделать вывод, что в бассейнах рек Иссы (8) и Пары (5) складывается наиболее неблагоприятная экологическая ситуация. Антропогенная нагрузка на эти бассейны превысила максимально допустимую, о чем свидетельствуют тренды на снижение продуктивности в период 2000–2015 г. Но в бассейне реки Пары (участок 5) базовый уровень чистой первичной продукции ниже, чем в ключевом бассейне Иссы, и самый низкий среди анализируемых. Следовательно, именно на ключевом участке 5 складывается самая опасная экологическая ситуация.

В остальных ключевых бассейнах показатели чистой первичной продукции имеют линии трендов, направленные на незначительное повышение или близкие к нулевым, что свидетельствует о нормальном протекании фитопродукционных процессов.

Проведено сравнение стабильности производственных процессов малых речных бассейнов и экосистемы целого бассейна по полученным значениям вариабельности (см. табл. 2). В крупном речном бассейне реки Оки показатели варьируют меньше, и в целом он оказывается более стабильным. Следовательно, разнонаправленные процессы в различных внутренних бассейнах, отличающихся ландшафтной структурой и сельскохозяйственной освоенностью, в целом бассейне уравновешиваются.

**Анализ содержания почвенного углерода (2000–2015).** В бассейне Оки за анализируемый период содержание органического углерода в почве немножко увеличилось (на 13 т/км<sup>2</sup>) (табл. 3).

Органический углерод почвы распределяется неравномерно в ключевых бассейнах различных ландшафтных провинций. В целом в наибольшем количестве речных бассейнов наблюдается положительная динамика почвенного углерода, либо нейтральный баланс (участок 3, бассейн р. Протвы). В бассейне р. Пары (5) Окско-Донской провинции отмечен максимальный положительный прирост почвенного углерода (246 т/км<sup>2</sup>). В этом бассейне расположены плодородные выщелоченные и типичные черноземы с высоким содержанием гумуса. Но, несмотря на рост показателей почвенного углерода, здесь выявлена тенденция снижения чистой первичной продукции на фоне самых низких ее

значений. Это во многом может быть связано с высоким фитопродукции с сельхозпродукцией (сельскохозяйственная освоенность здесь одна из самых высоких в бассейне Оки), а естественные экосистемы не в состоянии ее восполнить, в результате во всем бассейне снижается анализируемый показатель. Данная тенденция является неблагоприятной для экосистемы бассейна в целом.

В бассейне р. Уводи (1) Волжско-Клязьминской провинции содержание почвенного углерода фиксируется на высоком уровне (235 т/км<sup>2</sup>) и отмечается его накопление, связанное с увеличением площадей болот и лесов за счет уменьшения пахотных угодий.

Бассейн р. Пры (6) Мещерской ландшафтной провинции характеризуется отрицательной динамикой почвенного углерода (-104 т/км<sup>2</sup>), что связано с сокращением лесов в результате интенсивной вырубки (см. табл. 1, 3).

Таблица 3

#### Показатели органического углерода почвы для ключевых бассейнов (2000–2015)

Ключевой бассейн	Ландшафтная провинция	Баланс органического углерода почв	
		C <sub>опр.</sub> , т/км <sup>2</sup>	Δ, %
1. Уводь	Волжско-Клязьминская	235,5	1,7 (рост)
2. Колокша	Клинско-Дмитровская	32,3	0,2 (рост)
3. Протва	Смоленско-Московская	5,8	0,0 (нулевой)
4. Зуша	Среднерусская	30,7	0,2 (рост)
5. Пара	Окско-Донская	246,1	1,5 (рост)
6. Пра	Мещера	-104,2	-0,5 (убыль)
7. Ушна	Окско-Цинская	117,1	0,7 (рост)
8. Иссы	Мокша-Тешинская	41,8	0,3 (рост)
Бассейн Оки		13,1	0,1 (рост)

#### ВЫВОДЫ

Экосистемные процессы в различных природно-антропогенных ландшафтах бассейна Оки различаются по динамике структуры землепользования, содержанию органического углерода почвы, показателям фитопродуктивности.

В целом в бассейне р. Оки за период с 2000 по 2015 г. средняя многолетняя величина чистой первичной продукции составила 36,9 гС/м<sup>2</sup>, а вариабельность показателя средняя ( $V = 19\%$ ). При этом показатели ЧПП в ключевых бассейнах изменяются от 31,7 и до 41 гС/м<sup>2</sup>. В целом в бассейне Оки выявлено отсутствие выраженного направления в динамике показателя ВПП, небольшой положительный тренд ЧПП. В составляющих ее малых водосборах были установлены разнонаправленные изменения. Долговременные тренды роста чистой первичной продукции имеют место в бассейнах Прот-

ты (3) (Смоленско-Московская возвышенность) и Ушны (7) (Окско-Цинская провинция). Устойчивые тренды на снижение показателя чистой первичной продукции выявлены в бассейнах Иссы (8) и Пары (5), которые объясняются по большей части самими высокими показателями сельскохозяйственной освоенности (85% земель распахано) и свидетельствуют о неблагоприятной экологической ситуации на данном участке бассейна Оки.

Следовательно, наиболее благоприятные долговременные тенденции для роста продуктивности характерны для бассейна Протвы (3) (Смоленско-Московской провинции), где они соответствуют максимальным в бассейне Оки показателям продуктивности. Основной вклад в производственный процесс здесь вносят лесные массивы.

Анализ органического углерода почвы не выявил негативных тенденций. В большинстве ключе-

вых бассейнов его содержание стабильно или имеются незначительные изменения. Значимый рост органического углерода почвы отмечен только на самых плодородных в регионе выщелоченных и типичных черноземах ключевого бассейна р. Пары (5) и в бассейне р. Уводи (1), где его рост обеспечивают увеличивающиеся площади лесных земель и болот. На примере ключевых бассейнов показано, что периоды повышения и снижения продукции в разных ландшафтах в основном совпадают. Однако размах этих изменений по годам различен. Выявленные кратковременные колебания показателей продуктивности формируют в итоге различные долговременные тренды динамики. Характер землепользования часто является главенствующим фактором при формировании почвенно-продукционного потенциала территории и его долговременных трендов.

Самая нестабильная и напряженная ситуация складывается в бассейне р. Пары (5), который представляет Окско-Донскую провинцию. Плодородные черноземы обеспечивают здесь рост органического углерода почвы, но по причине чрезмерной сельскохозяйственной нагрузки чистая первичная продукция экосистемы целого бассейна самая низкая и имеет выраженный тренд на снижение.

Различные бассейны, образованные притоками р. Оки, имеют принципиально одинаковую геоморфологическую структурную организацию, но с точки зрения продукционных процессов различаются, что определяется в первую очередь ландшафтной принадлежностью. В результате в малых речных бассейнах различных ландшафтных провинций от-

мечаются как общие закономерности динамики фитопродуктивных процессов, так и различия. Однако в границах крупного водосборного бассейна Оки как единой экосистемы эти различия нивелируют, что свидетельствует о том, что масштаб исследования влияет на точность и достоверность получаемых результатов. Недостаточная продуктивность одних территорий компенсируется ростом производительности соседних, следовательно, сохранение ландшафтного разнообразия является необходимым условием сохранения стабильности функционирования водосборного бассейна р. Оки.

В дальнейшем предполагается продолжить исследование в направлении выявления взаимосвязей производственных процессов с гидрографическими параметрами и динамикой погодных условий. Полученные результаты позволят акцентировать внимание на локализации негативных процессов при организации экологического мониторинга.

Предложено для интегральной оценки почвенно-растительного покрова бассейна Оки по дистанционным данным использовать несколько уровней оценки в зависимости от целей исследования.

Таким образом, нами показано, что для интегральной оценки обширных речных бассейнов необходимо использовать несколько уровней оценки в зависимости от целей исследования. Первый уровень – оценка параметров функционирования целого бассейна. Второй – анализ «вложенных» ландшафтов и бассейнов, позволяющий учесть разнонаправленные процессы внутри единой системой.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-20017, <https://rscf.ru/project/25-17-20017/>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богданова М.Д., Герасимова М.И., Горбунова И.А. и др. Ландшафтно-геохимическое исследование бассейна р. Селенги // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 3. С. 82–89.
- Васильев О.Д. Картографирование средообразующих функций лесов и их сравнительный анализ в ландшафтах Московской области // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 6. С. 21–31.
- Герасимова М.И., Касимов Н.С., Горбунова И.А. и др. Ландшафтно-геохимическое районирование бассейна Селенги // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2014. № 6. С. 66–72.
- Дьяконов К.Н., Байбар А.С., Харитонова Т.И. Внутриклевовая динамика эффективности использования лесами Мещеры фотосинтетически активной радиации // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 5. С. 12–23.
- Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Уланова С.С. и др. Наземные и спутниковые исследования продуктивности пастбищ Республики Калмыкия с различной степенью деградации растительных сообществ // Аридные экосистемы. 2013. № 4(57). С. 31–39.
- Тишков А.А., Белоновская Е.А., Кренке А.Н. и др. Изменение биологической продуктивности наземных экосистем российской Арктики в XXI в. // Арктика: экология и экономика. 2021. № 1(11). С. 30–41.
- Трифонова Т.А., Мищенко Н.В. Почвенно-продукционный потенциал экосистем речных бассейнов на основе наземных и дистанционных данных. М.: ГЕОС, 2013. 272 с.
- Трифонова Т.А. Развитие бассейнового подхода в почвенных и экологических исследованиях // Почвоведение. 2005. № 9. С. 1054–1061.
- Хорошев А.В. Ландшафтные условия стабильности фитопродукционного функционирования в Айтуарской степи (Южный Урал) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 2 С. 82–91, DOI: 911.2(470.56).

- Bin S., Zengyuan L., Wentao G. et al.* Identification and assessment of the factors driving vegetation degradation, regeneration in drylands using synthetic high spatiotemporal remote sensing Data – a case study in Zhenglanqi, Inner Mongolia, China, *Ecological Indicators*, 2019, vol. 107, p. 1–16.
- Chen Y., Shen W., Gao S. et al.* Estimating deciduous broadleaf forest gross primary productivity by remote sensing data using a random forest regression model, *Journal of Applied Remote Sensing*, 2019, vol. 13, no. 3, p. 1–17.
- Chen A., Hao Z., Wang R. et al.* Cultivated Land Sustainable Use Evaluation from the Perspective of the Water – Land – Energy – Food Nexus: A Case Study of the Major Grain-Producing Regions in Quzhou, China, *Agronomy*, 2023, vol. 13, p. 2362, DOI: 10.3390/agronomy13092362.
- Dedeoglu M., Basayigit L., Yuksel M. et al.* Assessment of the vegetation indices on Sentinel-2A images for predicting the soil productivity potential in Bursa, Turkey, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, vol. 192(1), p. 1–19.
- Dong J., Metternicht G., Hostert P. et al.* Remote sensing and geospatial technologies in support of a normative land system science: status and prospects, *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 2019, vol. 38, p. 44–52, DOI: 10.1016/j.cosust.2019.05.003.
- Hashimoto H., Wang W., Milesi C. et al.* Exploring simple algorithms for estimating gross primary production in forested areas from satellite data, *Remote Sens.*, 2012, no. 4, p. 303–326.
- Liu W., Yuan Y., Li Y. et al.* Net Primary Productivity Estimation Using a Modified MOD17A3 Model in the Three-River Headwaters Region, *Agronomy*, 2023, vol. 13, p. 431, DOI: 10.3390/agronomy13020431.
- Menichetti L.* Consequences of planned afforestation versus natural forest regrowth after disturbance for soil C stocks in Eastern European mountains, *Geoderma*, 2017, vol. 297, p. 19–27.
- Nabiollahi K., Shahlaee S., Zahedi S. et al.* Land Use and Soil Organic Carbon Stocks – Change Detection over Time Using Digital Soil Assessment: A Case Study from Kamyaran Region, Iran (1988–2018), *Agronomy*, 2021, vol. 11, p. 597, DOI: 10.3390/agronomy11030597.
- National Atlas of Soils of the Russian Federation*, Moscow, Astrel, AST Publ., 2011, 632 p.
- Prince S.D.* Challenges for remote sensing of the Sustainable Development Goal SDG 15.3.1 productivity indicator, *Remote Sensing of Environment*, 2019, vol. 234, p. 1–7.
- Robinson N.P., Allred B.W., Smith W.K. et al.* Terrestrial primary production for the conterminous United States derived from Landsat 30 m and MODIS 250 m, *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2018, vol. 4, no. 3, p. 264–280.
- Turner D.P., Rifts W.D., Cohen W.B. et al.* Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes, *Remote Sens.*, 2006, vol. 102, p. 282–292, DOI: 10.1016/J.RSE.2006.02.017.
- Vagge I., Chiaffarelli G.* Validating the Contribution of Nature-Based Farming Solutions (NBFS) to Agrobiodiversity Values through a Multi-Scale Landscape Approach, *Agronomy*, 2023, vol. 13, 233, DOI: 10.3390/agronomy13010233.
- Varghese R., Behera M.D.* Annual and seasonal variations in gross primary productivity across the agro-climatic regions in India, *Environmental monitoring and assessment*, 2019, vol. 191, no. 4, p. 1–19.
- Wang M.M., He G.J., Ishwaran N. et al.* Monitoring vegetation dynamics in East Rennell Island World Heritage Site using multi-sensor and multi-temporal remote sensing data, *International Journal of Digital Earth*, 2020, vol. 3, p. 393–409.
- Werf van der G.R., Morton D.C., DeFries R.S. et al.* CO<sub>2</sub> emissions from forest loss, *Nature Geosci.*, 2009, vol. 2, p. 737–738, DOI: 10.1038/NGE0671.
- Wu C., Niu Z., Gao S.* Gross primary production estimation from MODIS data with vegetation index and photosynthetically active radiation in maize, *J. Geophys. Res.*, 2010, vol. 115, p. 1212–1225, DOI: 10.1029/2009JD013023.
- Zhang M., Zeng Y.* Fusion of high spatial and temporal resolution data to estimate vegetation net primary productivity, *Journal of Remote Sensing*, 2018, vol. 22, no. 1, p. 143–152.

#### Электронный ресурс

Гавришев А.Н. База данных climate-energy // Температура воздуха и характеристики. URL: <https://climate-energy.ru> (дата обращения 02.09.2023).

Поступила в редакцию 15.07.2025

После доработки 10.08.2025

Принята к публикации 28.08.2025

## STATE OF THE SOIL AND VEGETATION COVER WITHIN THE OKA RIVER BASIN

**T.A. Trifonova<sup>1</sup>, N.V. Mishchenko<sup>2</sup>, P.S. Shutov<sup>3</sup>, E.P. Bykova<sup>4</sup>**

<sup>1,4</sup>*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science*

<sup>2,3</sup>*Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov, Institute of Biology and Ecology*

<sup>1</sup>*Prof., D.Sc. in Biology; e-mail: tatrifon@mail.ru*

<sup>2</sup>*Prof., D.Sc. in Biology; e-mail: natmich3@mail.ru*

<sup>3</sup>*Junior Scientific Researcher; e-mail: pav.shutov59@mail.ru*

<sup>4</sup>*Senior Scientific Researcher; Ph.D. in Biology; e-mail: elebyk2008@rambler.ru*

The study was carried out within the Oka River catchment area (245 thousand km<sup>2</sup>). The catchment area is located in the European part of the Russian Federation and belongs to the Volga River basin. Based on the analysis of remote sensing data, the dynamics of soil production processes and the structure of land use within the basin are considered. Natural complex of the Oka River basin is a complicated mosaic of different landscapes, each having a diverse combination of geomorphologic and soil-vegetation complexes. To assess the state of landscapes, the catchment basins of tributaries, which are completely included in each specific landscape, are identified as key areas and the land use structure is described for each of them. According to Modis primary productivity – v 6.1 data and using the ArcGIS 10.8 software, phyt生产力 indicators (in carbon units) were calculated for each basin for the peak of the growing season (mid-July) during 2000–2015. The organic carbon reserve of the soil in the Oka River basin was evaluated. The trend of the dynamics of net and gross primary production and the reserve of organic carbon of soils is analyzed for the key river basins of the Oka River catchment area located in different landscape provinces. It has been established that the periods of production increase and decrease in different landscapes generally coincide, however, the scope of these changes and the stability of productivity indicators differ. It is shown that the size and structure of land use significantly affect the indicators of phytoproduction of landscapes. The main trends in the dynamics of net primary production in small river basins and the whole Oka River basin have been identified. It is shown that several levels of assessment, depending on the objectives of the study, are necessary for the integral assessment of extensive river basins. The first level is the assessment of the parameters for the functioning of the whole basin. The second level is the analysis of imbedded landscapes and basins, which makes it possible to take into account multi-directional processes within an integral water catchment system. In this case, we propose to consider the key areas which are smaller representative river basins.

**Keywords:** landscape approach, Modis remote sensing data, vegetation indices, gross and net primary production of ecosystems, dynamics of soil production processes

**Acknowledgements.** The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 25-17-20017, <https://rscf.ru/project/25-17-20017/>).

### REFERENCES

- Bin S., Zengyuan L., Wentao G. et al. Identification and assessment of the factors driving vegetation degradation, regeneration in drylands using synthetic high spatiotemporal remote sensing Data – a case study in Zhenglanqi, Inner Mongolia, China, *Ecological Indicators*, 2019, vol. 107, p. 1–16.
- Bogdanova M.D., Gerasimova M.I., Gorbunova I.A. et al. Landshaftno-geokhimicheskoe issledovanie bassejna r. Selenga [Landscape-geochemical studies in the Selenga River basin], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 3, p. 82–89. (In Russian)
- Chen A., Hao Z., Wang R. et al. Cultivated Land Sustainable Use Evaluation from the Perspective of the Water – Land – Energy – Food Nexus: A Case Study of the Major Grain-Producing Regions in Quzhou, China, *Agronomy*, 2023, vol. 13, p. 2362, <https://doi.org/10.3390/agronomy13092362>.
- Chen Y., Shen W., Gao S. et al. Estimating deciduous broadleaf forest gross primary productivity by remote sensing data using a random forest regression model, *Journal of Applied Remote Sensing*, 2019, vol. 13, no. 3, p. 1–17.
- Dedeoglu M., Basayigit L., Yuksel M. et al. Assessment of the vegetation indices on Sentinel-2A images for predicting the soil productivity potential in Bursa, Turkey, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, vol. 192(1), p. 1–19.
- Diakonov K.N., Bajbar A.S., Kharitonova T.I. Vnutrивековая dinamika effektivnosti ispol'zovaniya lesami Meshcheri fotosinteticheski aktivnoj radiacii [Interdecadal dynamics of the efficiency of photosynthetically active radiation utilization in the forests of Meschera], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2017, no. 5, p. 12–23. (In Russian)
- Dong J., Metternicht G., Hostert P. et al. Remote sensing and geospatial technologies in support of a normative land system science: status and prospects, *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 2019, vol. 38, p. 44–52, DOI: 10.1016/j.cosust.2019.05.003.

- Gerasimova M.I., Kasimov N.S., Gorbunova I.A. et al. Landshaftno-geokhimicheskoe rajonirovanie bassejna Selengi [Landscape-geochemical regionalization of the Selenga River basin], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2014, no. 6, p. 66–72. (In Russian)
- Hashimoto H., Wang W., Milesi C. et al. Exploring simple algorithms for estimating gross primary production in forested areas from satellite data, *Remote Sens.*, 2012, no. 4, p. 303–326.
- Khoroshev A.V. Landshaftnye usloviya stabil'nosti fitoproduktionskogo funktsionirovaniya v Ajtuarskoj stepi (Yuzhnyj Ural) [Landscape conditions of stable phytoproduction in the Aituar steppe (the Southern Urals)], *Lomonosov Geography Journal*, 2021, no. 2, p. 82–91, DOI: 911.2(470.56). (In Russian)
- Liu W., Yuan Y., Li Y. et al. Net Primary Productivity Estimation Using a Modified MOD17A3 Model in the Three-River Headwaters Region, *Agronomy*, 2023, vol. 13, p. 431, DOI: 10.3390/agronomy13020431.
- Menichetti L. Consequences of planned afforestation versus natural forest regrowth after disturbance for soil C stocks in Eastern European mountains, *Geoderma*, 2017, vol. 297, p. 19–27.
- Nabiollahi K., Shahlaee S., Zahedi S. et al. Land Use and Soil Organic Carbon Stocks – Change Detection over Time Using Digital Soil Assessment: A Case Study from Kamyaran Region, Iran (1988–2018), *Agronomy*, 2021, vol. 11, p. 597, DOI: 10.3390/agronomy11030597.
- National Atlas of Soils of the Russian Federation*, Moscow, Astrel, AST Publ., 2011, 632 p.
- Prince S.D. Challenges for remote sensing of the Sustainable Development Goal SDG 15.3.1 productivity indicator, *Remote Sensing of Environment*, 2019, vol. 234, p. 1–7.
- Robinson N.P., Allred B.W., Smith W.K. et al. Terrestrial primary production for the conterminous United States derived from Landsat 30 m and MODIS 250 m, *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2018, vol. 4, no. 3, p. 264–280.
- Tishkov A.A., Belonovskaya E.A., Krenke A.N. et al. Izmeneniya biologicheskoy produktivnosti nazemnyh ekosistem rossijskoy Arktiki v XXI v. [Changes in the biological productivity of the Russian Arctic land ecosystems in the 21st century], *Arctic: ecology and economics*, 2021, no. 1(11), p. 30–41, DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-31-44. (In Russian)
- Trifonova T.A. Development of a basin approach in pedological and ecological studies, *Eurasian Soil Science*, 2005, no. 9, p. 931–937.
- Trifonova T.A., Mishchenko N.V. Pochvenno-produktsionnyj potentsial ekosistem rechnyh bassejnov na osnove nazemnyh i distantsionnyh dannyh [Soil-productive potential of river basin ecosystems based on terrestrial and remote data], Moscow, Geos Publ., 2013, 272 p. (In Russian)
- Turner D.P., Rifts W.D., Cohen W.B. et al. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes, *Remote Sens.*, 2006, vol. 102, p. 282–292, DOI: 10.1016/J.RSE.2006.02.017.
- Vagge I., Chiaffarelli G. Validating the Contribution of Nature-Based Farming Solutions (NBFS) to Agrobiodiversity Values through a Multi-Scale Landscape Approach, *Agronomy*, 2023, 13, 233, DOI: 10.3390/agronomy13010233.
- Varghese R., Behera M.D. Annual and seasonal variations in gross primary productivity across the agro-climatic regions in India, *Environmental monitoring and assessment*, 2019, vol. 191, no. 4, p. 1–19.
- Vasilyev O.D. Kartografirovaniye sredoobrazuyushchih funkciy lesov i ih sravnitel'nyj analiz v landshaftakh Moskovskoj oblasti [Mapping of environment-forming functions of forests and their comparative analysis in the landscapes of the Moscow region], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 6, p. 21–31. (In Russian)
- Wang M.M., He G.J., Ishwaran N. et al. Monitoring vegetation dynamics in East Rennell Island World Heritage Site using multi-sensor and multi-temporal remote sensing data, *International Journal of Digital Earth*, 2020, vol. 3, p. 393–409.
- Werf van der G.R., Morton D.C., DeFries R.S. et al. CO<sub>2</sub> emissions from forest loss, *Nature Geosci.*, 2009, vol. 2, p. 737–738, DOI: 10.1038/NGE0671.
- Wu C., Niu Z., Gao S. Gross primary production estimation from MODIS data with vegetation index and photosynthetically active radiation in maize, *J. Geophys. Res.*, 2010, vol. 115, p. 1212–1225, DOI: 10.1029/2009JD013023.
- Zhang M., Zeng Y. Fusion of high spatial and temporal resolution data to estimate vegetation net primary productivity, *Journal of Remote Sensing*, 2018, vol. 22, no. 1, p. 143–152.
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Ulanova S.S. et al. Ground-based and satellite investigation of production of pastures in Kalmykia that vary in degree of vegetation degradation, *Arid Ecosystems*, 2013, no. 4(57), p. 212–219, DOI: 10.1134/S2079096113040136.

#### Web source

Gavrishev A.N. Baza dannyh climate-energy [Climate-energy database], Air temperature and characteristics, URL: <https://climate-energy.ru/> (accessed 02.09.2023). (In Russian)

Received 15.07.2025

Revised 10.08.2025

Accepted 28.08.2025