

## Оценка состояния почвенно-растительного покрова бассейна реки на основе данных дистанционного зондирования

© 2024. П. С. Шутов<sup>1</sup>, эколог,

Т. А. Трифонова<sup>1,2</sup>, д. б. н., зав. кафедрой, профессор,

Н. В. Мищенко<sup>1</sup>, д. б. н., профессор,

<sup>1</sup>Владимирский государственный университет

имени А. Г. и Н. Г. Столетовых,

600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,

119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12,

e-mail: pav.shutov59@mail.ru, natmich3@mail.ru, tatrifon@mail.ru

Целью данной работы явилось обобщение исследований, посвящённых оценке почвенно-растительного покрова речного бассейна на примере водосбора реки Клязьма с использованием дистанционных данных за 17-летний период. В работе применяли космические снимки с различным пространственным разрешением: данные аппаратуры MODIS/Terra+Aqua Land Cover Land Cover, «Landsat» ЕТМ+ и «Метеор». Оценка динамики структуры землепользования бассейна р. Клязьмы в целом, а также по отдельным ландшафтам за исследуемый период по данным MODIS показала, что тенденция к увеличению площади лесной растительности (прирост около 9%) и сокращению пахотных угодий и пастбищ является общей для большей части бассейна. Исключение составляет междуречье р. Лух, где отмечается уменьшение лесных земель и переход их в заболоченные территории. Показано, что различные ландшафты бассейна р. Клязьмы отличаются как скоростью, так и интенсивностью накопления органического вещества в виде выработки валовой и чистой первичной продукции и по-разному реагируют на климатические изменения и смену землепользования. Однако единая экосистема целого речного бассейна демонстрирует большую стабильность по сравнению с составляющими его ландшафтами. Дистанционные данные позволили установить, что глубокая долина р. Рпень (приток Клязьмы) формирует воздушный поток, выносящий атмосферное загрязнение из промышленной зоны г. Владимира.

**Ключевые слова:** бассейновый подход, дистанционное зондирование, структура землепользования, фитопродуктивность, экологический мониторинг.

## Assessment of the soil and vegetation cover condition of the river basin based on remote sensing data

© 2024. P. S. Shutov<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-1835-2939<sup>2</sup>

T. A. Trifonova<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-1628-9430<sup>2</sup> N. V. Mishchenko<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-3643-3129<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov,

87, Gorkogo St., Vladimir, Russia, 600000,

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University,

1, Leninskiye gory, Moscow, Russia, 119991,

e-mail: pav.shutov59@mail.ru, natmich3@mail.ru, tatrifon@mail.ru

The aim of this work was to summarize the studies devoted to the soil and vegetation cover assessment of the river basin on the example of the Klyazma River catchment using remote data for a 17-year period. The remote data from the MODIS/Terra+Aqua Land Cover Land Cover, Landsat ЕТМ+ and Meteor with different spatial resolutions were used in the work. The assessment of land use structure dynamics was carried out for the Klyazma River basin as a whole, as well as for individual landscapes. According to MODIS data there is a common trend towards an increase (about 9%) in the area of forest vegetation and a decrease in arable land and pastures for most of the basin. The exception is the interfluvium of the Luch River, where there is a decrease in forest lands and their transition to wetlands. Different landscapes of the Klyazma Rivers basin vary in both the rate and intensity of organic matter accumulation in the form of gross and net primary production as well as respond differently to climatic changes and land use change. However, the unified ecosystem of an entire river basin is more stable compared to its constituent landscapes. The remote sensing data allowed us to establish that the deep valley of the Rpen River (a tributary of the Klyazma River) forms an air flow that carries atmospheric pollution out of the Vladimir industrial zone.

**Keywords:** basin approach, remote sensing, land use structure, phytproductivity, ecological monitoring.

Важным аспектом оценки экологического состояния природно-антропогенных объектов всегда является вопрос определения территориальных единиц для проведения исследований. Основными типами геопространства в биосфере являются речные бассейны и природные зоны. Природные зоны могут по-разному трактоваться исследователями и не иметь чётких границ в связи с наличием переходных зон [4]. Водосборы имеют полужамкнутый способ организации с чётко выраженными границами. Ведущую системообразующую роль здесь играет речной сток, он формирует экосистему речного бассейна через распределение водных ресурсов, особенности рельефа и микроклимата, тем самым влияя на почвенный покров и растительность [2, 3].

Следовательно, речные бассейны можно принять за основные территориальные единицы, в границах которых целесообразно изучать продукционные процессы, а также их взаимосвязи с различными факторами. Фитопродуктивность принято считать важнейшей характеристикой устойчивости экосистем, играющей незаменимую роль в сохранении биоразнообразия. Материалы многозонального дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) получают всё большее применение для исследования почвенно-растительного покрова. Они дают возможность оперативно и объективно проводить экологический мониторинг и экстраполировать результаты полевых работ [4, 5].

Большую популярность приобретают модели, позволяющие оценить продуктивность экосистем по ряду индексов, рассчитываемых по дистанционным данным. К наиболее распространённым относятся NDVI – нормализованный разностный вегетационный индекс, EVI – усовершенствованный вегетационный индекс, LAI – индекс листовой поверхности, FPAR – индекс поглощённой фотосинтетической активной радиации. В настоящее время для изучения углеродного цикла, связанного с наземными экосистемами, всё чаще используются открытые глобальные данные MODIS о валовой первичной продуктивности – GPP [6–10].

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 даёт сопоставимые результаты при проведении

сравнительных оценок различных ландшафтов на протяжении длительного времени [11, 12]. Кроме того, получение динамичных рядов данных наземными методами является очень трудоёмким. Использование дистанционных данных в этих случаях является предпочтительным и имеет много преимуществ [13, 14].

Обработка космических снимков позволяет проследить долговременные временные ряды различных характеристик почвенно-растительного покрова. В настоящее время набор дистанционных продуктов, предназначенных для этого, очень разнообразен и постоянно обновляется, он предоставляет исследователям обширную информацию [9], но возникает необходимость разработки подходов к их эколого-ландшафтной интерпретации и использованию. Следовательно, исследования характеристик почвенно-растительного компонента ландшафтов должны идти параллельно с разработкой методов использования данных ДЗЗ и выбором наиболее объективных и информативных дистанционных продуктов.

Целью данной работы явилось обобщение исследований, посвящённых оценке почвенно-растительного покрова речного бассейна на примере водосбора реки Клязьмы с использованием дистанционных данных за 17-летний период.

### Объекты и методы исследования

Объектом исследования явился крупный бассейн р. Клязьмы, занимающий площадь 42,5 тыс. км<sup>2</sup> и включающий в разных пропорциях территории 5 областей. Его описание дано в Экологическом атласе, в котором на основе бассейновой концепции собрана и проанализирована географическая, картографическая, экологическая и историко-ландшафтная информация для бассейна р. Клязьмы [15].

Для оценки состояния почвенно-растительного покрова были использованы следующие материалы и методы:

Векторизация речной сети и определение границ водоразделов проведены на основе цифровой модели рельефа (ЦМР).

Для оценки структуры землепользования бассейна р. Клязьмы использовали дистанционные материалы с различным пространственным разрешением.

Данные аппаратуры MODIS/Terra+ Aqua Land Cover Land Cover (HDF растры, пространственное разрешение 500 м), которые содержат классификацию типов земной поверх-

ности согласно Международной Геосферно-биосферной программы (10 классов), обработка осуществлялась в программе ARC GIS, модуль Spatial Analyst [16].

Система деградации земель «Trend.Earth» (модуль «Наземный покров», European Space Agency 2015, пространственное разрешение данных 300 м), реализованная по средствам свободной ГИС с открытым кодом – Quantum GIS [17].

«Landsat» ETM+, использованы 4 спектральных канала, пространственное разрешение 30 м (синий (0,45–0,52 мкм), зелёный (0,52–0,60 мкм), красный (0,63–0,69 мкм), ближний ИК (0,76–0,90 мкм)); «Метеор», аппаратура МСУ-Э, пространственное разрешение 45 м, 3 спектральных канала (зелёный (0,5–0,6 мкм), красный (0,6–0,7 мкм), ближний ИК – (0,8–0,9 мкм)). Обработка их осуществлялась в программе Erdas Imagine с использованием различных методов (например, на основе спектрально-отражательных характеристик объектов).

Вегетационные индексы рассчитывали с использованием следующих дистанционных данных: «Landsat» ETM+ (каналы: красный (0,63–0,69 мкм), ближний ИК (0,76–0,90 мкм)) и «Метеор», аппаратура МСУ-Э – применяли для определения NDVI; продукты MODIS/Terra+Aqua применяли для определения индексов LAI, FPAR и NDVI [19].

Фитопродуктивность экосистем оценивали в углеродных единицах с использованием продуктов Modis GPP/NPP.

Математическая обработка данных, двухфакторный дисперсионный анализ ANOVA произведены с использованием Microsoft Excel и STATISTICA 10.

## Результаты и обсуждение

### Анализ структуры землепользования.

Структуру землепользования малых речных бассейнов р. Клязьмы анализировали за различные временные периоды с использованием дистанционных данных «Landsat» ETM+. Для идентификации природно-антропогенных объектов применяли анализ спектральных кривых отражений, проводили анализ преобразований спектральных яркостей.

Оценка динамики структуры землепользования бассейна р. Клязьмы в целом, а также по отдельным ландшафтам за период с 2001 по 2017 гг. по данным MODIS выявила тенденцию к росту площадей, занятых лесной растительностью (прирост около 9%), и уменьшению

доли пахотных угодий и пастбищ (рис. 1). Указанные тренды характерны для основной части бассейна. Исключение составляет междуречье р. Лух, здесь происходит рост заболоченных территорий и сокращаются площади лесов. Наиболее устойчивой является структура земельных угодий в Мещерской провинции, где почти 90% территории занято лесами, и их площади изменились незначительно. Динамика зарастания пахотных угодий, расположенных на серых лесных и дерново-слабо- и среднеподзолистых почвах различается.

### Применение вегетационных индексов.

Различные вегетационные индексы, которые определяются по дистанционным данным (NDVI, LAI, FPAR) были применены для комплексного анализа почвенно-растительного покрова [18, 19]. Вегетационные индексы являются как самостоятельными характеристиками свойств природно-антропогенных объектов, так и могут входить в состав комплексных параметров, определяющих почвенно-продукционный потенциал экосистемы [18].

Расчёт NDVI для каждого пиксела изображения бассейна р. Клязьмы, полученного со спутника «Метеор», дал возможность выполнить анализ состояния почвенно-растительного покрова, косвенно оценить фитопродуктивность и выделить участки с растительностью в угнетённом состоянии или лишённые растительного покрова. Анализ NDVI отдельных малых речных бассейнов и их угодий (данные «Landsat» ETM+) даёт возможность проводить сравнительные оценки, анализировать годовую и сезонную динамику состояния растительности. Например, были сопоставлены значения NDVI разных типов растительности на экстраординарных серых лесных почвах бассейна р. Колоши, находящихся в зоне дерново-подзолистых почв со значениями NDVI для растительности зоны серых лесных почв, расположенной южнее.

Показатели NDVI в бассейне р. Колоши оказались выше как по сравнению с соседними бассейнами с типичными для территории дерново-подзолистыми почвами, так и по сравнению с зоной серых лесных почв, где их продукционный потенциал ограничен недостатком влаги. В результате можно сделать заключение, что состояние растительности и её продуктивность в ареале одной почвенно-экологической зоны со сходными климатическими характеристиками определяется в основном почвенным плодородием. В разных почвенно-экологических зонах решающее влияние на фитопродуктивность оказывают

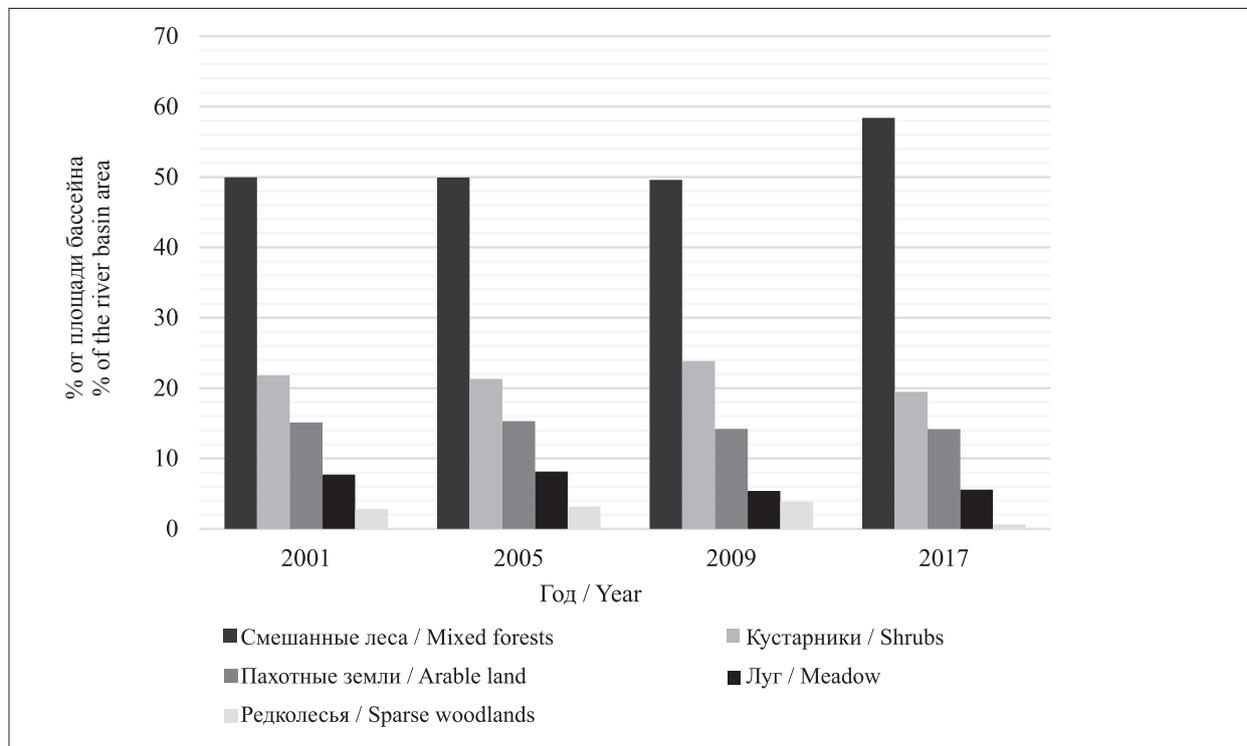


Рис. 1. Динамика землепользования в бассейне р. Клязьмы по материалам MODIS, в %  
 Fig. 1. Land use dynamics in the Klyazma River basin according to MODIS data, in %

климатические параметры. В связи с этим, продукционный потенциал плодородных серых лесных почв может быть снижен, например, по причине недостаточного увлажнения.

Оценка динамики листового индекса LAI в бассейне р. Клязьмы (2005–2017 гг.) показала, что в 2006 и 2014 гг. в Окско-Цнинской и Мещерской провинциях были самые высокие его значения, что соответствует максимальному продукционному потенциалу. В 2013 г. состояние растительности ухудшилось по всему водосбору. Сравнение климатических характеристик с индексами LAI и FPAR показало, что высокие значения индексов, характеризующих состояние растительности, наблюдаются в годы со средним и невысоким количеством осадков весной и летом, а сумма биологически активных температур не оказала существенного воздействия на их динамику.

По результатам измерений вегетационных индексов для ландшафтных провинций бассейна р. Клязьмы были разработаны рекомендации по использованию ключевых участков, апробация которых подтвердила их репрезентативность.

Для мониторинга состояния растительности внутри ландшафтных провинций рекомендовано использовать ключевые участки. Апробация участков с использованием веге-

тационных индексов показала их репрезентативность.

**Оценка почвенно-продукционного потенциала.** Почвенно-продукционный потенциал – это способность природных и природно-антропогенных объектов воспроизводить фитомассу в определённых почвенных и биоклиматических условиях. Разработаны методики его оценки, как по наземным данным, так и с применением дистанционных материалов. Материалы космической съёмки дают ряд преимуществ в его оценке, поскольку позволяют проводить анализ данного показателя для любых территориальных единиц, в том числе и для речных бассейнов, они обеспечивают высокую оперативность, актуальность и достоверность. В настоящее время идёт совершенствование подходов к использованию материалов ДЗЗ для оценки почвенно-продукционного потенциала.

В качестве дистанционно определяемого показателя, который можно использовать для мониторинга почвенно-продукционного потенциала, применён NDVI. Данный вегетационный индекс позволил оценить проективное покрытие растительностью и активность фитопродукционных процессов на территориях, отличающихся особенностями почвенного покрова. Однако, при анализе NDVI необходимо учитывать, что в ареалах

с разреженной растительностью на него оказывает влияние и подстилающая поверхность, в частности, цвет почвы [20, 21]. Почвенный покров также влияет на NDVI опосредовано, через состояние растений. Следовательно, вегетационный индекс NDVI, реагирующий на изменение состояния растительности и почв, можно использовать для мониторинга динамики почвенно-продукционного потенциала и его пространственной изменчивости.

По дистанционным данным были определены показатели NDVI земельных угодий малых речных бассейнов рек Колоши, Шерны, Киржача, Пекши, относящихся к водосбору р. Клязьмы. Значения NDVI всех угодий выше в бассейне р. Колоши, что соответствует наиболее плодородным серым лесным почвам. Оценка почвенно-продукционного потенциала наземными методами также показала его максимальную величину в бассейне р. Колоши. Значительно ниже по всем показателям почвенно-продукционный потенциал бассейна р. Шерны, где основу почвенного покрова составляют дерново-подзолистые почвы.

Дистанционно определяемый индекс поглощённой растительностью при фотосинтезе радиации (FPAR) был использован как один из параметров интегрального показателя почвенно-продукционного потенциала, включающий также следующие характеристики: сумму биологически активных температур, количество осадков и запас гумуса. С применением таким образом рассчитанного почвенно-продукционного потенциала было проведено сравнение бассейна р. Клязьмы с несколькими речными бассейнами, расположенными в различных природно-климатических зонах (реки Мезень, Онега, Сал, Самара, Воронеж). В результате был сделан вывод о том, что самые благоприятные условия для накопления фитомассы сложились на территории водосбора р. Клязьмы. Величина индекса LAI здесь повышалась с 2005 по 2015 гг., индекс динамики был больше единицы, что соответствует росту фитопродуктивности [18].

**Исследование фитопропродуктивности.** Изучены продукционные процессы в бассейне р. Клязьмы за период с 2000 по 2015 гг. по данным Modis GPP/NPP (в углеродных единицах – г С/м<sup>2</sup>): валовая первичная продукция (Gross Primary Productivity, GPP), чистая первичная продукция (Net Primary Productivity, NPP) (рис. 2).

Математическая обработка данных, реализованная методом двухфакторного

дисперсионного анализа ANOVA, позволила установить, что динамика фитопродуктивности ландшафтов не зависит от исходных значений параметров их продуктивности и от структуры земельных угодий, а определяется только временным фактором. В результате ход кривых, отражающих изменение валовой и чистой продуктивности по годам на различных участках, совпадают, хотя их абсолютные значения отличаются.

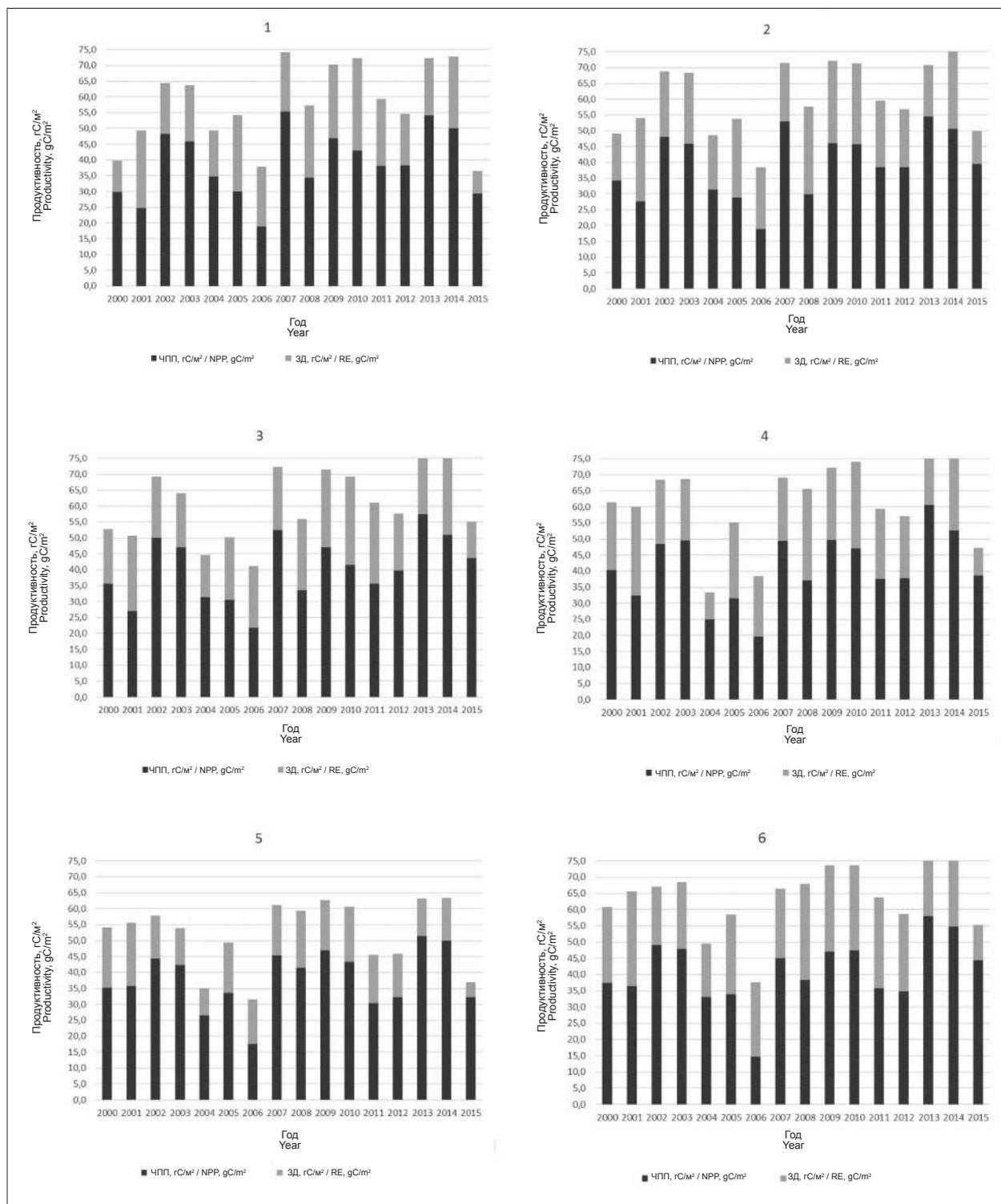
Показано, что различные ландшафты бассейна р. Клязьмы отличаются как скоростью, так и интенсивностью накопления органического вещества в виде выработки валовой и чистой первичной продукции и по-разному реагируют на климатические изменения и смену землепользования. Однако единая экосистема целого речного бассейна демонстрирует большую стабильность по сравнению с составляющими его ландшафтами.

**Выявление ареалов распространения загрязняющих веществ.** Дистанционные данные позволили установить, что глубокая долина р. Рпень (приток Клязьмы) формирует воздушный поток, выносящий атмосферное загрязнение из промышленной зоны г. Владимира. Также с использованием индекса NDVI выделены зоны угнетённого состояния растений в городе.

С целью изучения антропогенного загрязнения р. Клязьмы вблизи г. Коврова Владимирской области выявлены предполагаемые ареалы распространения загрязняющих веществ методом дистанционного зондирования с использованием автоматизированного дешифрирования с обучением по эталонам. Наличие в данных ареалах загрязнений было подтверждено анализом донных отложений на содержание Fe, Cr, Zn, Mn, Cu, Ni, Pb и изучено накопление этих элементов в рыбах и двусторчатых моллюсках [23].

## Заключение

В работе представлено обобщение исследований, посвящённых оценке почвенно-растительного покрова речного бассейна на примере водосбора р. Клязьмы с использованием данных ДЗЗ за 17-летний период. Оценка динамики структуры землепользования бассейна р. Клязьмы в целом, а также по отдельным ландшафтам показала, что тенденция к увеличению площади лесной растительности (прирост около 9%) и сокращение пахотных угодий и пастбищ является общей закономерностью для основной части



**Рис. 2.** Графическое распределение чистой первичной продуктивности (ЧПП) и затрат на дыхание (ЗД) в динамике за 15 лет в ландшафтах бассейна р. Клязьмы: Клинско-Дмитровская гряда (1), Владимирское ополье (2), Мещера (3), Нерльско-Клязьминская низина (4), Нижне-Лухский участок (5), Гороховецкий отрог (6)

**Fig. 2.** Graphical distribution of gross net productivity (NPP) and respiration costs (RE) in dynamics over 15 years in the landscapes of the Klyazma River basin: Klinsko-Dmitrovskaya Ridge (1), Vladimirskoe Opolje (2), Meshchera (3), Nerlsko-Klyazminskaya Lowlands (4), Nizhne-Lukhsy site (5), Gorokhovetsky Spur (6)

бассейна. Исключение составляет междуречье р. Лух, где отмечается уменьшение площадей лесных земель и переход их в заболоченные территории. Установлено, что различные ландшафты бассейна р. Клязьмы отличаются как скоростью, так и интенсивностью накопления органического вещества в виде выработки валовой и чистой первичной продукции и по-разному реагируют на климатические изменения и смену землепользования. Однако единая экосистема целого речного бассейна демонстрирует большую стабильность по сравнению с составляющими его ландшафтами. Дистанционные данные позволили установить, что глубокая долина р. Рпень (приток Клязьмы) формирует воздушный поток, выносящий атмосферное загрязнение из промышленной зоны г. Владимира. Также с использованием индекса NDVI выделены зоны угнетённого состояния растений в городе.

Таким образом, данные ДЗЗ, которые были использованы как самостоятельно, так и в комплексе с другими методами (полевыми, химическими, методами математического моделирования) позволили оперативно и достоверно провести мониторинг состояния почвенно-растительного покрова бассейна р. Клязьмы. В дальнейших исследованиях необходимо актуализировать имеющуюся информацию, а также совершенствовать методологию дистанционных исследований состояния объектов окружающей среды.

*Исследование выполнено за счёт регионального гранта Российского научного фонда № 22-27-20127, <https://rscf.ru/project/22-27-20127/> и Владимирской области.*

## Литература

1. Трифонова Т.А. Развитие бассейнового подхода в почвенных и экологических исследованиях // Почвоведение. 2005. № 9. С. 1054–1061.
2. Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2001. 163 с.
3. Добровольский Г.В. Почвы речных пойм центра Русской равнины. М.: МГУ, 2005. 293 с.
4. Тишков А.А., Белоновская Е.А., Кренке А.Н., Титова С.В., Царевская Н.Г. Изменения биологической продуктивности наземных экосистем российской Арктики в XXI в. // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 1. С. 30–41. doi: 10.25283/2223-4594-2021-1-30-41
5. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Уланова С.С., Федорова Н.Л. Наземные и спутниковые исследования продуктивности пастбищ республики Калмыкии с различной степенью деградации растительных сообществ // Аридные экосистемы. 2013. Т. 19. № 4 (57). С. 31–39.
6. Hashimoto H., Wang W., Milesi C., White M.A., Ganguly S., Gamo M., Hirata R., Myneni R.B., Nemani R.R. Exploring simple algorithms for estimating gross primary production in forested areas from satellite data // Remote Sens. 2012. No. 4. P. 303–326. doi: 10.3390/rs4010303
7. Chen Y., Shen W., Gao S., Zhang K., Wang J., Huang N. Estimating deciduous broadleaf forest gross primary productivity by remote sensing data using a random forest regression model // Journal of Applied Remote Sensing. 2019. V. 13. No. 3. Article No. 038502. doi: 10.1117/1.JRS.13.038502
8. Zhang M., Zeng Y. Net primary production estimation by using fusion remote sensing data with high spatial and temporal resolution // National Remote Sensing Bulletin. 2018. V. 22. No. 1. P. 143–152. doi: 10.11834/jrs.20186499
9. Robinson N.P., Allred B.W., Smith W.K., Jones M.O., Moreno A., Erickson T.A., Naugle D.E., Running S.W. Terrestrial primary production for the conterminous United States derived from Landsat 30 m and MODIS 250 m // Remote Sensing in Ecology and Conservation. 2018. V. 4. No. 3. P. 264–280. doi: 10.1002/rse2.74
10. Varghese R., Behera M.D. Annual and seasonal variations in gross primary productivity across the agroclimatic regions in India // Environmental Monitoring and Assessment. 2019. V. 191. Article No. 631. doi: 10.1007/s10661-019-7796-2
11. Dedeoğlu M., Başayığıt L., Yüksel M., Kaya F. Assessment of the vegetation indices on Sentinel-2A images for predicting the soil productivity potential in Bursa, Turkey // Environmental Monitoring and Assessment. 2020. V. 192. Article No. 16. doi: 10.1007/s10661-019-7989-8
12. Prince S.D. Challenges for remote sensing of the Sustainable Development Goal SDG 15.3.1 productivity indicator // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 234. Article No. 111428. doi: 10.1016/j.rse.2019.111428
13. Sun B., Li Z., Gao W., Zhang Y., Gao Z., Song Z., Qin P., Tian X. 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. V. 107. Article No. 105614. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105614
14. Wang M.M., He G.J., Ishwaran N., Hong T.H., Bell A., Zhang Z.M., Wang G.Z., Wang M. 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. V. 13. No. 3. P. 393–409. doi: 10.1080/17538947.2018.1523955
15. Экологический атлас бассейна реки Клязьмы: Человек в окружающей среде / Под ред. Т.А. Трифоновой. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2018. 312 с.

16. Friedl M., Sulla-Menashe D. MCD12C1 MODIS/Terra+ Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 0.05Deg CMG V006. 2015, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC [Электронный ресурс] <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12c1v006/> (Дата обращения: 10.05.2023). doi: 10.5067/MODIS/MCD12C1.006

17. Trends. Earth. Conservation International [Электронный ресурс] <http://trends.earth>. 2018. (Дата обращения: 01.12.2021).

18. Mishchenko N.V., Trifonova T.A., Kareva M.M. Assessment of the state of vegetation and soils on the basis of remote sensing data // *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2008. V. 63. P. 109–114. doi: 10.3103/S0147687408030034

19. Trifonova T.A., Mishchenko N.V., Petrosyan J.D. Dynamics of soil-productive potential of river basin ecosystems functioning in different climatic conditions assessed basing on remote sensing data // *Eurasian Soil Science*. 2020. V. 53. P. 155–165. doi: 10.1134/S1064229320020131

20. Дистанционное зондирование: количественный подход / Под ред. Ф.Х. Свейна, Ш.М. Дейвиса. М.: Недра, 1983. 416 с.

21. Коношкова М.В., Вышивкин А.А. Связь изображения на космических снимках Quickbird с растительностью, почвами и их засоленностью (Северный Прикаспий, район Джаныбекского стационара РАН) // *Поволжский экологический журнал*. 2009. № 1. С. 35–46.

22. Trifonova T.A., Mishchenko N.V. Assessment the soil-productive potential within river basins by remotely sensed data // *Geography and Natural Resources*. 2016. V. 37. No. 3. P. 192–199. doi: 10.1134/S1875372816030021

23. Трифонова Т.А., Амелин В.Г., Гришина Е.П., Тихомиров А.Л., Мищенко Н.В. Биомониторинг реки Клязьма с использованием космической фотоинформации // *Мониторинг. Безопасность жизнедеятельности*. 1997. № 1. С. 22–24.

## References

1. Trifonova T.A. Development of a basin approach in pedological and ecological studies // *Pochvovedenie*. 2005. No. 9. P. 1054–1061 (in Russian).

2. Korytny L.M. Basin concept in nature management. Irkutsk: Publishing house of the Institute of Geography SB RAS, 2001. 163 p. (in Russian).

3. Dobrovolsky G.V. Soils of river floodplains of the center of the Russian plain. Moskva: MSU, 2005. 293 p. (in Russian).

4. Tishkov A.A., Belonovskaya E.A., Krenke A.N., Titova S.V., Tsarevskaya N.G. Changes in biological productivity of the Russian Arctic land ecosystems of in the 21st century // *Arctic: ecology and economics*. 2021. V. 11. No. 1. P. 30–41 (in Russian). doi: 10.25283/2223-4594-2021-1-30-41

5. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Ulanova S.S., Fedorova N.L. Terrestrial and satellite investigations of pasture productivity of Kalmykia with different degree

of vegetation degradation // *Aridnye ekosistemy*. 2013. V. 19. No. 4 (57). P. 31–39 (in Russian).

6. Hashimoto H., Wang W., Milesi C., White M.A., Ganguly S., Gamo M., Hirata R., Myneni R.B., Nemani R.R. Exploring simple algorithms for estimating gross primary production in forested areas from satellite data // *Remote Sens*. 2012. No. 4. P. 303–326. doi: 10.3390/rs4010303

7. Chen Y., Shen W., Gao S., Zhang K., Wang J., Huang N. Estimating deciduous broadleaf forest gross primary productivity by remote sensing data using a random forest regression model // *Journal of Applied Remote Sensing*. 2019. V. 13. No. 3. Article No. 038502. doi: 10.1117/1.JRS.13.038502

8. Zhang M., Zeng Y. Net primary production estimation by using fusion remote sensing data with high spatial and temporal resolution // *National Remote Sensing Bulletin*. 2018. V. 22. No. 1. P. 143–152. doi: 10.11834/jrs.20186499

9. Robinson N.P., Allred B.W., Smith W.K., Jones M.O., Moreno A., Erickson T.A., Naugle D.E., Running S.W. Terrestrial primary production for the conterminous United States derived from Landsat 30 m and MODIS 250 m // *Remote Sensing in Ecology and Conservation*. 2018. V. 4. No. 3. P. 264–280. doi: 10.1002/rse.274

10. Varghese R., Behera M.D. Annual and seasonal variations in gross primary productivity across the agroclimatic regions in India // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019. V. 191. No. 4. P. 1–19. doi: 10.1007/s10661-019-7796-2

11. Dedeoğlu M., Başayığit L., Yüksel M., Kaya F. Assessment of the vegetation indices on Sentinel-2A images for predicting the soil productivity potential in Bursa, Turkey // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020. V. 192. Article No. 16. doi: 10.1007/s10661-019-7989-8

12. Prince S.D. Challenges for remote sensing of the Sustainable Development Goal SDG 15.3.1 productivity indicator // *Remote Sensing of Environment*. 2019. V. 234. Article No. 111428 doi: 10.1016/j.rse.2019.111428

13. Sun B., Li Z., Gao W., Zhang Y., Gao Z., Song Z., Qin P., Tian X. 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. V. 107. Article No. 105614. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105614

14. Wang M.M., He G.J., Ishwaran N., Hong T.H., Bell A., Zhang Z.M., Wang G.Z., Wang M. 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. V. 13. No. 3. P. 393–409. doi: 10.1080/17538947.2018.1523955

15. Ecological atlas of the Klyazma River basin: Man in the environment / Ed. T.A. Trifonova. Vladimir: Volga Publishing House, 2018. 312 p. (in Russian).

16. Friedl M., Sulla-Menashe D. MCD12C1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 0.05Deg CMG V006. 2015, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC [Internet resource] <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12c1v006/> (Accessed: 10.05.2023). doi: 10.5067/MODIS/MCD12C1.006
17. Trends. Earth. Conservation International [Internet resource] <http://trends.earth>. 2018. (Accessed: 01.12.2021).
18. Mishchenko N.V., Trifonova T.A., Kareva M.M. Assessment of the state of vegetation and soils on the basis of remote sensing data // Moscow University Soil Science Bulletin. 2008. V. 63. P. 109–114. doi: 10.3103/S0147687408030034
19. Trifonova T.A., Mishchenko N.V., Petrosyan J.D. Dynamics of soil-productive potential of river basin ecosystems functioning in different climatic conditions assessed basing on remote sensing data // Eurasian Soil Science. 2020. V. 53. P. 155–165. doi: 10.1134/S1064229320020131
20. Remote sensing: the quantitative approach / Eds. F.H. Svein, S.M. Davis. Moskva: Nedra, 1983. 416 p. (in Russian).
21. Konyushkova M.V., Vyshivkin A.A. The connection of images on Quickbird satellite images with vegetation, soils and their salinity (Northern Caspian, the area of the Janybek hospital of the Russian Academy of Sciences) // Povolzhskiy Journal of Ecology. 2009. No. 1. P. 35–46 (in Russian).
22. Trifonova T.A., Mishchenko N.V. Assessment the soil-productive potential within river basins by remotely sensed data // Geography and Natural Resources. 2016. V. 37. No. 3. P. 192–199. doi: 10.1134/S1875372816030021
23. Trifonova T.A., Amelin V.G., Grishina E.P., Tikhomirov A.L., Mishchenko N.V. Biomonitoring of the Klyazma River using space photo information // Monitoring. Bezopasnost zhiznedeyatelnosti. 1997. No. 1. P. 22–24 (in Russian).