

Комплексная оценка антропогенной нагрузки на водосбор озера Плещеево

Г.Г. Шилов ^{1*}

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии,
Москва, Россия

*kf.shilov@yandex.ru



Ключевые слова озеро Плещеево, водосборный бассейн, антропогенная нагрузка, ретроспективный анализ, дистанционное зондирование Земли, ДЗЗ, геоинформационное моделирование

Аннотация Усиление антропогенного воздействия на ограниченные и неравномерно распределенные водные ресурсы на территории водосборного бассейна обуславливает необходимость его комплексной оценки. Благодаря использованию разновременных данных дистанционного зондирования Земли и применению методов геоинформационного моделирования водосборные бассейны можно рассматривать как целостные геосистемы в динамике, анализируя изменение основных форм природопользования и типов антропогенного воздействия. Объектом исследования в данной работе является бассейн озера Плещеево – уникальный природно-территориальный комплекс на юге Ярославской области с историко-культурным центром – городом Переславлем-Залесским. В работе проведен анализ изменения доли лесов, земель сельскохозяйственного назначения и селитебных земель в ретроспективе 2000-2020 гг, морфометрический анализ на основе цифровой модели рельефа. Результаты представлены в виде оценочной карты.

1 Введение

В настоящее время отсутствует полный и систематизированный анализ антропогенного воздействия на водосбор озера Плещеево, в котором учитывались бы динамика и состояние лесного покрова, урбанизированных территорий, сельскохозяйственных угодий, а также оценивались изменения доли площади населенных пунктов относительно уклонов рельефа с помощью морфометрического анализа. Необходимость в таком анализе обусловлена ухудшением свойств природных вод озера Плещеево и возникновению предпосылок для угроз здоровью человека [1].

В рамках текущего исследования были выполнены:

- ретроспективный анализ землепользования в границах водосбора за период 2000-2024 гг. на основе архивных данных и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ);
- расчет интегральных показателей антропогенной нагрузки в динамике за исследуемый период;
- создание интегральной оценочной карты антропогенной нагрузки на водосбор озера Плещеево.

2 Материалы и методы

В рамках выполнения работ данного исследования применялись:

- метод геоинформационного моделирования, для которого в качестве инструмента был использован калькулятор растров в QGIS 3.42;
- метод дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в том числе с применением алгоритмов машинного обучения на платформе Google Earth Engine;
- метод пространственного анализа;
- картографический метод исследования.

В рамках ретроспективного анализа в качестве данных дистанционного зондирования были использованы космические снимки спутников Landsat-5 и Landsat-8 с пространственным разрешением 30 м за летний период, характеризующие состояние местности во временном диапазоне 2000-2024 гг. с интервалами в пять лет (± 1 год) (табл. 1). В качестве цифровой модели рельефа была использована DEM SRTM с пространственным разрешением 30 м. Объекты гидрографии и границы населенных пунктов уточнялись полуавтоматически по данным Единой электронной картографической основы (ЕЭКО).

Таблица 1. Метаданные спутниковых снимков.

Table 1. Imagery metadata

Идентификатор	Дата	Облачность, %
LT05_L2SP_177021_20010724_20200905_02_T1	2001-07-24	3.0
LT05_L2SP_177021_20050820_20200902_02_T1	2005-08-20	0
LT05_L2SP_177021_20100701_20200823_02_T1	2010-07-01	0
LC08_L2SP_177021_20150613_20200909_02_T1	2015-06-13	4.64
LC08_L2SP_178021_20210620_20210629_02_T1	2021-06-20	0.25
LC08_L2SP_177021_20240707_20240712_02_T1	2024-07-07	1.56

2.1 Ретроспективный анализ

Ретроспективный анализ за период 2000-2020 гг. был проведен в пределах водосборного бассейна озера Плещеево. Цель анализа – определить динамику и изменение доли площади лесов, селитебных земель и земель сельскохозяйственного назначения за рассматриваемый период, а также провести морфометрический анализ.

Площадь водосбора составляет 485 км², включая водосбор озера Плещеево (351 км²) и Берендеевского болота (134 км²). Берендеевское болото включено в водосбор озера Плещеево в связи с тем, что исток реки Трубеж – крупнейшего притока озера – берет начало в его границах. Площадь зеркала озера Плещеево составляет 51 км², в него впадают 19 рек и ручьев, вытекает одна река – Вёкса Плещеевская. В пределах водосбора озера Плещеево расположены 86 населенных пунктов, в том числе центр муниципального округа – город Переславль-Залесский. Озеро Плещеево является частью водосбора реки Волги [4].

2.1.1 Лесная растительность

Изменение площади лесного покрова оценивалось по данным дистанционного зондирования с помощью широко используемого в задачах обучаемой кластеризации изображений метода k-means [5] с параметрами выборки из 5000 пикселей и количеством кластеров равным 5:

$$X = x_1, x_2, \dots, x_n, k = 5, n = 5000$$

где X – множество пикселей обучающей выборки, k – число кластеров, n – количество обучающих пикселей.

Операция выполнялась в автоматическом режиме в среде Google Earth Engine. В результате были получены данные об изменении доли площади лесов (рис. 1) и 6 растров с выделенными на них пикселями лесной растительности (рис. 2).

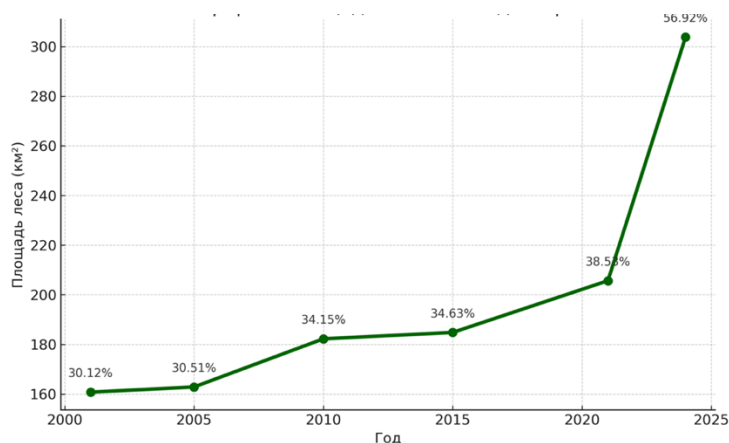


Рис. 1. Прирост площади лесной растительности, 2000-2024 гг.

Fig. 1. Forest area increase, 2000-2024

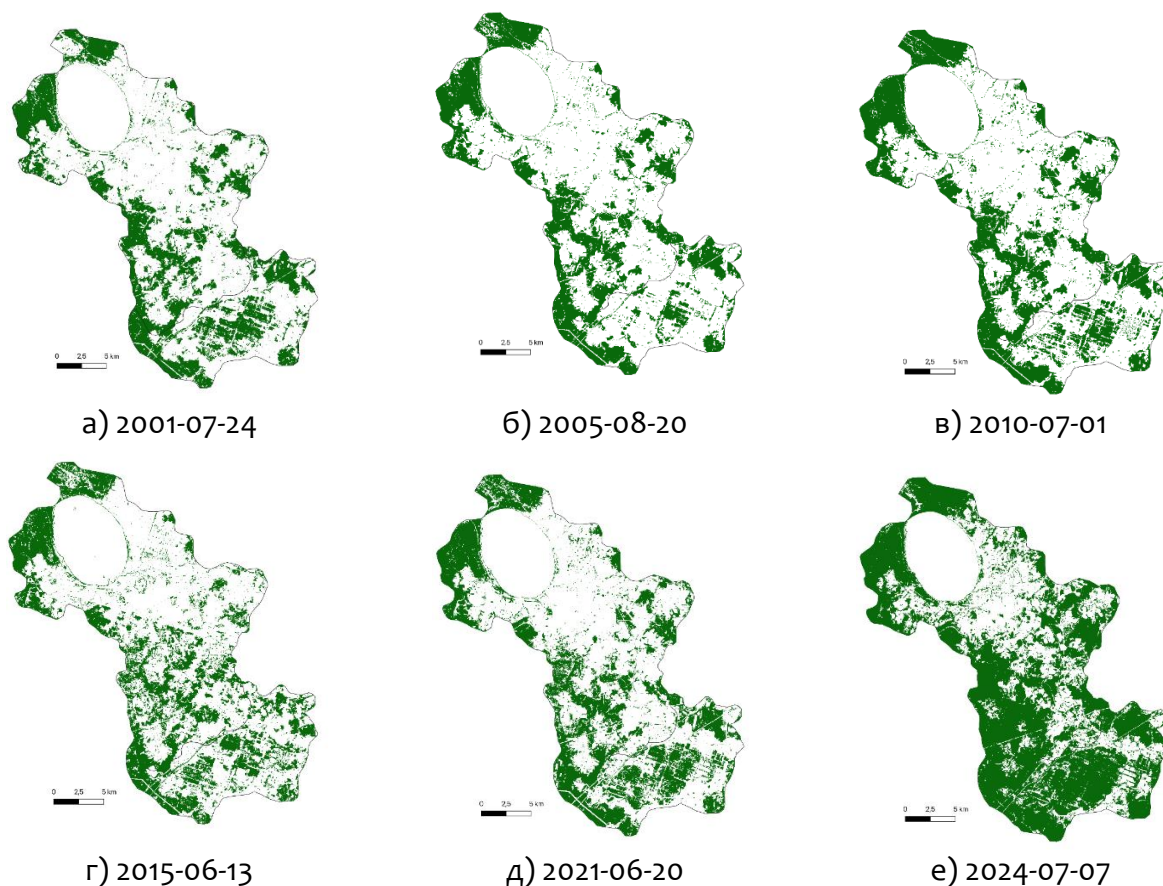


Рис. 2. Динамика изменения площади лесной растительности, 2000–2024 гг.
Зеленым цветом показаны леса.

Fig. 2. Forest area change dynamics, 2000–2024. Forested areas are shown in green.

По результатам обработки цифровой модели рельефа инструментами анализа рельефа «Экспозиция» в QGIS получен растр, отображающий склоны южной экспозиции (рис. 2). Оверлейные операции позволили оценить долю лесов, прирост которых пришелся на склоны южной экспозиции ($170\text{--}190^\circ$), и на которых лесовосстановление происходит активней за счет экспозиционной асимметрии, роста температур и текущих климатических трендов.

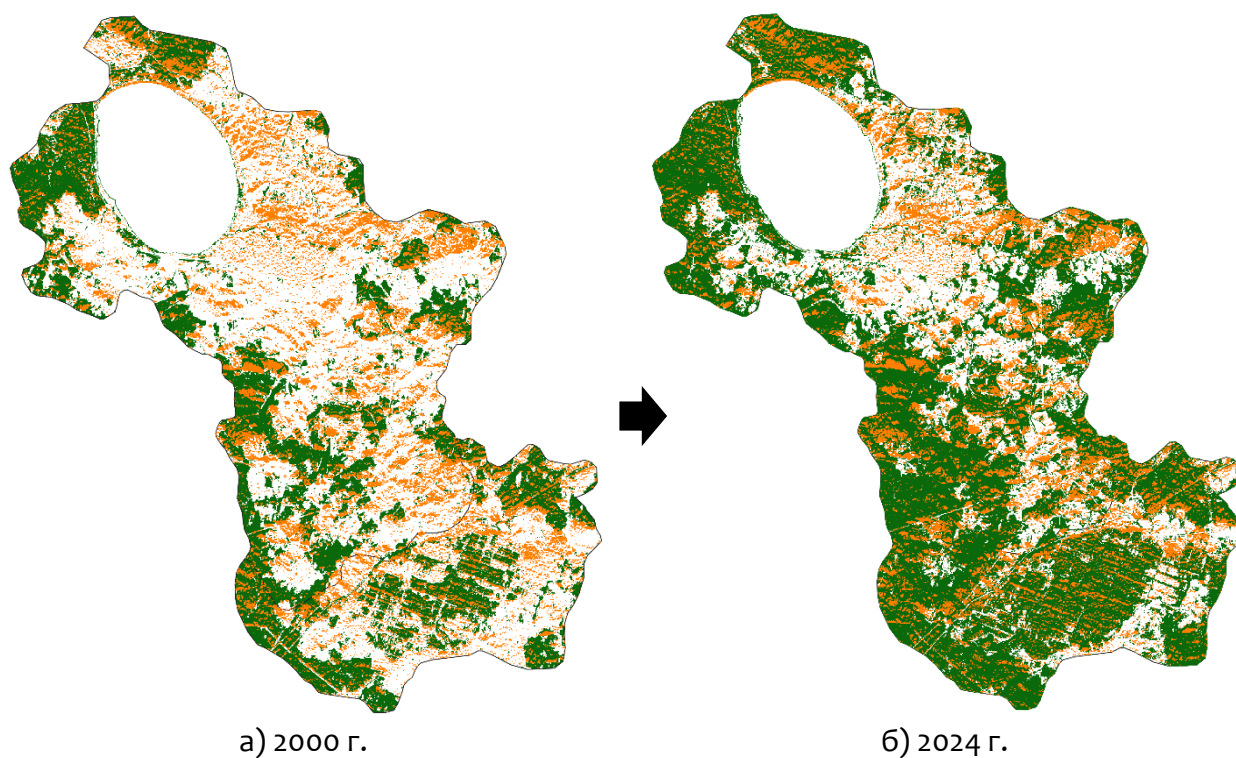


Рис. 2. Морфометрический анализ прироста лесной растительности относительно склонов южной экспозиции, 2000 (а) и 2024 (б). Зеленым цветом показаны леса, оранжевым – участки склонов южной экспозиции.

Fig. 2. Morphometric analysis of forest growth in 2000 and 2024. Forested areas are shown in green, the south-facing slope sections are shown in orange.

2.1.2 Урбанизированные территории

Динамика изменений застроенных территорий рассматривается с периодичностью в 10 лет, что обусловлено отсутствием значительных изменений по пятилетиям. Границы селитебных земель уточнены при помощи нормализованного разностного индекса застройки NDBI¹. Метод пространственного анализа позволил оценить направление и масштаб прироста урбанизированных территорий в рассматриваемом временном диапазоне (рис. 3).

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$$

На рисунке 3 можно видеть, что основное направление застройки, которое развивалось к 2024 году, — это истоки малых притоков озера на востоке и юго-востоке.

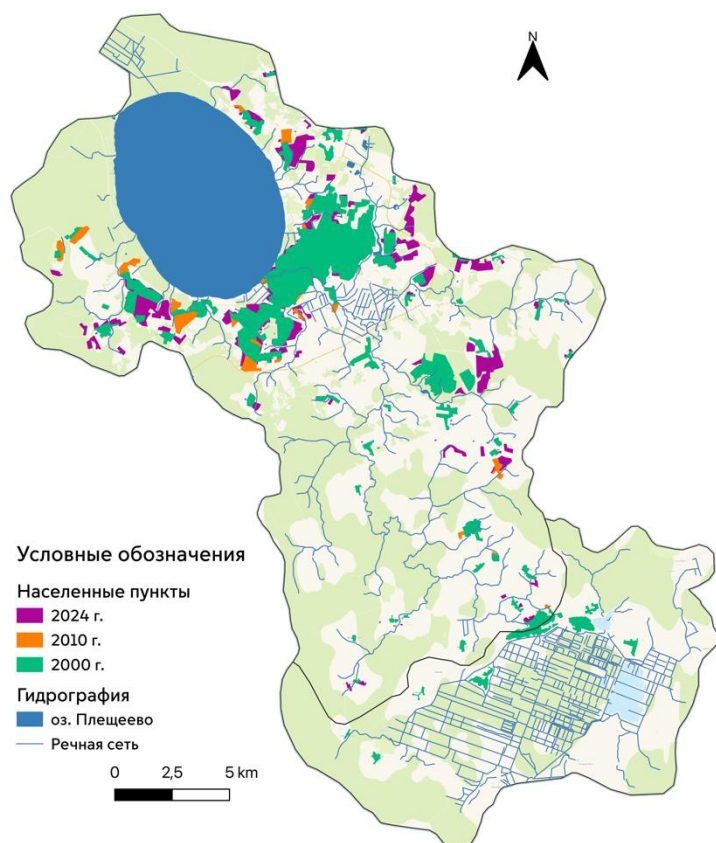


Рис. 3. Изменения площади застроенных территорий.

Fig. 3. Built-up area changes dynamics.

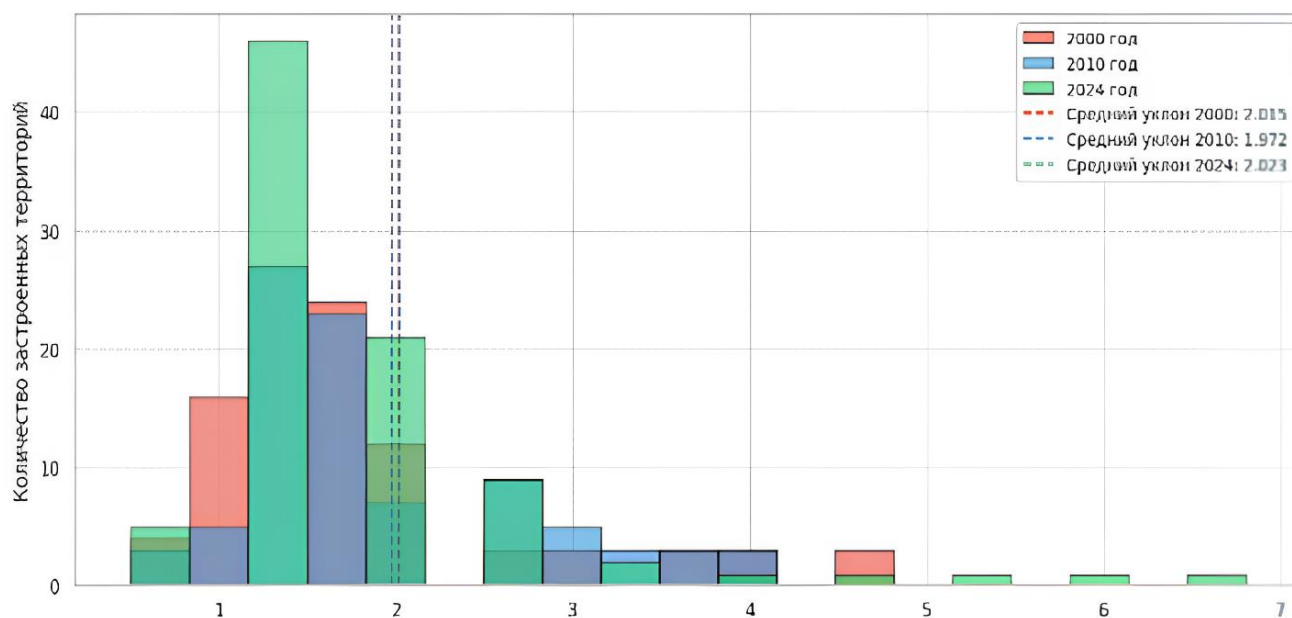


Рис. 4. Распределение застроенных территорий по уклону поверхности земли (2000, 2010 и 2024 гг.)

Fig.4. Distribution of built-up areas by surface slope (2000, 2010, and 2024)

На рисунке 4 представлено распределение застроенных территорий по уклону. График демонстрирует, что до 2024 года максимальные значения уклонов, где размещалась

застройка, не превышали 4°, в то время как границы застройки 2024 года уже попали на уклоны выше 4°.

На следующей карте (рис. 5) показан прирост застройки относительно уклонов рельефа по результатам морфометрического анализа. Такой анализ позволяет оценить и выявить основные тенденции в развитии урбанизированных территорий и возникшие вследствие его роста угрозы для окружающей среды, а именно усиление эрозии и дефляции, нарушение естественного дренажа, повышение риска деградации почв, утрата растительного покрова, загрязнение верховий притоков озера.

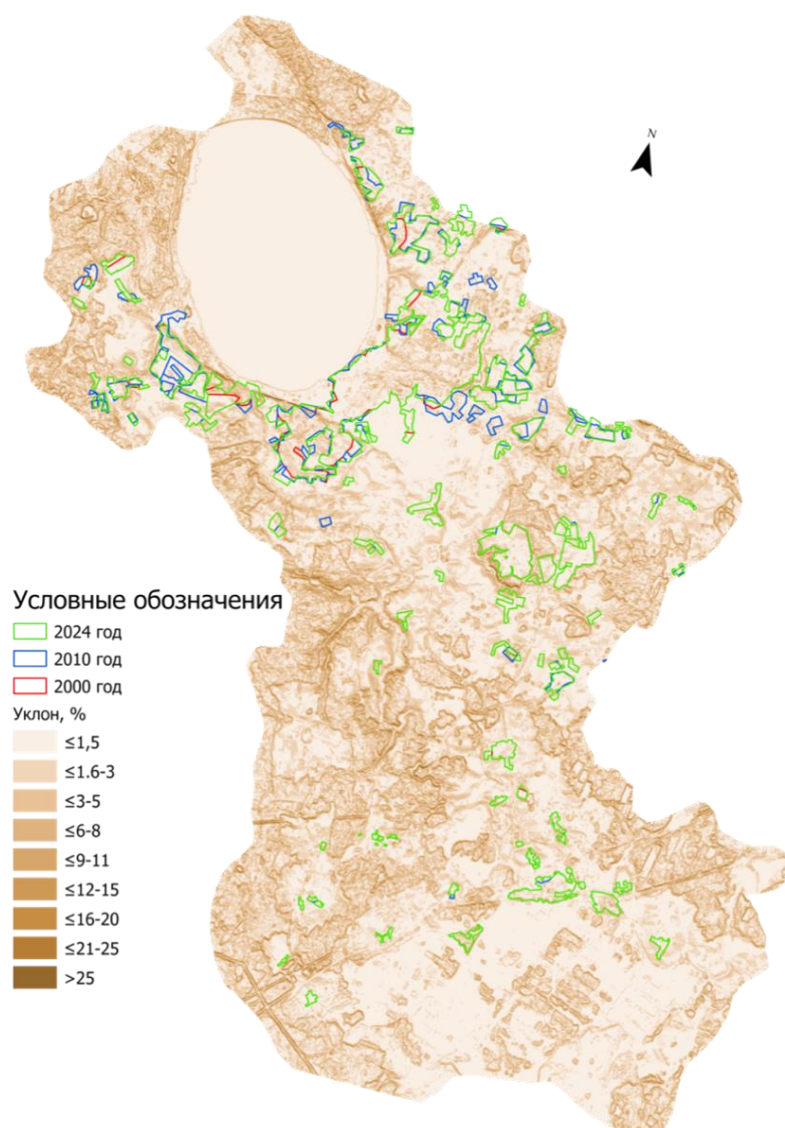


Рис. 5. Анализ прироста застроенных территорий относительно уклонов рельефа

Fig. 5. Analysis of built-up area expansion in relation to terrain slopes

2.1.3 Земли сельскохозяйственного назначения

Изменения площади сельскохозяйственных угодий оценивались по спутниковым снимкам в полуавтоматическом режиме. С применением оверлейных операций в QGIS выявлены участки с постоянно используемыми землями и места, которые впервые применялись в хозяйстве (рис. 6). Основной прирост обрабатываемых земель наблюдается на юге и юго-востоке водосбора и на верховьях притоков озера. Последнее связано,

вероятно, с развитием частных локальных хозяйств, что может вносить как позитивный, так и негативный вклад в зависимости от ответственности каждого конкретного землепользователя.

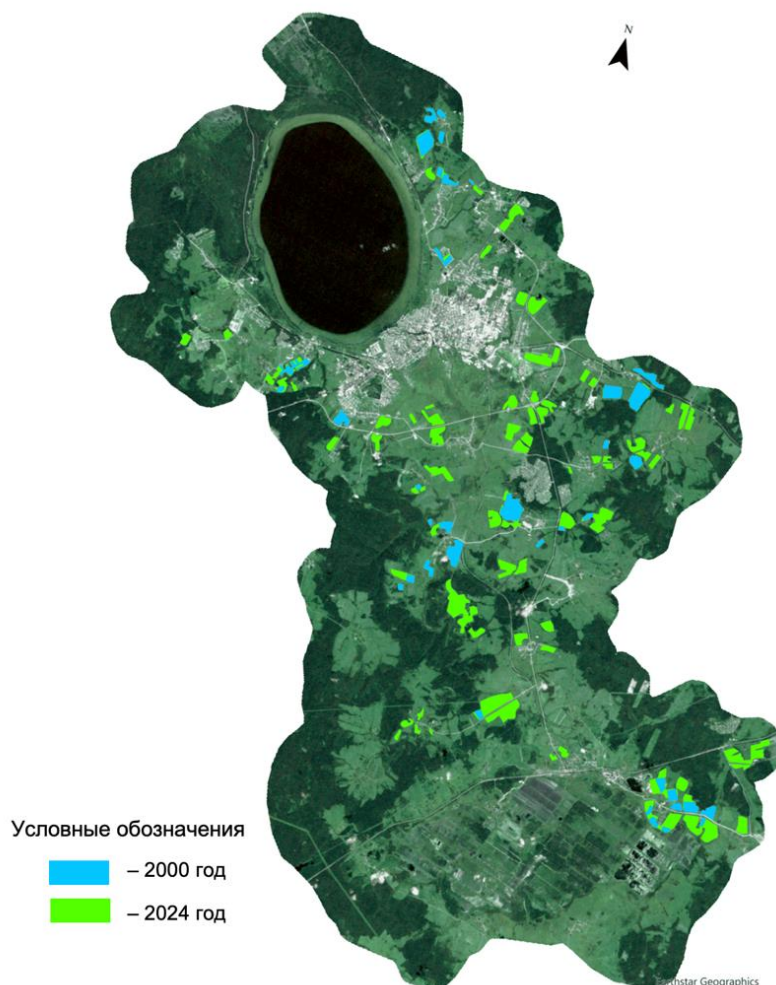


Рис. 5. Изменения площади земель сельскохозяйственного назначения

Fig. 5. Analysis of built-up area expansion in relation to terrain slopes

2.2 Геоинформационное моделирование

2.2.1 Расчет интегральных показателей

Геоинформационное моделирование направлено на создание тематической карты, которая отображает пространственное распределение и интенсивность нагрузки (частоту) на водосбор по типам землепользования. Подготовленные растровые данные в единой системе координат и с унифицированным пространственным охватом и разрешением были обработаны посредством калькулятора растров в QGIS.

Первично были созданы три интегральных растра, где для каждого типа землепользования задан вес, соответствующий условному уровню антропогенной нагрузки: лесная растительность – 1, земли сельскохозяйственного назначения – 2, селитебные земли – 3. Таким образом, задана градация перехода от минимально измененных экосистем через

умеренно трансформированные к сильно преобразованным территориям. Ниже представлено выражение QGIS для задания ранга по типу землепользования, где *np_год* – растры населенных пунктов, *agro_год* – растры земель сельскохозяйственного назначения, *f_год* – растры леса:

$$\begin{aligned} & ("np_2000_tr_3@1" = 3) * 3 \\ & + ("np_2000_tr_3@1" != 3 \text{ and } "agro_2000_tr_2@1" = 2) * 2 \\ & + ("np_2000_tr_3@1" != 3 \text{ and } "agro_2000_tr_2@1" != 2) * "f_2001_tr@1" \end{aligned}$$

Затем были созданы растры разности ("*raster1@1*" - "*raster2@1*"), позволяющие оценить степень изменчивости по типу землепользования.

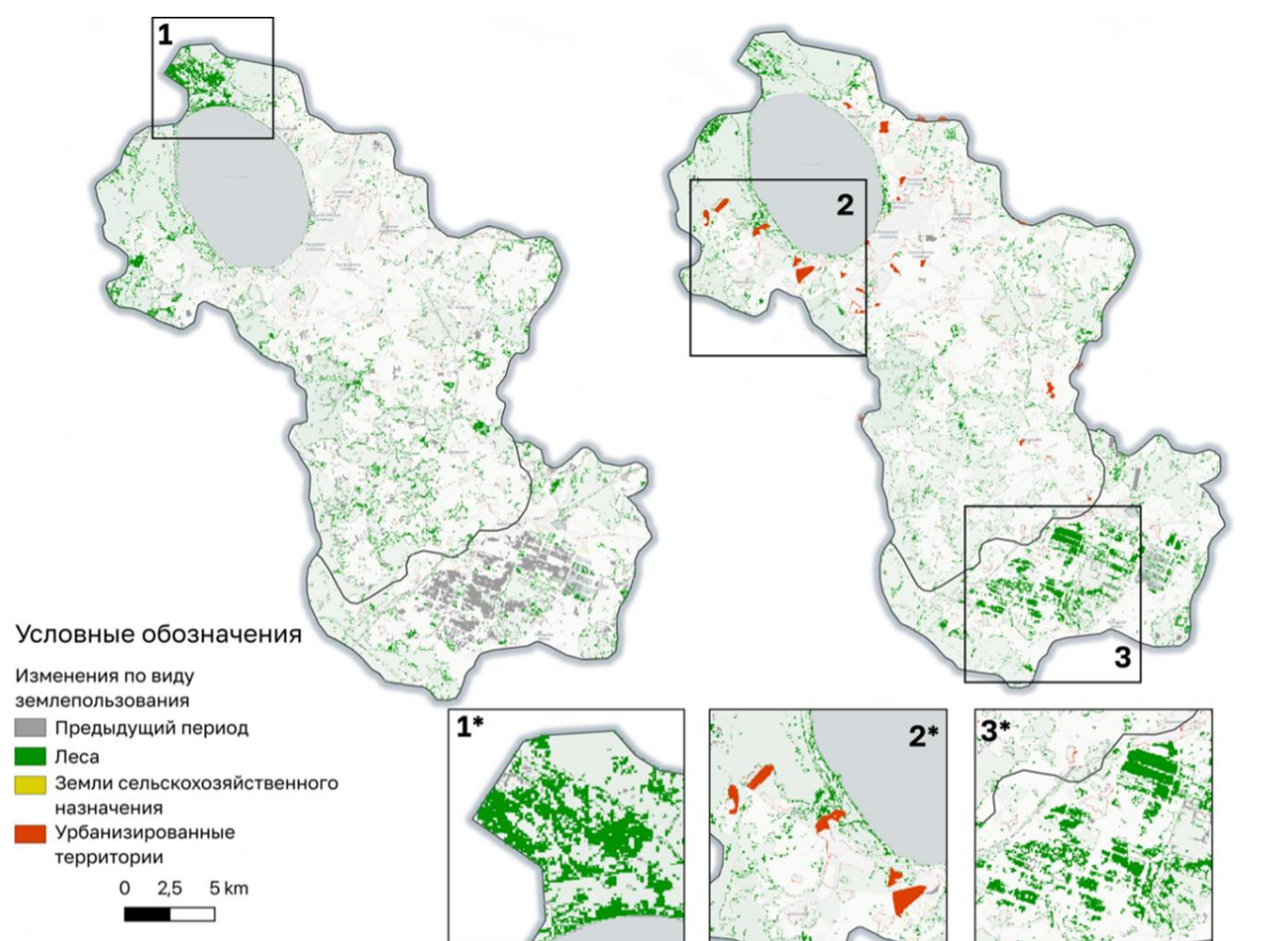


Рис. 7. Разностные растры с визуальным дешифрированием, отмеченным во врезках
Fig. 7. Difference rasters with visual interpretation highlighted in insets

В результате побитовых операций вычитания пар последовательных растровых карт получены шесть разностных растров, характеризующих произошедшие изменения в диапазоне 2000-2005 и 2005-2010 гг., 2010-2015 и 2015-2020 гг., 2020-2024 гг., на которых с помощью визуального дешифрирования выявлены локальные очаги возрастания или снижения антропогенной нагрузки, что позволяет проанализировать динамику изменений с

шагом в 5 лет (рис. 7). Участок №1 и №3 отображает значительный прирост лесной растительности на болотистых почвах, когда участок №2 отображает постоянный прирост урбанизированных территорий на левом берегу озера.

2.2.3 Создание интегральной оценочной карты

Создание итоговой интегральной карты заключается в вычислении усредненных показателей по данным шести разностных растров в целях экодиагностики территории. Для оценки нарушенности был принят условный вид: незначительная, низкая, средняя и высокая антропогенная нагрузка.

Сначала суммируются все интегральные растры в калькуляторе растров, позволяющем применять арифметические и логические выражения к растровым слоям, а далее происходит деление на их общее количество. Таким образом, на полученном итоговом растре величина в каждом пикселе характеризует среднее антропогенное воздействие за период 2000-2024 гг. в зависимости от качества изменений, например, если прирост урбанизированных территорий в разрезе анализируемых 24 лет был средним, то в ходе вычислений он отобразится на соответствующем уровне с учетом заданного параметра веса. Участок с постоянным приростом леса в течение 24 лет с учетом веса равного «1» в ходе оценки покажет низкую нарушенность территории.

$$A(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{t \in \left\{ \begin{matrix} 2000, \\ 2005, \\ 2010, \\ 2015, \\ 2020, \\ 2024 \end{matrix} \right\}} Rt(x, y)$$

где $A(x, y)$ – среднее значение антропогенной нагрузки в пикселе за период 2000–2024 гг., $Rt(x, y)$ – значение интегрального показателя в году t , n – количество шагов ($n=6$).

Полученная растровая карта представляет из себя карту оценки антропогенной нагрузки на водосбор озера Плещеево (рис. 8).

Визуализация была выполнена с применением шкалы от белого (незначительная нагрузка) через светло-розовый (низкая), розовый (средняя) к красному (высокая нагрузка).

3 Результаты и обсуждение

Результаты анализа изменения доли площадей по типам землепользования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Изменения по видам землепользования 2000–2024 гг.
Table 2. Changes in Land Use types 2000–2024

Период	Изменения по видам землепользования (прирост км ² /доля S) S водосбора 485 км ²		
	Лесистость	Распаханность	Селитебные земли
2000–2005	2.09 / 33,5%	6,51 / 1,3%	31,2 / 6,4%
2005–2010	19.40 / 37,5%		
2010–2015	2.57 / 38,1%	12,84 / 2,65%	34,1 / 7%
2015–2020	20.8 / 42,4%		
2020–2024	98.1 / 62,6%		

Доля лесов увечилась с 160,7 км² до 303,8 км² или с 30 до 56% от общей доли водосбора. Основной прирост приходился на малонаселенные участки на юго-западе и юге бассейна, в том числе существенный прирост выявлен на Берендеевском болоте. Это связано, в первую очередь, с естественным восстановлением лесов за счет климатических факторов – более влажной фазы и ростом средних температур, а также изменениями в землепользовании, значительно снизивших антропогенное воздействие на эти участки [6]. Морфометрический анализ прироста лесной растительности показал, что основной объем приросших лесов расположен на склонах южной экспозиции.

Увеличение доли лесной растительности на водосборе – позитивная тенденция, однако для комплексной оценки устойчивости этих экосистем к меняющимся условиям климата необходим постоянный мониторинг их состояния. Кроме того, необходимость в лесовосстановительных мероприятиях и защите леса обусловлена важной ролью лесных экосистем в поддержании биоразнообразия, регулировании климата и обеспечении экологической устойчивости и безопасности региона и страны.

Доля селитебных земель на водосборе за четверть века возросла с 31,2 км² до 43.1 км² или с 6% до 8% от общей площади бассейна. Основное направление роста – юг и юго-восток и в основном – пригородные районы Переславля-Залесского, хотя карта изменения площади застроенных территорий отображает реальную ситуацию – от западных берегов озера через южные и к восточным берегам сегодня господствуют урбанизированные территории. Основная застройка – малоэтажный частный сектор.

Известно, что рациональным и экономически выгодным считается строительство на склонах с уклоном до 2 градусов [7]. Такие участки обеспечивают более стабильные условия для возведения зданий, минимизируют экономические затраты. Кроме того, пологие склоны способствуют естественному отводу поверхностных вод, снижая риск эрозии и подтоплений, а также упрощают прокладку коммуникаций и транспортных путей. Морфометрический анализ прироста застроенных территорий относительно уклонов рельефа показал, что в начале 2000-х гг. застроенные территории не попадали на участки, уклон которых превышает 4°, а к 2024 году застроенные территории отмечаются на участках с уклоном до 7° и основное направление этого прироста – верховья малых притоков озера.

Последствия истощения и загрязнения подземных и поверхностных вод как важнейших элементов земных недр мало изучены научным сообществом, а потому тенденция застройки участков верховий малых притоков, с последующей организацией скважин и водозабора видится как негативный тренд.

Сельское хозяйство оказывает серьезное антропогенное воздействие на водосбор озера. Площадь земель сельскохозяйственного назначения – возделываемых и не возделываемых увеличилась с 6,51 км² в 2000 году до 19,35 км² в 2024 году, распаханность территории составляет порядка 3% от площади водосбора. Большая доля возделываемых земель расположена вне границ Переславля-Залесского, что скорее связано с деятельностью частных хозяйств. Примерно половина использовавшихся в период 2000-2010 гг. земель в текущий момент не задействована в хозяйственной деятельности и является залежами.

В результате геоинформационного моделирования получена карта оценки антропогенной нагрузки на водосбор озера Плещеево за период 2000-2024 гг. (рис. 8). Использованные в исследовании методы позволили выделить зоны нарушенности и проанализировать долгосрочные тенденции. Полученные интегральные карты показали положительные тренды в восстановлении лесов в малонаселённых районах, однако выявили усиление нагрузки вблизи населённых пунктов и прибрежной зоны из-за роста урбанизации и сельского хозяйства, в частности в верховьях притоков озера Плещеево.

4 Выводы

В исследовании проведен анализ изменений доли площадей по видам землепользования на основе данных дистанционного зондирования Земли, цифровой модели рельефа, картографических и литературных источники. Проведено геоинформационное моделирование антропогенной нагрузки на водосбор озера Плещеево, которому предшествовал.

Выявлены причины увеличения доли лесов на водосборе, приуроченные к зарастанию территорий за счет общего роста температур и снижению антропогенного воздействия на них, изучено влияние растущих урбанизированных территорий на общую динамику антропогенной нагрузки, рассмотрены взаимосвязи по видам землепользования. Полученные результаты позволяют оценить долгосрочные тенденции, обусловленные нарастающим антропогенным воздействием на водосбор озера Плещеево.

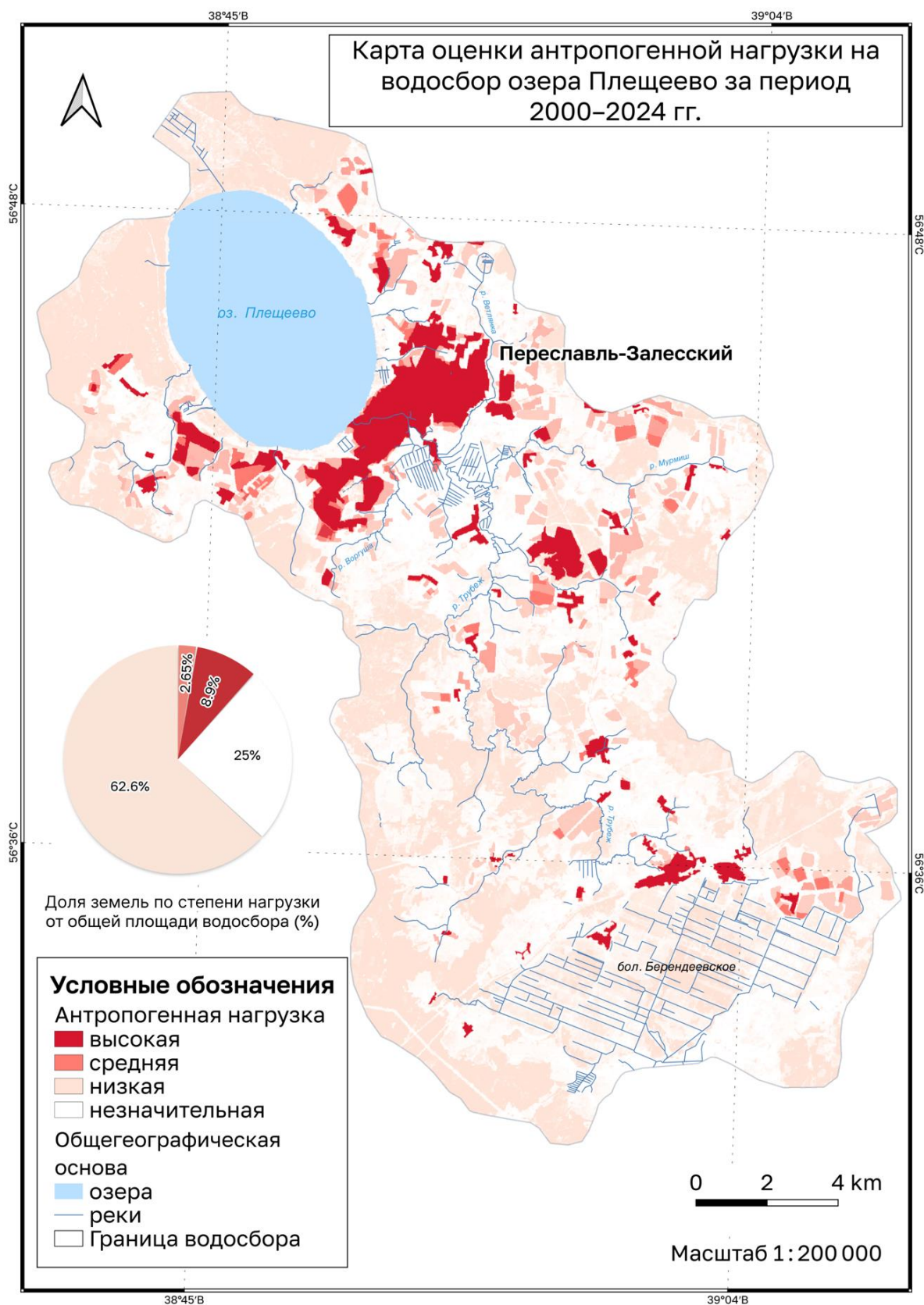


Рис. 8. Карта оценки антропогенной нагрузки на водосбор озера Плещеево за период 2000–2024 гг.
Fig. 8. Map of Anthropogenic Pressure Assessment on the Pleshcheyevo Lake Watershed for the Period 2000–2024.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» <https://rgo.ru/>.

Автор выражает благодарность научному руководителю, доктору географических наук, профессору Браткову В.В. за поддержку, руководство и ценные рекомендации при подготовке публикации.

Библиография

1. Геоэкология: учебник / В. В. Братков, Ш. Ш. Заурбеков, В. А. Мелкий, И. С. Вазарханов. - Москва: КНОРУС, 2023. - 282 с.

2. Авраменко, М. В. Загрязнение вод как фактор, влияющий на качество жизни населения / М. В. Авраменко, Е. О. Смирнова // Актуальные проблемы отраслевой юридической науки: Сборник научных трудов по итогам XII Международной научно-практической конференции и III Международной научно-практической конференции, Владимир, 29 ноября – 01 2023 года. – Владимир: ООО ТСК "Копиа-Сервис", 2023. – С. 172-176. – EDN PDCHWM.

3. Чугреев, М. К. Загрязнение Плещеева озера - потенциальная угроза охотничьим ресурсам и экосистеме водоёма / М. К. Чугреев, И. С. Ткачева, В. С. Воронцова // Инновационные исследования: проблемы внедрения результатов и тенденции развития: Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции в 2 частях, Саратов, 27 декабря 2022 года. Том Часть 2. – Стерлитамак: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2022. – С. 10-15. – EDN LELHGB.

4. Хачатуров, С. Х. Гидрологическая характеристика озера Плещеево. Предложения по ее улучшению / С. Х. Хачатуров // Экология и рациональное природопользование: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Ярославль, 12–16 сентября 2017 года. – Ярославль: Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, 2017. – С. 160-163. – EDN ZICXVZ.

5. Асмус Василий Валентинович, Бучнев Алексей Александрович, Пяткин Валерий Павлович Кластерный анализ в обработке данных дистанционного зондирования Земли // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Пленарное заседание. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klasternyy-analiz-v-obrabotke-dannyh-distantsionnogo-zondirovaniya-zemli> (дата обращения: 14.06.2025).

6. Russian forests and climate change. Леса России и изменение климата / ред. Leskinen P., Lindner M., Verkerk P. J., Nabuurs G. J., Van Brusselen J., Kulikova E., Hassegawa M., Lerink B.

– Joensuu: European Forest Institute, 2020. – 74 с. – (What Science Can Tell Us; 11). – ISBN 978-952-7426-00-5 (электронн.). – DOI: <https://doi.org/10.36333/wsctu11>

7. Христов К. И. Особенности строительства на склонах и сложных рельефах // Актуальные исследования. – 2021. – № 50 (77). – С. 35–38. – URL: <https://apni.ru/article/3399-osobennosti-stroitelstva-na-sklonakh-i-slozhn> (дата обращения: 17.06.2025).

Integrated Assessment of Anthropogenic Pressure on the Catchment of Lake Pleshcheyevo

George G. Shilov^{1*}

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

* kf.shilov@yandex.ru

Keywords anthropogenic pressure, Lake Pleshcheyevo, watershed, GIS modeling, remote sensing, retrospective analysis

Abstract The intensification of anthropogenic pressure on limited and unevenly distributed water resources necessitates a comprehensive assessment. GIS analysis of watersheds as integrated geosystems allows for the examination of major land use forms and types of anthropogenic impact at the regional level and over time, using remote sensing data. The object of this study is the Lake Pleshcheyevo basin — a unique natural-territorial complex located in the southern part of the Yaroslavl region, where economic and recreational human activities intersect, and which is currently experiencing negative anthropogenic changes as well as the influence of global climate trends, as evidenced by both qualitative and quantitative transformations of the natural environment within the basin. The study analyzes retrospective changes in the proportions of forested, agricultural, and residential lands, and includes a morphometric analysis based on a digital elevation model. The results are presented in the form of a map of anthropogenic pressure levels.

Acknowledgements

The research was carried out within the research project "Intellectual Guardian of the Pleshcheyevo Lake Heritage". The publication was carried out with the financial support of the Russian Geo-Geographical Society, an All-Russian public organization <https://rgo.ru>.

The author expresses his gratitude to the scientific supervisor, Doctor of Geographical Sciences, Professor Bratkov V.V. for the support of the research, guidance and valuable recommendations during the preparation of the publication.