

Г. Г. Шилов¹✉

Обоснование применения методов машинного обучения для целей геоэкологической оценки и картографирования водосборных бассейнов озер

¹Московский государственный университет геодезии и картографии,
г. Москва, Российская Федерация
e-mail: kf.shilov@yandex.ru

Аннотация. Современные исследования в области геоэкологии направлены на комплексный анализ состояния природных и антропогенно-преобразованных геосистем. Одним из инструментов анализа является геоэкологическая оценка, благодаря которой определяются уровни нарушенности и устойчивости экосистем разного уровня, выявляются ретроспективные изменения, экологические риски и строятся прогнозы. Функциональной основой подготовки и обработки исходных данных, в том числе данных дистанционного зондирования Земли, интерпретации результатов и выполнения пространственной визуализации в исследованиях служат геоинформационные системы. Интеграция методов машинного обучения в ГИС, в том числе технических средств на их основе, позволяет проводить моделирование и необходимые вычисления с высокой точностью, а также создавать экспертные системы для решения задач природопользования. Проведение геоэкологической оценки водосборных бассейнов равнинных озер обусловлено влиянием на всю территорию водосборов большинства форм взаимодействия человека с природой, а именно наличием промышленных и селитебных земель, земель сельскохозяйственного назначения, дорожной сетью, преобразованных грунтов и прочих источников деятельности человека, нарушающих естественную природную среду.

Ключевые слова: методы машинного обучения, геоэкологическая оценка, водосборные бассейны, тематическое картографирование, картографирование водосборов озер

G. G. Shilov¹✉

Methodological Rationale for Applying Machine Learning to the Geoecological Assessment and Mapping of Lake Watersheds

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation
e-mail: kf.shilov@yandex.ru

Abstract. Current research in geoecology focuses on the integrated analysis of natural and anthropogenically transformed geosystems. Geoecological assessment serves as a major analytical approach for determining ecosystem disturbance and stability levels, identifying retrospective changes and environmental risks, and developing forecasts. Geographic information systems (GIS) provide the functional framework for data preparation and processing – including Earth observation data – result interpretation, and spatial visualization. The integration of machine learning methods into GIS, along with related technical solutions, enables high-precision modeling and computation, as well as the development of expert systems for environmental management tasks. Geoecological assessment of the catchment areas of lowland lakes is driven by the wide influence of human–environment interactions across entire watersheds, including the presence of industrial and residential zones, agricultural lands, transport networks, altered soils, and other anthropogenic sources that disrupt natural ecosystems.

Keywords: machine learning methods, geoeological assessment, catchment basins, thematic mapping, lake watershed mapping

Введение

Внедрение методов автоматизированного и интеллектуального анализа и обработки данных в науках о Земле является успешной многолетней практикой. Тренд увеличения объемов эмпирических данных и данных мониторинга, дистанционного зондирования Земли и другой важной информации для геоэкологических исследований обуславливает потребность в усовершенствовании подходов к их систематизации, обработке и анализу, и характеризуется внедрением методов машинного обучения в методологию исследований, а также технических средств (модулей) на их основе, что позволяет значительно увеличить точность результатов, выявлять факторы и связи недоступные при использовании традиционных алгоритмов обработки [1].

В междисциплинарных исследованиях в области геоэкологии машинное обучение позволяет проводить многомерное моделирование природных процессов, ретроспективный анализ, интерполируя временные ряды данных для восстановления пропусков в них, выполнять прогнозирование с применением методов обучения с учителем или классифицировать изображение по эталонным участкам с применением различных моделей, а также строить высокоуровневые экспертные системы в области природопользования и управления природными ресурсами, и другие операции [2].

Водосборным бассейнам равнинных озер, в частности в Центральной России, характерны высокая пространственная, временная и качественная изменчивость ландшафтов в связи с возрастающей антропогенной нагрузкой на них, что требует своевременного анализа их состояния. Являясь сложными геосистемами и объединяя множество пространственно взаимосвязанных элементов – рельеф, застройка, лесная растительность, земли сельскохозяйственного назначения, дороги, линейная и площадная гидрография и другие, применение алгоритмов машинного обучения для целей геоэкологической оценки и картографирования обладает значительным потенциалом [3].

Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки и актуализации подходов к интеграции методов машинного обучения в комплексные геоэкологические исследования водосборных бассейнов озер.

Методы и материалы

В настоящей статье используется аналитико-сравнительный метод, применяемый для обзора и систематизации данных о применении методов машинного обучения для целей геоэкологической оценки и в смежных исследованиях.

Объектом интереса является водосборный бассейн озера Плещеево (Ярославская область), испытывающий интенсивные преобразования из-за роста антропогенной нагрузки [4].

Результаты

Геоэкологическая оценка и картографирование водосборных бассейнов озер может быть выполнено на основе ретроспективных данных дистанционного зондирования Земли, составленных из снимков миссий Landsat, а также климатических, социально-экономических и других статистических данных [5].

Космические снимки позволяют проводить комплексную оценку различных элементов геосистем, а использование алгоритмов машинного обучения в значительной степени расширяет возможности их обработки, обеспечивая высокую эффективность тематического картографирования. Применение алгоритмов машинного обучения широко распространено при решении задач классификации земного покрова, детерминации нарушенных участков, анализа структуры природных компонент и другое. В исследовании [6] приводится в пример эффективность модели MLP с достигнутой точностью 95,2%, с помощью которой выполнена классификация снимка территории фермерского хозяйства (рис. 1).

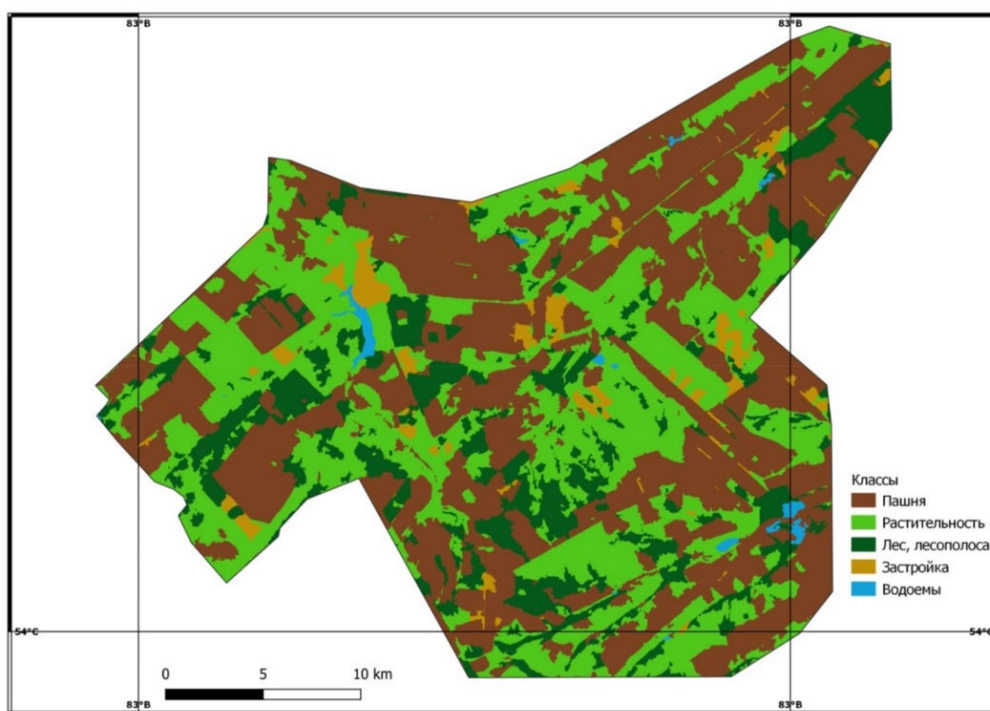


Рис. 3. Карта, демонстрирующая результат классификации с применением модели MLP [6]

На рисунке ниже (рис. 2) приведен пример выделения лесного покрова посредством классификации ретроспективных данных ДЗЗ космических аппаратов Landsat-5 и 8 с разрешением 30 метров на пиксел с помощью алгоритма k-means, выполненной в среде Google Earth Engine.

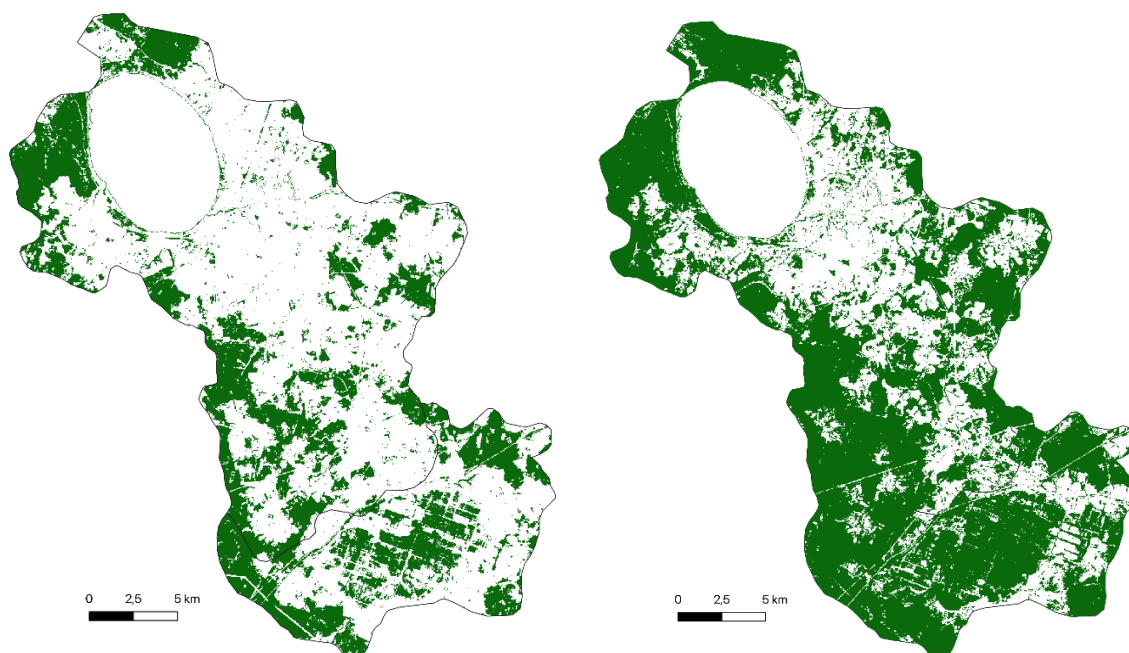


Рис. 2. Классификация космических снимков Landsat 5 и 8 (разрешение 30 м/пикс) с выделением лесного покрова на водосборе оз. Плесеево методом k-means (слева 2001 г., справа 2024 г.)

Климатические, социально-экономические и другие статистические данные составляют временные ряды с выраженными трендами. Результаты исследований [7] подтверждают высокую эффективность алгоритмов машинного обучения при анализе временных рядов статистических данных, например, при оценке уровня загрязнения воздуха применялась модель авторегрессивного интегрального скользящего среднего, известная еще с 1970-х гг., результаты прогнозирования которой отклоняются от исходных данных всего на 1% (рис. 3), и для анализа исходного набора данных в исследовании [8] среди применяемых моделей XGBoost признана самой точной и быстрой (время обучения и обработки) в группе лидеров. Полученные выводы позволяют заключить, что применение алгоритмов машинного обучения в геоэкологических исследованиях методологически обосновано.



Рис. 3. График предсказания, результат получен для модели ARIMA [7]

Таблица 1

Методы машинного обучения применяемые в геоэкологических исследованиях

Область применения	Метод
Обработка и анализ данных ДЗЗ	Random Forest (RF)
	Support Vector Machine (SVM)
	Gradient Boosting
	k-Nearest Neighbors
	k-Means
	MLP
Климатические, социально-экономические и другие статистические данные	LSTM (long short-term memory)
	GRU (gated recurrent unit)
	ARIMA
	XGBoost

Обсуждения

В ходе исследования установлено, что применение алгоритмов машинного обучения для разных типов данных в геоэкологических исследованиях повышает точность оценки, способствует выявлению закономерностей в пространственно-временной динамике природных систем и обеспечивает воспроизводимость результатов.

Заключение

Проведенный анализ подтвердил эффективность применения методов машинного обучения для геоэкологической оценки и картографирования водосборных бассейнов озер, что согласуется с результатами других исследований и подтвер-

ждает их методологическую обоснованность. Интеграция машинного обучения обеспечивает повышение точности, объективности и воспроизводимости оценок, а также формирует основу для разработки прогностических моделей состояния природных систем.

Благодарности

Автор статьи выражает искреннюю благодарность научному руководителю, профессору, д.т.н. О. Н. Николаевой за исключительное руководство и созидательные консультации в рамках работы над исследованием.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Слейман А., Козлов Д.В. Использование искусственных нейронных сетей для оценки поверхностного стока в расчетах водохозяйственного баланса бассейна реки Верхний Оронтес // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 21–37. DOI:10.35567/19994508-2024-3-21-37.
2. Shen, C. A trans-disciplinary review of deep learning research and its relevance for water resources scientists / C. Shen // Water Resources Research. – 2018. – Vol. 54, No. 11. – P. 8558–8593. – DOI: 10.1029/2018WR022643.
3. Власов Б. П., Витченко А. Н., Гагина Н. В., Грищенко Н. Д. Геоэкологическая модель оценки изменения природно-ресурсного потенциала антропогенно нарушенных озерных бассейнов (на примере озера Червоное) // Материалы Международной научно-практической конференции «Природные ресурсы Полесья : оценка, использование, охрана», г. Пинск, 8-11 июня 2015 г. Ч. 1. – Пинск : УО «Полесский государственный университет», 2015. – С. 61-65.
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. Силаев А. В., Семенов Ю. М., Семенов М. Ю. Основные подходы к геоинформационному моделированию экологического состояния бассейна оз. Байкал // Геоинформатика. – 2020. – Т. 4, № 26. – С. 46–59. – DOI 10.35595/2414-9179-2020-4-26-46-59.
6. Каличкин В.К., Гарафутдинова Л.В., Федоров Д.С. 2024. Применение геопространственного искусственного интеллекта для классификации изображений дистанционного зондирования. Региональные геосистемы, 48(4): 526–541. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-526-541.
7. Железный С. В. Использование методов машинного обучения для прогнозирования загрязненности атмосферного воздуха // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2019): сборник трудов конференции. – Самара : Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, 2019. – С. 1–8.
8. Альчаков, В. В.; Крамарь, В. А. Оценка методов машинного обучения для прогнозирования сезонных временных рядов // Известия ТТИ ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 250–263. – DOI: 10.18522/2311-3103-2023-2-250-263.

© Г. Г. Шилов, 2026