



МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ КАК ИНСТРУМЕНТ РЕГИОНАЛЬНОГО ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА (НА ПРИМЕРЕ г. МОСКВЫ)

Принята к публикации 15.07.2025

Опубликована 18.08.2025

Жидков Р.Ю.

Главный инженер отдела картографирования и ведения единой городской картографической основы ГБУ «Мосгоргеотрест», к. г.-м. н., г. Москва, Россия

Романова Е.Р.

Младший научный сотрудник лаборатории экзогенной геодинамики и анализа геологического риска Института геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия
romanova.elizaveta.r@yandex.ru

Абакумова Н.В.

Инженер первой категории лаборатории грунтоведения и технической мелиорации грунтов кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
abakumova.nv@mail.ru

Рекун В.С.

Инженер второй категории ГБУ «Мосгоргеотрест», г. Москва, Россия

Савченко Д.С.

Младший научный сотрудник лаборатории геокриологии Института геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия

Буфеев Ф.К.

Заведующий лабораторией исторических природно-технических систем и геоинформатики Института геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, к. г.-м. н., г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены возможности использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при инженерно-геологическом мониторинге регионального уровня на примере г. Москвы. Предлагается подход к выявлению областей проявления оползнеобразования, супфозии и осадок на основе спутниковых снимков из открытых источников и данных системы «Цифровой двойник». Показана эффективность комплексного анализа данных ДЗЗ и наземных наблюдений для оперативного управления георисками мегаполиса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

геориски мегаполиса; г. Москва; методы дистанционного зондирования Земли; инженерно-геологический мониторинг; региональный инженерно-геологический мониторинг; опасные геологические процессы; перемещение масс грунтов; насыпи; выемки; оползни; супфозия; осадки земной поверхности; изменение рельефа; спектральные индексы; комплексирование методов.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Жидков Р.Ю., Романова Е.Р., Абакумова Н.В., Рекун В.С., Савченко Д.С., Буфеев Ф.К. Методы дистанционного зондирования Земли как инструмент регионального инженерно-геологического мониторинга (на примере г. Москвы) // ГеоИнфо. 2025. Т. 7. № 2. С. 70–78. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-2-70-78.



EARTH REMOTE SENSING METHODS AS A TOOL FOR REGIONAL ENGINEERING-GEOLOGICAL MONITORING (BY THE EXAMPLE OF MOSCOW)

Accepted for publication 15.07.2025

Published 18.08.2025

Zhidkov R.Yu.

PhD, chief engineer at the Department of Mapping and Maintenance of the Unified City Cartographic Base, State Budgetary Institution "Mosgorgeotrest", Moscow, Russia

Romanova E.R.

Junior Researcher at the Laboratory of Exogenous Geodynamics and Geological Risk Analysis, Sergeev Institute of Geoecology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
romanova.elizaveta.r@yandex.ru

Abakumova N.V.

First Category Engineer at the Laboratory of Soil Science and Technical Soil Reclamation, Department of Engineering and Environmental Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
abakumova.nv@mail.ru

Rekun V.S.

Second category engineer at the State Budgetary Institution "Mosgorgeotrest", Moscow, Russia

Savchenko D.S.

Junior Researcher at the Laboratory of Geocryology, Sergeev Institute of Geoecology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Buфеев F.K.

PhD, the head of the Laboratory of Historical Natural-Technical Systems and Geoinformatics, Sergeev Institute of Geoecology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, Moscow, Russia

ABSTRACT

The paper considers the capabilities of using earth remote sensing data in engineering-geological monitoring at the regional level by the example of Moscow. An algorithm for identifying and predicting landslides, suffusion and subsidence was developed on the basis of satellite images from open sources and of materials from the "Digital Twin" system. The effectiveness of an integrated analysis of earth remote sensing and ground observation data for the operative georisk management in the megalopolis is shown.

KEYWORDS:

metropolis georisks; Moscow; earth remote sensing methods; engineering-geological monitoring; regional engineering-geological monitoring; hazardous geological processes; soil mass movement; embankments; excavations; landslides; suffusion; earth surface subsidence; relief changes; spectral indices; integration of methods.

FOR CITATION:

Zhidkov R.Yu., Romanova E.R., Abakumova N.V., Rekun V.S., Savchenko D.S., Buфеев F.K. Metody distantsionnogo zondirovaniya Zemli kak instrument regional'nogo inzhenerno-geologicheskogo monitoringa (na primere g. Moskvy) [Earth remote sensing methods as a tool for regional engineering-geological monitoring (by the example of Moscow)] // Geoinfo. 2025. T. 7. № 2. S. 70–78. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-2-70-78 (in Rus.).

Введение ►

Инженерно-геологический мониторинг (ИГМ) служит фундаментальной основой для обеспечения безопасности и устойчивости инженерных сооружений и территорий в условиях воздействия опасных геологических процессов. Его ключевая задача – систематическое наблюдение за состоянием геологической среды (грунтовых массивов, подземных вод) и инженерных конструкций с целью своевременного выявления и прогнозирования развития неблагоприятных процессов, таких как оползни, карст, суффозия, осадки грунтов.

Классические методы ИГМ, базирующиеся на сетях наземных инстру-

ментальных наблюдений (с использованием геодезических реперов, пьезометрических установок, инклинометров и др.) и на визуальных обследованиях, обеспечивают высокую локальную точность, но сталкиваются с существенными ограничениями. К последним относятся высокая трудоемкость и стоимость регулярных полевых работ, ограниченный пространственный охват (дискретный характер данных), сложность мониторинга обширных или труднодоступных территорий (горных районов, зон активных оползней), а также запаздывание в получении информации о развитии процессов на всей контролируемой площади.

Развитие дистанционных методов зондирования Земли (ДЗЗ) предоставляет инструментарий для преодоления этих ограничений. Это способствует переходу от реактивного подхода в мониторинге к проактивному – прогнозированию опасных процессов и превентивному управлению рисками. Методы дистанционного зондирования включают использование спутниковых снимков, аэрофотосъемки, лазерного сканирования и радиолокационных измерений. Применение технологий обработки изображений, таких как компьютерное зрение, и возможностей геоинформационных систем позволяет проводить комплексный анализ пространственно-

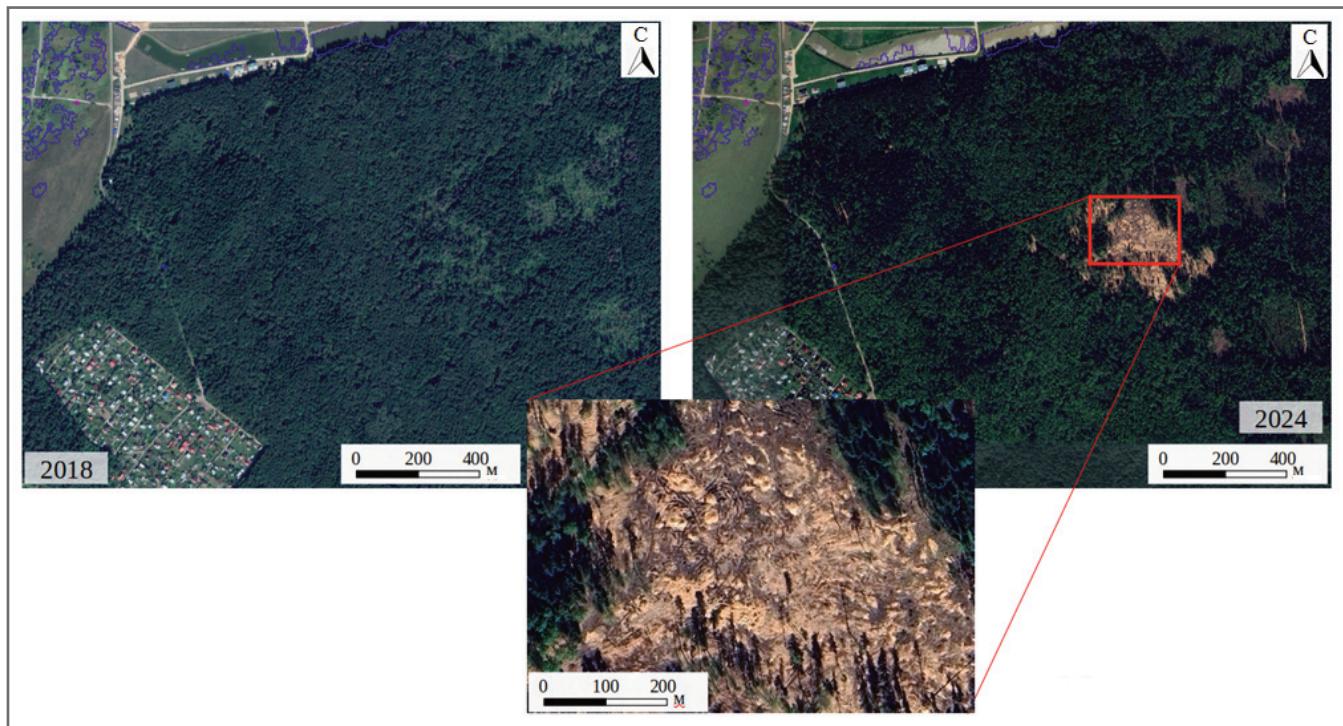


Рис. 1. Несанкционированный отвал строительных отходов в Троицком административном округе г. Москвы, идентифицированный по данным ДЗЗ

го распределения различных геологических явлений, выявлять зоны риска и оценивать потенциальные угрозы.

Согласно пособию [1] выделяется несколько уровней организации систем ИГМ – от детального (включающего наблюдения на конкретной строительной площадке, оползневом склоне и т.д.) до глобального (заключающегося в функционировании межгосударственных наблюдательных сетей и выявлении планетарных закономерностей). И если подходы к применению данных дистанционного зондирования для осуществления детального мониторинга описаны в таких публикациях, как [2–4], то региональный уровень, призванный обеспечить оценку изменений геологической среды территорий комплексного антропогенного освоения, представлен в научных публикациях слабо (в качестве редкого примера таких исследований можно привести мониторинг оползневой активности склонов в районе Большого Сочи, выполняемый специалистами Института физики Земли [5]).

Цели данного исследования – изучение потенциала применения методов ДЗЗ как инструмента регионального инженерно-геологического мониторинга на территории г. Москвы и оценка применимости общедоступных открытых данных для решения этой задачи. В качестве исходных материалов используются данные дистанционного зондирования, применяемые ГБУ «Мосгоргеотрест»

для создания информационной системы «Цифровой двойник г. Москвы».

Оценка изменений в условиях городской застройки ►

Развивая мысль академика В.И. Вернадского [6], можно сказать, что человек уже давно стал крупнейшей геологической силой. На городских территориях хозяйственная деятельность человека – основной фактор формирования и изменения массивов грунтов. В исследовании [7] показано, что объем техногенных грунтов в границах «Старой Москвы» (то есть без учета территорий, присоединенных к Москве в 2012 году, ранее относившихся к Московской области) составляет около 1,95 км³, а их мощность достигает 40 м, в среднем составляя порядка 2 м. В рамках настоящего исследования для изучения масштабов процесса техногенного перемещения грунтовых масс в пределах ТиНАО (Троицкого и Новомосковского новых округов г. Москвы) использовались данные дистанционного зондирования – результаты лидарной съемки высокого разрешения, полученные за период с 2019 по 2022 год, на основе которых были построены цифровые модели рельефа (ЦМР) в растровом формате с размером элементарной ячейки 4×4 м. Имея две и более таких ЦМР, можно провести анализ изменений, произошедших в исследуемый период. Выбор периода време-

ни в рамках этого исследования определялся фактором наличия данных (с 2023 года использование беспилотных летательных аппаратов на территории РФ имеет ограничения).

Для оценки баланса грунтовых масс за указанный период была разработана методика, заключающаяся в выявлении изменений по данным ЦМР. Были выделены участки с отрицательными изменениями рельефа (выемки) и насыпи мощностью не менее 1 м. Это позволило подсчитать суммарные объемы насыпей и выемок в каждом полигоне и оценить их соотношение.

Поскольку результаты любого из методов ДЗЗ могут иметь неточности и «артефакты», необходима тщательная проверка результатов. С помощью сервиса Google Earth Pro по данным спутниковых снимков за исследуемый период была произведена отбраковка таких участков. Несмотря на то что данные были предварительно обработаны, в ряде случаев за насыпи принимались построенные дома, за выемки – снесенные здания, вырубленные леса. Большое количество «артефактов» наблюдалось также вблизи водных объектов.

Результаты оценки показали, что объем насыпей превышает объем выемок в 2,5 раза. Такой дисбаланс обусловлен не только разуплотнением грунтов при выемке из тоннелей и котлованов, но и привозом грунта для пла-

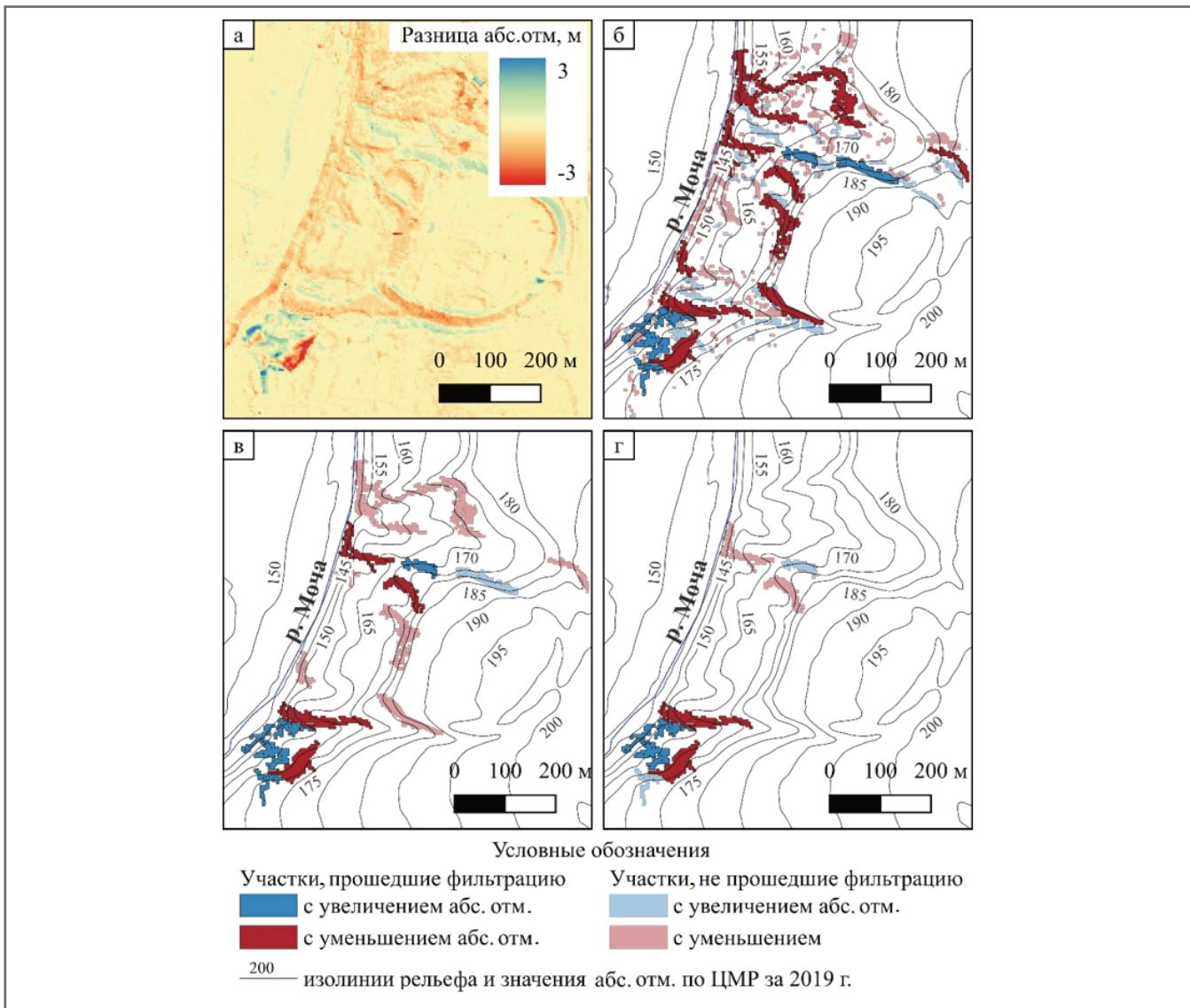


Рис. 2. Демонстрация методики поиска активных оползней по ЦМР: а – растр разности ЦМР за 2022 и 2019 год; б – фильтрация полигонов по площади; в – фильтрация по взаимной удаленности; г – фильтрация по перепаду абсолютных отметок

номерного возведения насыпей и песчаных подушек. Также следует учитывать несанкционированное перемещение земляных масс с территории старой части Москвы и Московской области (рис. 1).

Общий прирост техногенных накоплений грунтов на территории «Новой Москвы» за 2019–2022 годы составил 0,03 км³, что составляет около 1,5% от объемов, накопленных за многие столетия в границах «Старой Москвы».

Выявление активных оползневых участков ►

Среди природных факторов, определяющих перемещение масс грунтов, на территории ТиНАО наиболее существенен вклад оползневых процессов. Для поиска активных оползневых тел предложен следующий подход. В качестве интересующих участков рассматривались территории, имеющие

уклон не менее 5°, практически лишенные застройки, с захватом буферной зоны 100 м. Они были выбраны при помощи данных единой городской картографической основы (ЕГКО) г. Москвы и открытых веб-карт OpenStreetMap. Площадь исследуемой области составила 20,2 км². На основе ЦМР путем попиксельного вычитания были оцифрованы области, абсолютные отметки которых за исследуемый период изменились на 0,5 м и более (рис. 2, а). В результате было выделено 10 103 участка накопления и 10 208 участков уменьшения объема грунта.

Последующая методика исходит из представления об оползневом склоне как об области денудации (участка уменьшения абсолютных отметок), расположенной у бровки, и области аккумуляции (участка увеличения абсолютных отметок), расположенной у подош-

вы. Полигоны площадью менее 1000 м² были отфильтрованы (рис. 2, б), в результате чего выборка была сужена до 187 полигонов положительных и 269 полигонов отрицательных изменений рельефа. При дальнейшей обработке были удалены полигоны положительных и отрицательных изменений, находящиеся на расстоянии более 100 м друг от друга (рис. 2, в). В результате было получено 36 полигонов потенциальной аккумуляции и 31 полигон потенциальной денудации. Далее с использованием ЦМР за 2019 год были извлечены абсолютные отметки центроидов полигонов и оставлены только такие их пары, у которых абсолютные отметки полигона денудации превышают отметки полигона аккумуляции (рис. 2, г).

В результате были получены 13 полигонов потенциальной аккумуляции и 16 полигонов потенциальной денуда-

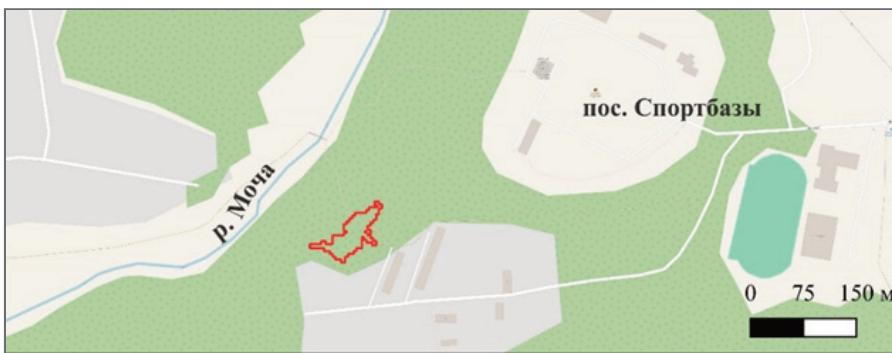


Рис. 3. Местоположение выявленного участка оползневой активности в районе п. Спортбазы в Троицком административном округе г. Москвы



Рис. 4. Последствия схода оползня в районе п. Спортбазы в Троицком административном округе г. Москвы (фото предоставлено ГПБУ «Мосэкомониторинг»)

крытии данных для выявления активных оползневых процессов. Была предпринята попытка охарактеризовать изменения рельефа земной поверхности на участках оползневых склонов г. Москвы с применением общедоступных глобальных цифровых моделей местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР). Обрабатывались следующие цифровые модели: CopernicusDEM30 (2011–2015 гг.); ALOS30DEM (2006 г.); SRTM 1 arc-second (февраль 2000 г.); FABDEM (ЦМР на основе ЦММ CopernicusDEM без зданий и растительности). Все эти модели имеют пространственное разрешение в средних широтах порядка 30 м [8].

В качестве источника информации об активных оползневых склонах использовалась карта современных геологических процессов и явлений в составе геологического атласа г. Москвы масштаба 1:10 000 в редакции 2012 года [9]. В легенде к этой карте выделены «глубокие оползни в юрских отложениях, которые разделены на активные и неактивные, а также показаны потенциально опасные склоны. Активность оползневых склонов на момент выпуска атласа охарактеризована по данным ОАО «Геоцентр-Москва», работам институтов геоэкологии и физики Земли РАН» [9]. Для оценки положения рельефа на начальный момент в качестве референсных моделей использовались ALOS30DEM и SRTM 1 arc-second, поскольку они были выпущены раньше, чем вышеуказанный атлас [9], ЦММ CopernicusDEM30 и ЦМР FABDEM. Отметим, что точность глобальных моделей не позволяет применять методику, описанную ранее для территории «Новой Москвы» с выделением фактических областей сноса и аккумуляции, а лишь дает возможность статистически охарактеризовать характер изменений в нижней и верхней частях оползневого склона. Из всех пар цифровых моделей ожидаемые результаты (уменьшение отметок рельефа в верхней части и увеличение в нижней) были получены при анализе моделей ALOS30DEM и FABDEM (таблица). При этом, учитывая что математическое ожидание величины меньше стандартного отклонения по выборке, можно сделать вывод, что общедоступные глобальные модели рельефа малоприменимы для целей анализа оползневой активности.

Таблица. Статистика изменений рельефа в границах оползневых участков г. Москвы в период с 2006 по 2011–2015 гг. по результатам сопоставления глобальных цифровых моделей ALOS30DEM и FABDEM

Наименование зоны по легенде геологического атласа [9]	Часть склона	Площадь зоны, м ²	Среднее изменение абсолютных отметок, м	Стандартное отклонение
Глубокие оползни в юрских отложениях (активные)	верхняя	286 905	-1,1	5,13
	нижняя	300 019	2,5	5,68
Глубокие оползни в юрских отложениях (неактивные)	верхняя	1 289 615	-1,6	5,83
	нижняя	1 164 178	0,5	5,79
Склоны, потенциально опасные в оползневом отношении	верхняя	282 808	-1,0	5,97
	нижняя	273 352	0,4	5,82

ции, расположенных на 11 участках. На этом этапе автоматизированной обработки был завершен, а ручная проверка с использованием ЦМР показала, что единственный оползневой склон,

который был активен в исследуемый период, располагается районе п. Спортбазы (рис. 3, 4).

В рамках исследования выполнялась оценка возможности использования от-

Использование данных аэрофотосъемки в видимом и инфракрасном диапазоне ►

Применение данных дистанционного зондирования в оптическом диапазоне (видимом и инфракрасном) потенциаль-



но может стать одним из ключевых инструментов для решения задач инженерно-геологического мониторинга, в том числе с использованием общедоступных данных. При этом с учетом масштаба задач регионального мониторинга и потенциально высокой частоты обновления информации (например, периодичность съемки земной поверхности спутниками LandSat 4–9 равна 16 суткам) целесообразна разработка методологии оперативного отслеживания динамики инженерно-геологических процессов и техногенных изменений с применением компьютерных алгоритмов.

Картирование каких-либо объектов по снимкам сводится к задаче семантической сегментации, то есть к разделению изображения на группы пикселей. В автоматизированном режиме такая задача может решаться с использованием методов машинного обучения и компьютерного зрения. Однако в зависимости от характера идентифицируемого процесса требуется различный набор исходных данных и должны применяться разные подходы к их предобработке. Так, большие возможности для интерпретации открывает наличие ближнего инфракрасного диапазона. На основе его комбинации с другими каналами можно получить набор спектральных индексов, которые будут использоваться для решения задач сегментации изображений и классификации объектов.

Отражающие свойства поверхностей по-разному проявляются в видимом и тепловом или инфракрасном диапазоне. На этом основана теория применения спектральных индексов. Одним из са-

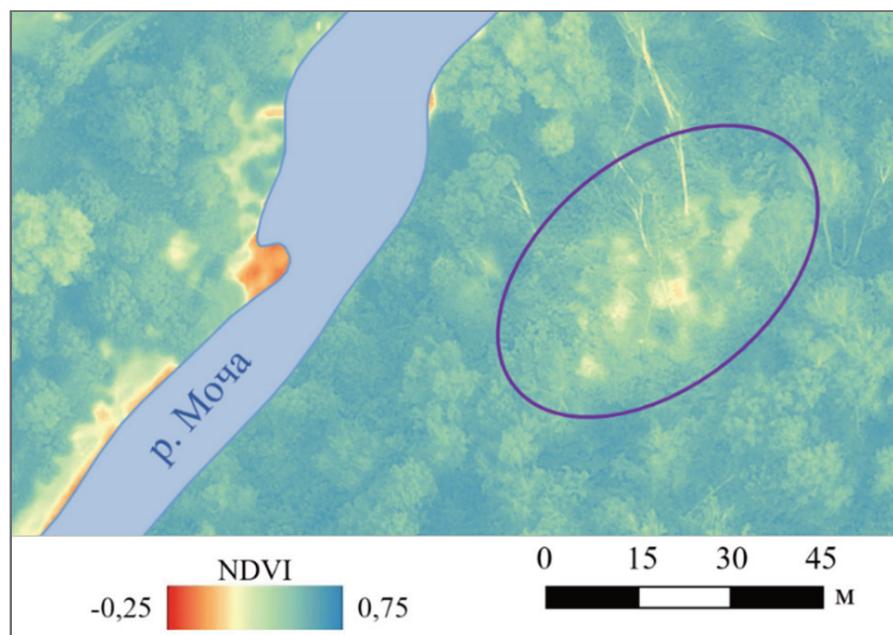


Рис. 5. Карта с отображением величин NDVI, на которой сиреневым овалом обведен участок с деградацией растительности в результате схода оползня в районе п. Спортивки

мых популярных является нормализованный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI), вычисляемый по формуле [10]:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}, \quad (1)$$

где NIR, Red – интенсивность отраженного света в инфракрасном и красном диапазоне соответственно.

Поскольку здоровые растения благодаря хлорофиллу хорошо поглощают красный свет и отражают ближний инфракрасный, то можно рассчитать соотношение, значения которого будут находиться в диапазоне от минус 1 до плюс 1: для объектов неживой природы

характерны значения от минус 1 до 0, а для растительности – от 0 до плюс 1. В этом свете утерянную значимость приобретает геоботанический метод, основанный на анализе состояния растительности как индикатора подповерхностных геологических условий. Его интеграция с дистанционными технологиями открывает новые возможности для идентификации и оценки динамики геологических процессов. Геоботанический метод предполагает выявление и изучение аномалий в развитии растений, связанных, например, с угнетением корневой системы в результате подтопления, с проявлением наклона стволов деревьев («пьяного леса») и гибели

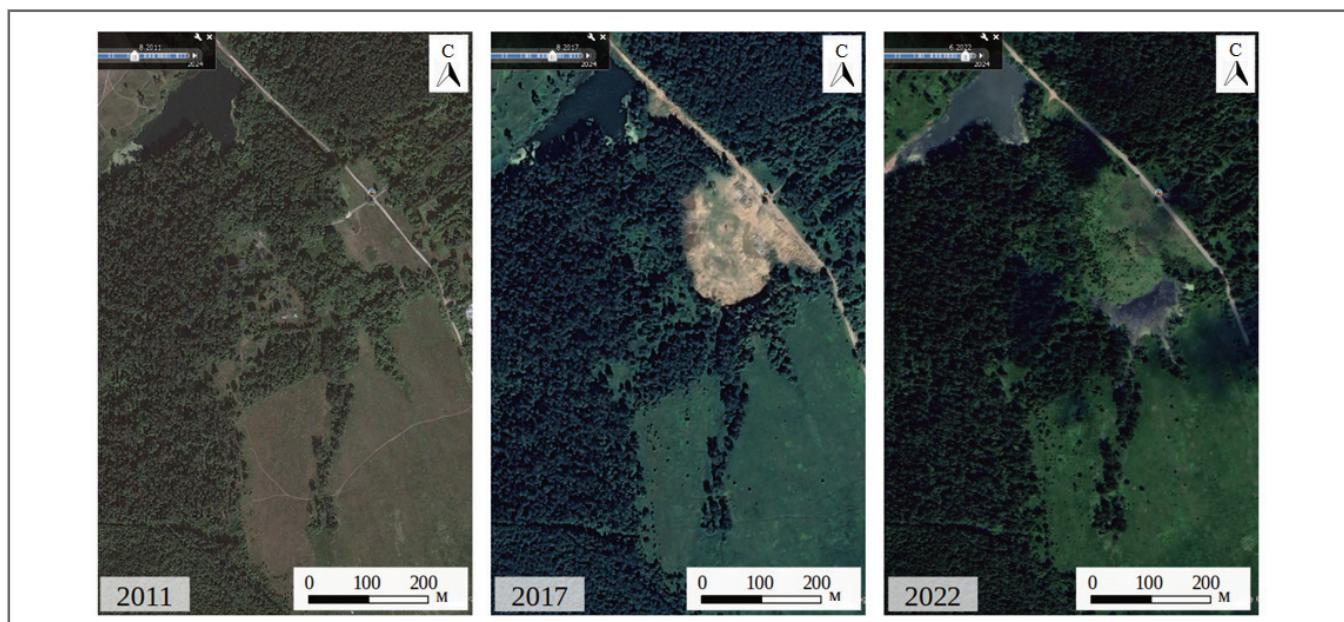


Рис. 6. Пример деградации растительности за счет препятствия движению поверхностных вод, появившегося после возведения насыпи

древостоя в результате действия оползневых процессов (рис. 5, 6).

Для выявления открытой воды в 1996 году был введен нормализованный водный индекс (Normalized Difference Water Index – NDWI [11]), значения которого также лежат в диапазоне от минус 1 до плюс 1: у воды и обводненных объектов – положительные значения, у остальных объектов – отрицательные. Принцип основан на том, что вода поглощает инфракрасный спектр и отражает зеленый, поэтому формула для расчета этого индекса выглядит следующим образом:

$$NDWI = \frac{\text{Green} - \text{NIR}}{\text{Green} + \text{NIR}}, \quad (2)$$

где Green, NIR – интенсивность отраженного света в зеленом и инфракрасном диапазоне соответственно.

Следует отметить, что застроенная земная поверхность выступает в качестве шума и тоже может иметь положительные значения, поэтому снимки нужно фильтровать от застройки. В остальном же использование этого индекса дает обнадеживающие результаты. На рисунке 7 показан заболоченный участок, который наглядно демонстрирует, что данный индекс является надежным инструментом для распознавания обводненных грунтов и «открытой воды».

Однако, чтобы определять глубину залегания уровня грунтовых вод, необходимую при построении карт подтопления, недостаточно ближнего инфракрасного диапазона. Для этого необходимо наличие теплового канала, а также других диапазонов инфракрасного спектра (коротко- и средневолнового). Примеры таких исследований приведены в работах [12–14].

Выявление площадных вертикальных смещений ►

Рассмотренное выше касалось вопросов перемещений грунта (техногенных или природных). Однако для целей мониторинга осадок земной поверхности точности лидарной съемки недостаточно. Большим потенциалом для выявления участков развития процессов в условиях городской застройки обладают методы спутниковой интерферометрии по данным съемок радиолокаторами с синтезированной апертурой (РЛСА).

Существует две группы интерферометрических методов. Первая (InSAR – радиолокационная интерферометрия с синтезированной апертурой) направлена на определение высот поверхности земли и создания цифровых моделей рельефа (ана-

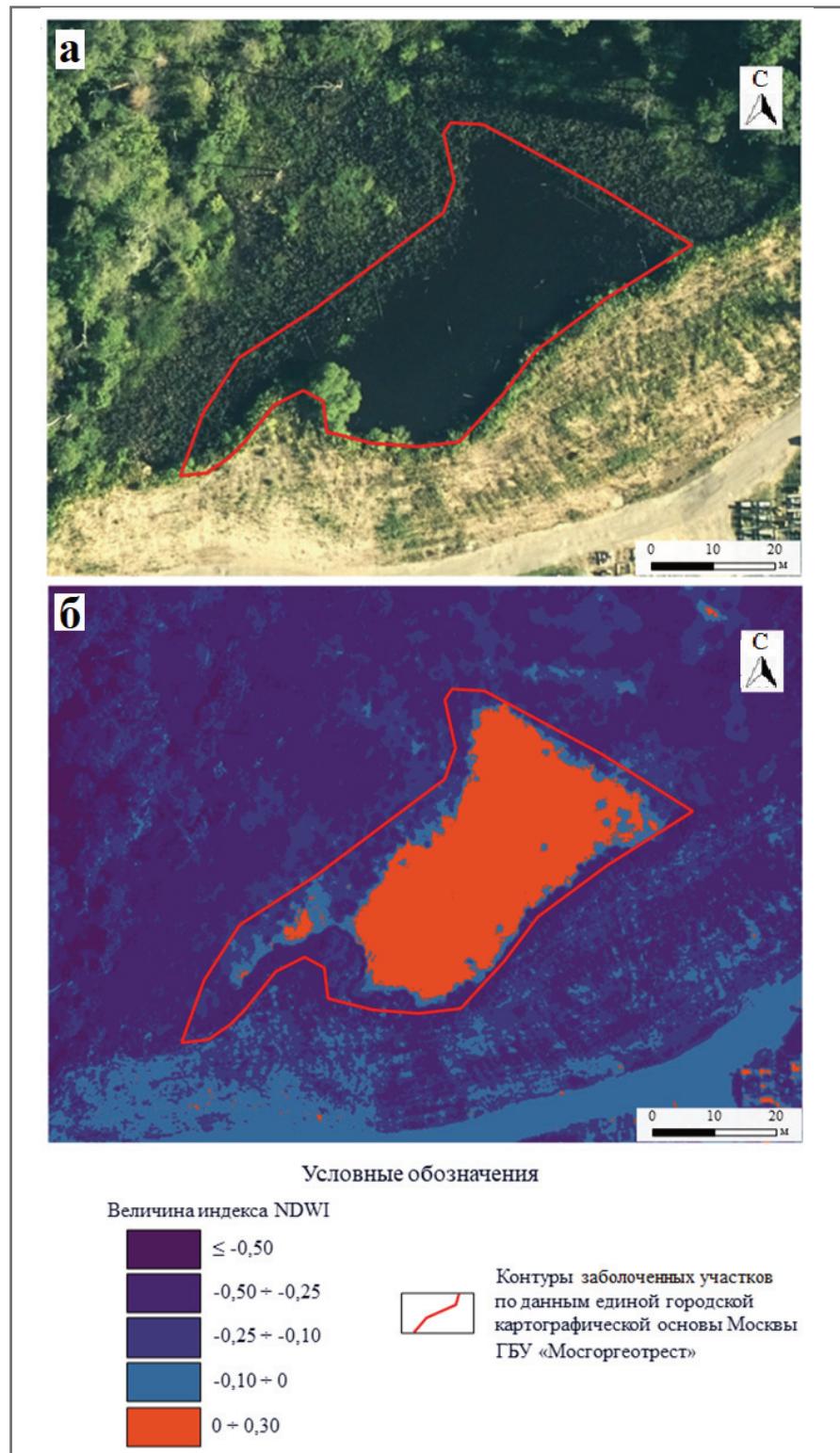


Рис. 7. Идентификация заболоченного участка, расположенного в Ульяновском лесопарке в Новомосковском административном округе (а), по нормализованному водному индексу NDWI (б), рассчитанному по изображению с ближним инфракрасным каналом

логично искусственно созданнию стереопар). Вторая (DInSAR – дифференциальная радиолокационная интерферометрия с синтезированной апертурой) включает в себя подходы к оценке изменений высот и выявлению участков проявления деформаций [15]. В последнее время технологии радиолокационной съемки активно разви-

ваются, выводятся на орбиту новые космические аппараты, повышается точность и улучшается пространственное разрешение данных [16], а кроме того, появляется новое программное обеспечение [17] для анализа таких данных.

Наибольший интерес для мониторинга смещений земной поверхности



вызывает разновидность дифференциальной интерферометрии – метод устойчивых отражателей. Его основная идея заключается в том, что расчет смещений выполняется по 15 и более снимкам за разные даты, причем обрабатывается не весь снимок, а пиксели с наименьшей дисперсией амплитуды и наибольшей когерентностью радиолокационного сигнала. Основное ограничение данного метода заключается в том, что из расчетов невозможно получить абсолютные вертикальные и горизонтальные смещения в трехмерном пространстве. Существует ряд подходов, позволяющих решить такую задачу, например использование съемок с различных точек обзора. Но наиболее достоверный способ – организация натурных наблюдений за смещениями для установления корреляционной связи между их вертикальной и горизонтальной составляющими на исследуемой территории. Этот метод хорошо себя зарекомендовал при анализе застроенных территорий, в частности при наблюдении за осадками крупных инженерных сооружений, линейных объектов. Кроме того, он широко применяется для мониторинга таяния ледников, выявления оползневых процессов,

осадок поверхности, вызванных проходкой горных выработок, откачкой нефти и т.д.

Заключение ►

Тема применения данных ДЗЗ для целей мониторинга перемещений грунтов и осадок грунтовых массивов многосторонна и перспективна. Показано, что результаты детальной лазерной съемки позволяют выполнять оценку баланса грунтовых масс, выявлять их несанкционированное накопление, отслеживать динамику формирования техногенных массивов и осуществлять мониторинг перемещения оползневых масс.

Применение общедоступных открытых ЦММ и ЦМР для этих целей ограничено их разнородностью, низким разрешением и отсутствием регулярного обновления. Тем не менее можно предположить, что по мере развития технологий и появления актуальных глобальных моделей рельефа комбинирование открытых данных за разные периоды времени с другими видами дистанционных данных в совокупности с применением методов машинного обучения позволят косвенно получать информацию об активности техногенных и природных процессов.

Необходимо помнить о том, что каждый из методов ДЗЗ имеет свои ограничения и свой диапазон применения. Следовательно, наиболее эффективно комплексирование различных методов ДЗЗ (оптической и лазерной съемки, интерферометрии), данных инструментального мониторинга, полевых геологических исследований. Для городских территорий и ответственных объектов целесообразна интеграция с общесистемными ресурсами и цифровыми двойниками городской среды.

Применение интерферометрических замеров для мониторинга осадок земной поверхности – одно из наиболее перспективных направлений, которое авторы планируют развивать в дальнейшем. Одним из возможных вариантов развития этого направления может стать мониторинг деформаций объектов культурного наследия, кровля которых покрыта материалами с высокой отражающей способностью. Добавить еще одно предложение: В качестве практического приложения результатов данного исследования авторы видят обновление карты распространения опасных процессов и явлений, входящих в состав Геологического атласа г. Москвы масштаба 1:10 000 [9] и расширение области картографирования за счет территории ТиНАО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ►

1. Королев В.А. Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем /под ред. В.Т. Трофимова. М.: Издательский дом МГУ, 2007. 415 с. ISBN 978-5-98227-268-3.
2. Баборыкин М.Ю., Жидиляева Е.В. Новые подходы в мониторинге опасных геологических процессов на трубопроводах // ГеоИнфо. 2022. № 9. С. 36-41.
3. Викторов А.С., Георгиевский Б.В., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н., Зверев А.В. Опыт дистанционного мониторинга опасных геологических процессов по трассе трубопроводных систем (Восточная Сибирь) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2018. № 6. С. 50–58. DOI 10.1134/S0869780318050095.
4. Дробинина Е.В., Китаева М.А., Романова Е.Р. Особенности мониторинга опасных инженерно-геологических процессов с применением геоинформационных систем и данных дистанционного зондирования Земли // Вестник Пермского университета. Геология. 2025. Т. 24. № 1. С. 23–31. DOI: 10.17072/psu.geol.24.1.23.
5. Смольянинова Е.И., Михайлов В.О. Мониторинг оползневой активности склонов в районе Большого Сочи за период 2015–2024 гг. по данным РСА-интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 1. С. 69–78. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-69-78.
6. Вернадский В.И. Несколько слов о ноосфере // Успехи совр. биол. 1944. Т. 18. Вып. 2. С. 113–120.
7. Жидков Р.Ю., Абакумова Н.В., Рекун В.С. Применение комплексного ретроспективного анализа при определении конфигурации массивов техногенных грунтов на примере г. Москвы // Инженерная геология. 2023. Т. 18, № 1. С. 19–34.
8. Данилов В.А., Морозова В.А., Фёдоров А.В., Шлапак П.А. Открытые данные дистанционного зондирования для выявления археологических объектов // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2024. № 3. С. 250–258.
9. Геологический атлас Москвы (в 10 томах). Масштаб 1:10 000. Пояснительная записка. М.: ГУП «Мосгоргеотрест», 2010. 57 с.
10. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite) // Proceedings of the 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium (SP-351). Greenbelt, MD, USA, 1973. P. 309–317.
11. McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // International Journal of Remote Sensing. 1996. Vol. 17. № 7. P. 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
12. Lendzioch T., Langhammer J., Vlcek L., Minarik R. Mapping the groundwater level and soil moisture of a montane peat bog using UAV monitoring and machine learning // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. № 5. ID 907. <https://doi.org/10.3390/rs13050907>.

13. Rohde M.M., Biswas T., Housman I.W., Campbell L.S., Klausmeyer K.R., Howard J.K. A machine learning approach to predict groundwater levels in California reveals ecosystems at risk // *Frontiers in Earth*. 2021. Vol. 9. ID 784499. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.784499>.
14. Stateczny A., Narahari S.C., Vurubindi P., Guptha N.S., Srinivas K. Underground water level prediction in remote sensing images using improved hydro index value with ensemble classifier // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. № 8. ID 2015.
15. Woodhouse I.H. *Introduction to microwave remote sensing*. Boca Raton: CRC press, 2017. 400 p. <https://doi.org/10.1201/9781315272573>.
16. Tsokas A., Rysz M., Pardalos P.M., Dipple K. SAR data applications in Earth observation: an overview // *Expert Systems with Applications*. 2022. Vol. 205. Article 117342. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2022.117342>.
17. Hryszewicz A., Wang X., Holohan E.P. EZ-InSAR: an easy-to-use open-source toolbox for mapping ground surface deformation using satellite interferometric synthetic aperture radar // *Earth Science Informatics*. 2023. Vol. 16. № 2. P. 1929–1945. DOI: 10.1007/s12145-023-00973-1.

REFERENCES ►

1. Korolev V.A. Monitoring geologicheskikh, litotekhnicheskikh i ekologo-geologicheskikh sistem [Monitoring of geological, lithotechnical and ecological-geological systems] / pod red. V.T. Trofimova. M.: Izdatel'skii dom MGU, 2007. 415 s. ISBN 978-5-98227-268-3 (in Rus.).
2. Baborykin M.YU., Zhidilyaeva E.V. Novye podkhody v monitoringe opasnykh geologicheskikh protsessov na truboprovodakh [New approaches to monitoring hazardous geological processes on pipelines] // *Geoinfo*. 2022. № 9. S. 36–41 (in Rus.).
3. Viktorov A.S., Georgievskii B.V., Kapralova V.N., Orlov T.V., Trapeznikova O.N., Zverev A.V. Opyt distantsionnogo monitoringa opasnykh geologicheskikh protsessov po trasse truboprovodnykh sistem ('Vostochnaya Sibir') [Experience in remote monitoring of hazardous geological processes along the pipeline system routes (Eastern Siberia)] // *Geohkologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2018. № 6. S. 50–58. DOI 10.1134/S0869780318050095 (in Rus.).
4. Drobina E.V., Kitaeva M.A., Romanova E.R. Osobennosti monitoringa opasnykh inzhenerno-geologicheskikh protsessov s primenieniem geoinformatsionnykh sistem i dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Features of monitoring hazardous engineering-geological processes using geoinformation systems and remote sensing data] // *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*. 2025. T. 24. № 1. S. 23–31. DOI: 10.17072/psu.geol.24.1.23 (in Rus.).
5. Smol'yaninova E.I., Mikhailov V.O. Monitoring opolznevoi aktivnosti sklonov v raione Bol'shogo Sochi za period 2015–2024 gg. po dannym RSA-interferometrii [Monitoring the landslide activity of slopes in the Greater Sochi area for the period of 2015–2024 on the basis of SAR interferometry data] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2025. T. 22. № 1. S. 69–78. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-69-78 (in Rus.).
6. Vernadskii V.I. Neskol'ko slov o noosfere [A Few Words about the Noosphere] // *Uspekhi sovr. biol.* 1944. T. 18. Vyp. 2. S. 113–120 (in Rus.).
7. Zhidkov R.Yu., Abakumova N.V., Rekun V.S. Primenenie kompleksnogo retrospektivnogo analiza pri opredelenii konfiguratsii massivov tekhnogenennykh gruntov na primere g. Moskvy [Application of comprehensive retrospective analysis in determining the configuration of technogenic soil masses by the example of Moscow] // *Inzhenernaya geologiya*. 2023. T. 18. № 1. S. 19–34 (in Rus.).
8. Danilov V.A., Morozova V.A., Fedorov A.V., Shlapak P.A. Otkrytie dannye distantsionnogo zondirovaniya dlya vyvayleniya arkheologicheskikh ob'ektorov [Open remote sensing data for identifying archaeological objects] // *Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Nauki o Zemle*. 2024. № 3. S. 250–258 (in Rus.).
9. Geologicheskii atlas Moskvy (v 10 tomakh). Masshtab 1:10 000. Poyasnitel'naya zapiska [Geological Atlas of Moscow (in 10 volumes). Scale 1:10,000. Explanatory Note]. M.: GUP «Mosgorgeotrest», 2010. 57 s. (in Rus.).
10. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite) // *Proceedings of the 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium (SP-351)*. Greenbelt, MD, USA, 1973. P. 309–317.
11. McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // *International Journal of Remote Sensing*. 1996. Vol. 17. № 7. P. 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
12. Lendzioch T., Langhammer J., Vlcek L., Minarik R. Mapping the groundwater level and soil moisture of a montane peat bog using UAV monitoring and machine learning // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. № 5. ID 907. <https://doi.org/10.3390/rs13050907>.
13. Rohde M.M., Biswas T., Housman I.W., Campbell L.S., Klausmeyer K.R., Howard J.K. A machine learning approach to predict groundwater levels in California reveals ecosystems at risk // *Frontiers in Earth*. 2021. Vol. 9. ID 784499. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.784499>.
14. Stateczny A., Narahari S.C., Vurubindi P., Guptha N.S., Srinivas K. Underground water level prediction in remote sensing images using improved hydro index value with ensemble classifier // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. № 8. ID 2015.
15. Woodhouse I.H. *Introduction to microwave remote sensing*. Boca Raton: CRC press, 2017. 400 p. <https://doi.org/10.1201/9781315272573>.
16. Tsokas A., Rysz M., Pardalos P.M., Dipple K. SAR data applications in Earth observation: an overview // *Expert Systems with Applications*. 2022. Vol. 205. Article 117342. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2022.117342>.
17. Hryszewicz A., Wang X., Holohan E.P. EZ-InSAR: an easy-to-use open-source toolbox for mapping ground surface deformation using satellite interferometric synthetic aperture radar // *Earth Science Informatics*. 2023. Vol. 16. № 2. P. 1929–1945. DOI: 10.1007/s12145-023-00973-1.