
Методология исследования геосистем Methodology of Geosystems Research

УДК 504.5+550.3

DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-3-591-603

EDN IFVAUV

Целевой эколого-геофизический комплекс диагностики загрязнения геологической среды в техногенных ландшафтах

Гусев А.П.

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,
Республика Беларусь, 246028, г. Гомель, ул. Советская, 104
andi_gusev@mail.ru

Аннотация. Цель исследований – разработка и апробация эколого-геофизического комплекса методов при решении геоэкологических задач. Состав целевого комплекса: электроразведка методом сопротивлений (вертикальное электрическое зондирование, электрическое профилирование, резистивиметрия) и методом естественного электрического поля, многозональная космическая съемка, наземная фитоиндикация. Методы комплекса дополняют друг друга и позволяют оперативно оценить состояние геологической среды. Решаемые комплексом задачи: картирование загрязнения компонентов геологической среды, определение направления движения загрязненных вод, определение источников загрязнения. Выявлены эмпирические взаимосвязи между геоэлектрическими параметрами и загрязнением компонентов геологической среды, между геоэлектрическими параметрами и экологическими индикаторами. Рассмотрены примеры применения целевого эколого-геофизического комплекса для изучения загрязнения в зонах влияния экологически опасных объектов (склад технического сырья, полигон твердых коммунальных отходов, коллектор ливневой канализации).

Ключевые слова: загрязнение геологической среды, целевой эколого-геофизический комплекс, электроразведка, удельное электрическое сопротивление, *NDVI*

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № X25Y3B-079).

Для цитирования: Гусев А.П. 2026. Целевой эколого-геофизический комплекс диагностики загрязнения геологической среды в техногенных ландшафтах. Региональные геосистемы, 50(3): 591–603. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-591-603 EDN: IFVAUV

Task-Specific Ecological-Geophysical Complex for Diagnosing Pollution of the Geological Environment in Technogenic Landscapes

Andrei P. Gusev

F. Skorina Gomel State University
104 Sovetskaya St., Gomel 246028, Republic of Belarus,
andi_gusev@mail.ru

Abstract. The objective of this research is to develop and test an ecological-geophysical complex of methods for solving geoecological problems. The target complex includes electrical prospecting using the resistivity method (vertical electrical sounding, electrical profiling, resistivity metering) and the natural electric field method, multi-zone satellite imaging, and ground-based phytoindication. The methods of the complex complement each other and allow for a rapid assessment of the state of the geological environment. The tasks solved by the complex include mapping the pollution of components of the geological environment, determining the direction of movement and contaminated water, and identifying pollution sources. We have established empirical relationships between geoelectric parameters and pollution of components of the geological environment, and between geoelectric parameters and environmental indicators. The paper describes examples of the application of the targeted ecological-geophysical complex to studying pollution in zones affected by environmentally hazardous facilities (a warehouse for industrial raw materials, a landfill for municipal solid waste, a storm sewer collector).

Keywords: pollution of the geological environment, task-specific ecological-geophysical complex, electrical exploration, specific electrical resistance, *NDVI*

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project No. X25UZB-079)

For citation: Gusev A.P. 2026. Task-Specific Ecological-Geophysical Complex for Diagnosing Pollution of the Geological Environment in Technogenic Landscapes. *Regional Geosystems*, 50(3): 591–603 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-3-591-603 EDN: IFVAUV

Введение

Геологическая среда представляет собой открытую термодинамическую систему, являющуюся важнейшей приповерхностной частью литосферы, от которой зависит жизнедеятельность человека и биосферы в целом. Состояние геологической среды можно рассматривать как интегральный показатель взаимодействия разнообразных природных и техногенных факторов и процессов. В качестве компонентов геологической среды выступают горные породы, подземные воды, природные газы, биота, а также физические поля [Королев, 2020].

Загрязнение геологической среды – острая экологическая проблема, которая в значительной степени проявляется на урбанизированных и промышленных территориях. Высокой актуальностью характеризуются технологии оперативной диагностики загрязнения геологической среды, среди которых важное место занимают геофизические методы. Анализ научной литературы показывает, что геофизические методы успешно используются при мониторинге утечек через дамбы хранилищ токсичных отходов, для изучения полигонов и свалок бытовых отходов, полигонов промышленных отходов, при исследовании засоления почв, для изучения нефтяного загрязнения [Гапонов, 2010; Федорова, Шестаков, 2011; Фоменко, 2016; Боровский и др., 2020; Оленченко и др., 2022; Sanuade, 2022; Давыдов, Горшков, 2022; Bernardo et al., 2022; Федорова, Горшков, 2023; Igboama et al., 2023; Мингалева и др., 2023; Nguyen et al., 2025; Зырянова и др., 2025]. Комплекс электроразведки и многозональной космической съемки использован для изучения химического загрязнения компонентов геологической среды в зоне влияния отвалов токсичных отходов и складов сырья химического производства минеральных удобрений [Гусев, 2023; 2024].

Основные преимущества геофизических методов: объективность информации о геофизических полях, создаваемых объектами и процессами геологической среды; объемность информации; возможность изучения подземных объектов и процессов на различных глубинах; относительно низкие затраты; возможность изучения без нарушения сплошности среды, без разрушения объектов исследований; возможность выполнять повторные наблюдения с нужной периодичностью; возможность дистанционных исследований; высокая производительность.

Целевой эколого-геофизический комплекс – комплекс методов, объединенных решаемой геоэкологической задачей. Формирование целевого эколого-геофизического комплекса при решении конкретной геоэкологической задачи учитывает: 1) детальность исследований; 2) временные ограничения исследований (сезон, сроки, оперативность); 3) разрешающую способность геофизических методов в приповерхностных условиях; 4) техногенные помехи и ограничения; 5) последовательность применения методов.

Цель наших исследований – разработка и апробация целевого эколого-геофизического комплекса методов при решении геоэкологических задач, связанных с диагностикой химического загрязнения компонентов геологической среды. В ходе исследований решались задачи: 1) изучение взаимосвязей между геоэлектрическими параметрами и загрязнением, между геоэлектрическими параметрами и экологическими показателями; 2) обоснование набора методов для оперативной диагностики загрязнения; 3) апробация целевого эколого-геофизического комплекса на экологически опасных промышленных объектах и городской территории.

Объекты и методы исследования

Район исследования – город Гомель (Республика Беларусь). Численность населения – 537 тыс. чел. На его территории расположены крупные предприятия – ОАО «Гомельский химический завод», ОАО «Гомсельмаш», ОАО «Гомельстекло», ОАО «Гомельдрев», Гомельский завод литья и нормалей, ОАО «Гомельстройматериалы» и другие. Гомель – крупный транспортный узел международного значения. Энергетический комплекс представлен ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2, а также котельными.

Верхняя часть геологического разреза (ВЧР) на территории района исследований представлена четвертичной системой (мощность 20–25 м). Четвертичные отложения сформированы среднелейстоценовыми водноледниковыми (мелко- и тонкозернистые пески) и моренными (супеси, суглинки с включениями гравия, гальки) породами. С поверхности залегают голоценовые и позднеплейстоценовые аллювиальные отложения (пески). Четвертичная система подстилается морскими отложениями палеогеновой системы (алевроиты, пески, песчаники, глины).

Объектами исследования являлись: зона влияния склада технического сырья (самородной серы); зона влияния полигона твердых коммунальных отходов (ТКО); коллектор ливневой канализации.

Методика исследований включала: геофизические исследования – электрическое профилирование (ЭП) и вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) методом сопротивлений, резистивиметрию вод и почвогрунтов, съемка методом потенциала естественного электрического поля (ЕП); магниторазведка; дистанционную и наземную фитоиндикацию. Дистанционная фитоиндикация основана на использовании вегетационного индекса (*NDVI*), который характеризует состояния растительного покрова [Гусев, 2020]. *NDVI* определяли на основе данных съемки спутников *Sentinel-2*. Наземная фитоиндикация выполнялась на пробных площадках. Определялись общее проективное покрытие растительности, виды-индикаторы, оценивалось жизненное состояние древесных насаждений. Для оценки жизненного состояния использовали индекс:

$$L_n = (100 \times n_1 + 70 \times n_2 + 40 \times n_3 + 5 \times n_4) / N,$$

где n_1 – количество здоровых деревьев; n_2 – количество ослабленных деревьев; n_3 – количество сильно ослабленных деревьев; n_4 – количество усыхающих деревьев; N – все деревья (включая сухостой) [Пугачевский и др., 2007].

С помощью дистанционной и наземной фитоиндикации выделялись техногенные модификации геосистем, характеризующие различные уровни химического загрязнения (ТМ-1, ТМ-2 и фоновая геосистема), оценивался экологический эффект загрязнения. Геофи-

зические работы проводились в пределах ареалов выделенных техногенных модификаций.

Для проведения геоэлектрических работ использована электроразведочная аппаратура *ERA-MAX*. Определение минерализации вод и удельного электрического сопротивления почв, грунтов и пород проводилось с помощью портативных резистивиметров. Для магнитометрической съемки использован протонный прецизионный магнитометр *G-857*. Для интерпретации результатов ВЭЗ использован программный продукт *IPI2Win*. Для обработки и атмосферной коррекции космических снимков, расчета вегетационных индексов, выделения ареалов техногенных модификаций использована геоинформационная система *QGIS*. Для статистической обработки – программы *MS Excel* и *STATISTICA*.

Результаты и их обсуждение

Наиболее важным геофизическим показателем, который может служить индикатором химического загрязнения компонентов геологической среды, является удельное электрическое сопротивление (УЭС). Известно, что УЭС воды зависит от ее минерализации и состава растворенных веществ, а УЭС рыхлых грунтов – от минерализации воды в порах и глинистости [Огильви, 1990]. Среди многочисленных и разнообразных работ в области инженерной и экологической геофизики отсутствуют работы по изучению взаимосвязи между УЭС и собственно экологическими показателями. На живые организмы влияет не само УЭС, а коррелирующее с ним содержание химических веществ (растворимых солей). Надежными экологическими показателями, тесно связанных с продуктивностью и фитомассой экосистем, являются вегетационные индексы, которые определяются на основе многозональной космической съемки. Среди вегетационных индексов наиболее популярен и понятен в интерпретации – нормализованный разностный вегетационный индекс (*NDVI*). На тестовом объекте (зона влияния отвалов фосфогипса [Гусев, 2023; 2024]) была изучена взаимосвязь между пространственными изменениями электрического сопротивления геологической среды на разных глубинах (коррелирует со степенью их химического загрязнения) и величин *NDVI*. Изменения сопротивления проводили по профилю, пересекающему зону загрязнения, вызванного поверхностным стоком с отвалов (минерализация 1300–3500 мг/дм³). ЭП выполнено на серии разносов питающие линии АВ (3, 10 и 30 м). Такие разносы определяют глубинность исследования от 0,15–0,4 до 3–7,5 м (от почвогрунтов до горизонта грунтовых вод включительно). Поскольку геологический разрез неоднороден по своим электрическим свойствам, то результатом измерений является кажущееся электрическое сопротивление (КЭС). Шаг профилирования – 30 м. Длина профиля 500 м. Расчет *NDVI* производился по серии космических снимков спутника *Sentinel-2* (август 2018, август 2020). Обнаружено, что в зоне загрязнения имеет место снижение КЭС относительно фона в 10 и более раз, которое проявляется по всей изучаемой глубине разреза, т.е. загрязнение охватывает почвогрунты, всю зону аэрации и грунтовый водоносный горизонт. Это подтверждается данными отбора грунтовых вод в скважине (расположена примерно в центре геоэлектрической аномалии), где отмечена минерализация 3–4 г/дм³. КЭС на всех разносах АВ положительно коррелируют с величиной *NDVI*. В зависимости от используемых снимков коэффициент ранговой корреляции Спирмена между *NDVI* и КЭС на разносе АВ = 30 м составляет 0,71–0,77 ($p < 0,01$), на разносе АВ = 10 м – 0,61–0,82 ($p < 0,01$), на разносе АВ = 3 м – 0,65–0,79 ($p < 0,01$), на разносе АВ = 1,5 м – 0,70–0,81 ($p < 0,01$).

Корреляционная связь между КЭС и *NDVI* объясняется на рис. 1. Эти два параметра зависят от содержания растворимых солей в верхней части разреза. Аномально низкие значения КЭС индицируют уровень загрязнения, вызывающий деградацию растительного покрова, проявляющуюся в его спектральных характеристиках.

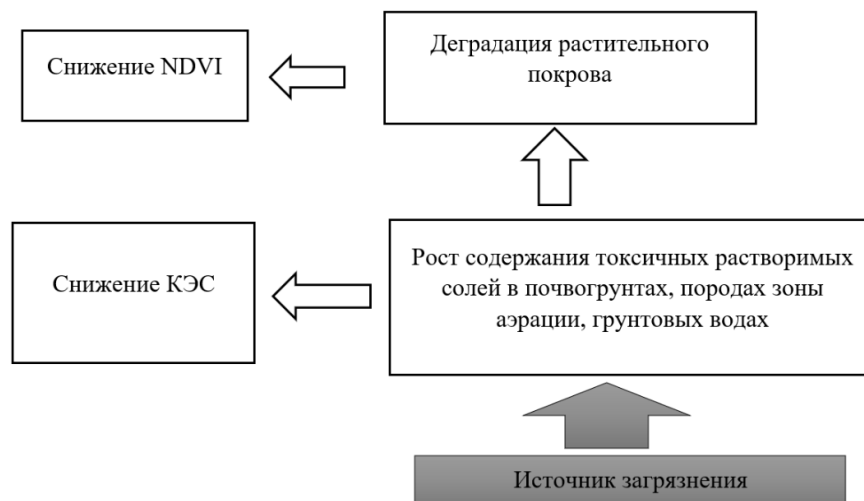


Рис. 1. Схема взаимосвязи кажущегося электрического сопротивления (КЭС) и *NDVI*
Fig. 1. Diagram of the relationship between apparent electrical resistivity (AER) and *NDVI*

Фитоиндикаторы (в данном случае *NDVI*) позволяют уточнить природу геоэлектрических аномалий. Так, например, электрическое сопротивление массива пород зависит от влажности, на которую влияет глубина залегания грунтовых вод. Увеличение влажности при подъеме уровня грунтовых вод к земной поверхности вызывает уменьшение величины изменяемого электрического сопротивления. Увеличение влажности само по себе, как правило, не влияет на проективное покрытие растительности (и на значения *NDVI*). Следует особо подчеркнуть, что связь *NDVI* – растительный покров – сопротивление почв и грунтов носит опосредованный и косвенный характер, может меняться в зависимости характера растительности, свойств почв, рельефа, сезона года и т.д.

Для изучения экологического значения УЭС как показателя техногенного засоления почв были выполнены исследования на улицах города Гомеля (обочины дорог, газоны, скверы) с помощью пробных площадок, на которых производилась серия измерений УЭС почв и оценка жизненного состояния деревьев (учитывались только лиственные деревья с диаметром не менее 10 см на уровне 1,5 м). Лесные геосистемы, находящиеся за городской чертой, были приняты за фоновые. Полученные для городских почв значения УЭС сопоставлялись с величиной индекса L_n . В результате исследований было показано, что УЭС почв отрицательно коррелирует с индексом L_n (коэффициент Спирмена составил 0,84 при $p < 0,0001$). То есть уменьшение сопротивления указывает на рост засоления, которое негативно влияет на древесные насаждения.

На основе изученных взаимосвязей обоснована возможность использования геоэлектрических параметров геологической среды для изучения химического загрязнения ее компонентов. В целевой эколого-геофизический комплекс были отобраны методы, дополняющие друг друга и позволяющие оперативно дать всестороннюю оценку загрязнения на урбанизированных и промышленных территориях. В комплекс включены: космическая многозональная съемка (индикатор – *NDVI*), наземная фитоиндикация (индикатор – проективное покрытие, индекс жизненного состояния древостоя); электроразведка (резистивиметрия, ЭП, ВЭЗ, ЕП). В качестве дополнительных методов – магниторазведка, капаметрия, термометрия. Рассмотрим применение данного целевого эколого-геофизического комплекса на следующих примерах.

Склад технического сырья. На прилегающей к складу серы (находится на территории промплощадки одно из крупнейших предприятия химической промышленности Беларуси) территории обнаружена деградация растительного покрова, вызванная вероятным загрязнением почв. Находящаяся на открытом воздухе сера окисляется, частично раство-

ряется осадками и в виде сульфатов мигрирует в грунтовые воды. Выделены техногенные модификации: ТМ-2 – участок с мозаичным тростниково-березовым фитоценозом; ТМ-1 – участок, с сильно деградированным растительным покровом. За фоновую геосистему принят соседний мелколиственный лес на дерново-глебовых супесчаных почвах, отделенный от техногенных модификаций насыпью железной дороги. Каждая техногенная модификация характеризуется определенным диапазоном величин *NDVI*. Наиболее низкие значения *NDVI* приурочены к участку ТМ-1 – в 2,25 раза ниже, чем в фоновой геосистеме (табл. 1). На участке ТМ-2 – в 1,33 раза. Загрязнение обнаруживается в поверхностных водах (лужи и канавы): в участке ТМ-1 минерализация вод в среднем составляет 7,25 г/дм³ (в 24,4 раза выше фона), а pH = 3–3,5 единицы. На участке ТМ-2 минерализация поверхностных вод превышает фон в 1,71 раза, pH = 5–5,5 единицы.

Таблица 1
Table 1

Изменения индикаторов по градиенту химического загрязнения
в зоне влияния склада серы (средние значения)
Changes in indicators along the chemical pollution gradient in the impact zone
of the sulfur storage facility (average values)

Показатель	ТМ-1	ТМ-2	Фоновая геосистема
<i>NDVI</i>	0,343	0,580	0,773
Минерализация поверхностных вод, мг/дм ³	7,250	0,509	0,297
УЭС почвогрунтов, Ом×м	4,0	70,4	720,5
КЭС (AB = 3 м), Ом×м	3,3	62,8	51,4
КЭС (AB = 10 м), Ом×м	2,9	23,0	31,1
КЭС (AB = 30 м), Ом×м	15,4	93,3	180,9

На основе ЕП и ВЭЗ были определены участки инфильтрации и разгрузки грунтовых вод, а также направление миграции загрязняющих вещества в ВЧР. В естественном электрическом поле повышенной инфильтрации с поверхности в грунтовые воды соответствуют отрицательные аномалии потенциала, а зонам разгрузки подземных вод – положительные аномалии потенциала [Огильви, 1990]. На участке ТМ-1 в ходе исследований обнаружена положительная аномалия потенциала ЕП, имеющая амплитуду до +15 мВ. Остальная территория характеризуется отрицательными значениями потенциала ЕП, т.е. здесь имеет место инфильтрация поверхностных вод в грунтовые воды. Таким образом, поток загрязняющих вещества на территории склада серы направлен в грунтовый водоносный горизонт. Загрязненные грунтовые воды разгружаются на участке ТМ-1 и вызывают засоление почвогрунтов, которое приводит к деградации растительного покрова (проявляется в значительном снижении величины *NDVI*). Для участка ТМ-2 характерна нисходящая инфильтрация осадков в грунтовые воды, и, как следствие, влияние загрязненных грунтовых вод на растительность проявляется слабо.

На рис. 2 показан разрез кажущегося электрического сопротивления, по которому прослеживается загрязнение зоны аэрации и грунтовых вод в зоне ТМ-1. Видно, что на участке ТМ-1 загрязнение, выраженное в низких значениях КЭС (менее 5 Ом×м), фиксируется по всему разрезу, охватывая как зону аэрации, так и грунтовый водоносный горизонт.

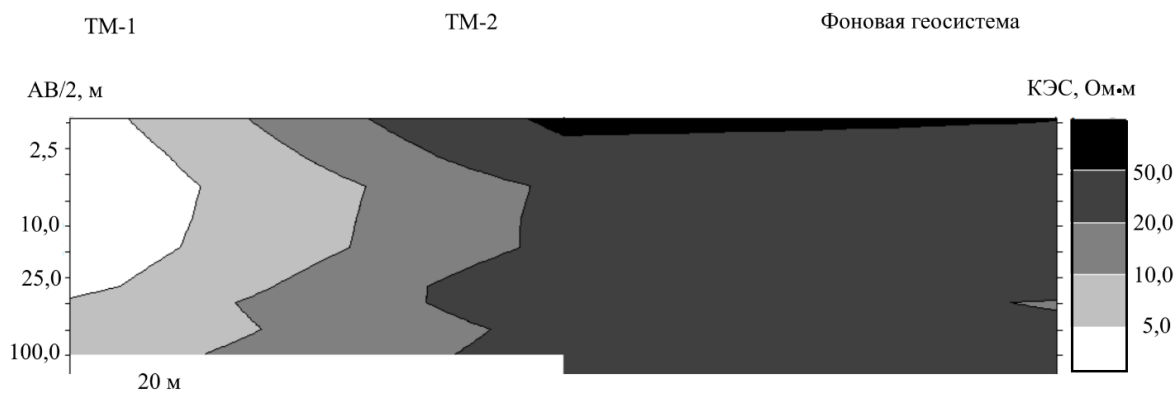


Рис. 2. Разрез кажущегося электрического сопротивления (КЭС) через зону влияния склада серы
Fig. 2. Apparent electrical resistivity (AER) section through the sulfur storage facility impact zone

На основе интерпретации кривых ВЭЗ установлено, что в зоне ТМ-1 геоэлектрический разрез характеризуется низким УЭС до глубины 16 м. На участке ТМ-2 загрязнение фиксируется в грунтовых водах, но отсутствует в зоне аэрации.

Комплексный анализ полученных результатов показывает, что загрязняющие вещества с поверхности на участке склада серы поступают в грунтовые воды. Поток загрязненных грунтовых вод направляется к зоне разгрузки (участок ТМ-1), где загрязненные грунтовые воды подходят к земной поверхности и вызывают деградацию растительности. На участке ТМ-2 загрязняющие вещества мигрируют в грунтовом водоносном горизонте, а к поверхности (корнеобитаемому слою почв) не подходят. Это объясняет незначительные нарушения растительности.

Полигон ТКО. Складирование ТКО вызывает развитие негативных процессов в сопредельных геосистемах. На примере Гомельского полигона ТКО показаны особенности распространения загрязнения фильтрационными водами с отвалов. Вблизи отвалов за счет избыточного поверхностного стока развивается процесс подтопления территории, под воздействием которого на месте смешанного лиственного леса сформировались техногенные модификации: ТМ-2 – зона умеренного подтопления (ухудшение жизненного состояния древостоя); ТМ-1 – зона сильного подтопления (массовое усыхание древостоя). Ареалы распространения техногенных модификаций определяются по величине *NDVI* (табл. 2). На участке ТМ-1 среднее значение *NDVI* снижается в 1,83 раза, в зоне ТМ-2 – в 1,16 раза по сравнению с фоновой геосистемой. По данным резистивиметрии минерализация поверхностных вод (лужи) на участке ТМ-1 значительно увеличивается (в 6,24 раза по сравнению с фоновой геосистемой).

Таблица 2
Table 2

Изменения индикаторов по градиенту подтопления загрязненными водами
в зоне влияния полигона ТКО (средние значения)
Changes in indicators along the chemical pollution gradient
in the solid waste landfill impact zone (average values)

Показатель	ТМ-1	ТМ-2	Фоновая геосистема
<i>NDVI</i>	0,480	0,760	0,880
<i>L_n</i> , балл	12,7	60,5	91,0
Минерализация поверхностных вод, мг/дм ³	1,060	0,464	0,170
УЭС почвогрунтов, Ом×м	5,8	183,3	1924,1

Резистивиметрические исследования почв и ЭП на разносах АВ = 3, 10, 30 м выявили закономерные изменения кажущегося электрического сопротивления по градиенту воздействия. Для зоны ТМ-1 характерно значительное снижение средней величины УЭС почв (в 331,7 раза) и КЭС на всех используемых разносах (рис. 3). В наибольшей степени различия проявляются на небольшой глубине (на разноте АВ = 3 м, что соответствует глубинности исследований 0,3–0,75 м). Сравнение профилирований на разных разносах показывает, что в зоне ТМ-1 изменения КЭС с глубиной менее выражены: весь изученный разрез характеризуется относительно низкими КЭС. Таким образом, влияние загрязнения фиксируется как в зоне аэрации, так в грунтовом водоносном горизонте (на глубине, соответствующей разноте АВ = 30 м, которая составляет 3–7,5 м).

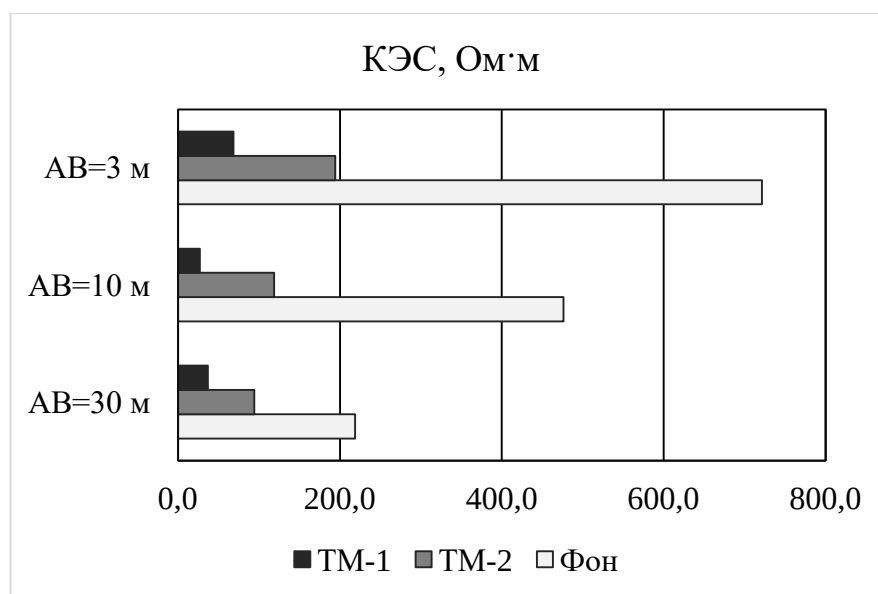


Рис. 3. Изменения КЭС на разной глубине в зоне влияния полигона ТКО
Fig. 3. Changes in the AER at different depths in the impact zone of the solid waste landfill

Территории полигона ТКО выступает источником загрязнения, что отражается в геофизических полях. Так, территория полигона характеризуется хаотичными пилообразными колебаниями геомагнитного поля (амплитуда от десятков до нескольких сотен нТл), магнитной восприимчивости и УЭС почвогрунтов. Такая пространственная неоднородность этих параметров обусловлена замусоренностью верхней части зоны аэрации железными предметами. Колебания УЭС почвогрунтов обусловлены мозаичным микрорельефом и вариабельностью содержания водорастворимых компонентов. В среднем величина УЭС почвогрунтов на территории полигона в 10 раз ниже, чем в соседних лесных геосистемах (что указывает на высокую степень их засоления). Величина магнитной восприимчивости (зависит от содержания железа и положительно коррелирует с содержанием тяжелых металлов [Водяницкий, Шоба, 2015]) превышает фоновые значения в десятки раз. По данным опробования скважин на территории полигона минерализация грунтовых вод составляет 3–10 г/дм³ (химический состав хлоридно-натриево-карбонатный).

Таким образом, с территории полигона поллютанты поступают в грунтовые воды, которые разгружаются на земной поверхности на участке ТМ-1 и вызывают деградацию древесной растительности (индекс жизненного состояния древостоя снижается в 7,2 раза по сравнению с фоновой геосистемой). В зоне ТМ-2 воздействие токсичных грунтовых вод снижается и соответственно деградация древесной растительности проявляется в меньшей степени (индекс жизненного состояния снижается в 1,5 раза).

Коллектор ливневой канализации. Негативными последствиями утечек из коллектора являются: ухудшение санитарно-гигиенических показателей грунтовых и поверхностных вод; увеличение риска коррозии подземных сооружений; развитие процесса подтопления городской территории. Изучаемый коллектор ливневой канализации проходит через несколько жилых микрорайонов и промышленных зон, служит приемником условно очищенных сточных вод нескольких предприятий. По данным резистивиметрии минерализация воды в коллекторе в 1,65 раза выше фоновой, а УЭС береговых почв коллектора в 2,24 раза ниже, чем у фоновых водоемов. Токсичность воды проявляется в деградации древесной растительности на берегах водоема-отстойника (величина индекса L_n снижается до 35,0 баллов (в целом для участка L_n находится в пределах 50–80 баллов). Для локализации мест утечек были выполнены электроразведочные исследования по профилю вдоль коллектора. Выявлены отрицательные (пикеты 10–14) и положительные (пикеты 21–22 и 29) аномалии потенциала ЕП. Положительные аномалии отмечены в 1–2 точках и, вероятно, имеют техногенную природу. Отрицательная аномалия в поперечнике имеет около 20 м (рис. 4).

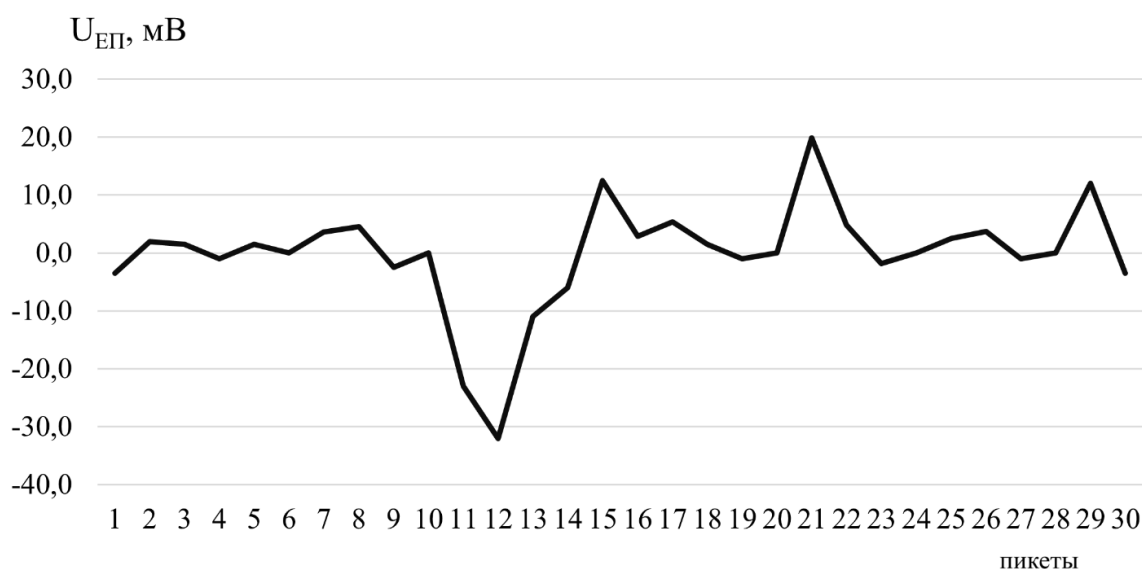


Рис. 4. Изменения потенциала ЕП вдоль коллектора ливневой канализации
Fig. 4. Changes in the potential of the natural electric field (NEF) along the storm sewer collector

На графике КЭС (разнос АВ = 10 м – соответствует глубинности исследования 1–2,5 м) в районе 10–14 пикетов имеет место существенного снижения КЭС до 39–85 Ом×м (рис. 5). Отрицательная аномалия потенциала ЕП и аномалия пониженного КЭС пространственно совпадают. Предполагается, что отрицательные аномалии ЕП, имеющие геофильтрационное происхождение, указывают на инфильтрацию поверхностных вод в грунтовый горизонт [Огильви, 1990]. Интерпретация графика ЕП показывает, что глубина возмущающего объекта составляет примерно 3,6–5,0 м. Снижение КЭС может объясняться как увеличением влажности, так и увеличением минерализации фильтрующейся воды. Сопряженные в пространстве снижение КЭС и отрицательная аномалия ЕП обусловлены инфильтрацией воды из коллектора в грунтовый водоносный горизонт на данном участке.

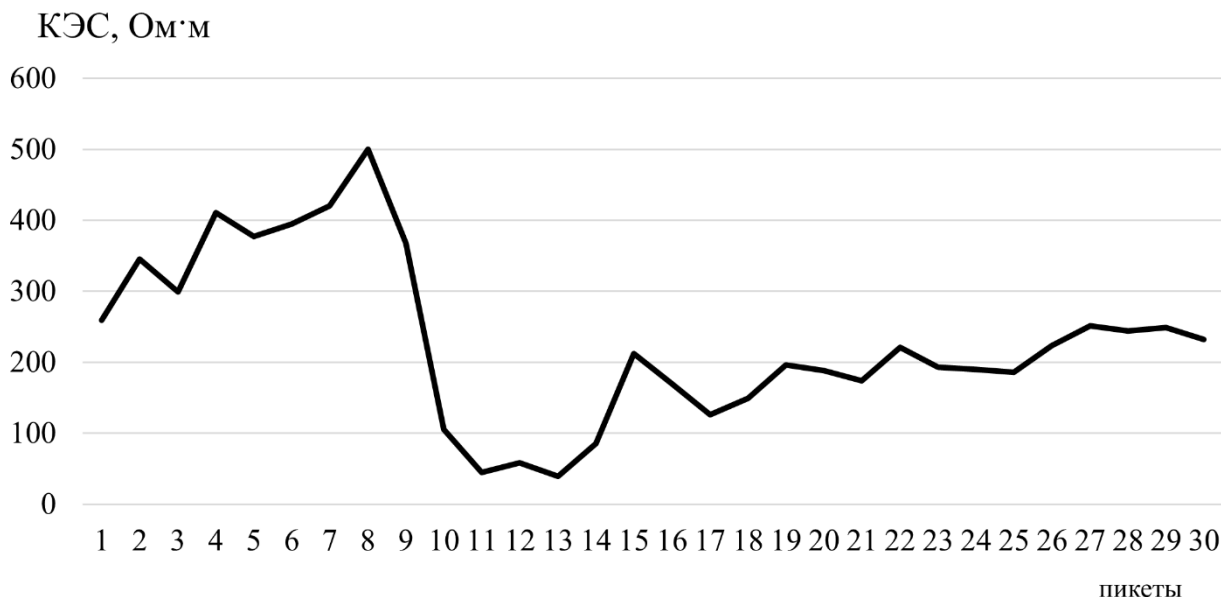


Рис. 5. Изменения кажущегося электрического сопротивления ($AB = 10$ м)
вдоль коллектора ливневой канализации
Fig. 5. Changes in apparent electrical resistance ($AB = 10$ m) along a sewer collector

Таким образом, утечки коллектора ливневой канализации фиксируются по изменениям УЭС и ЕП в зоне его влияния. Установлено, что такие аномалии имеют в поперечнике ширину в первые десятки метров, сопряжены друг с другом в пространстве, амплитуда изменения ЕП составляет 10–30 мВ, КЭС снижается в 3,5–6 раз соседних участков.

Заклучение

Таким образом, разработанный целевой эколого-геофизический комплекс позволяет оперативно получить достаточно полную характеристику загрязнения геологической среды:

- с помощью наземной фитоиндикации и космической съемки выделить и картировать зоны техногенной трансформации, дать экологическую оценку процессам загрязнения;
- по результатам резистивиметрии и ЭП на малых разносах ($AB = 3, 10$ м) изучить особенности загрязнения поверхностных вод, почвогрунтов и зоны аэрации, уточнить пространственную структуру загрязнения;
- по данным метода потенциала ЕП определить особенности питания и разгрузки грунтовых вод в зонах техногенной трансформации;
- по данным ВЭЗ и ЭП на разносе $AB = 30$ м оценить распространение загрязнения по ВЧР в глубину.

Областью применения целевого комплекса являются любые техногенные объекты, которые оказывают воздействие на геологическую среду, характеризующееся ростом минерализации вод и засолением почвогрунтов.

Список источников

- Огильви А.А. 1990. Основы инженерной геофизики. М., Недра, 501 с.
Фоменко Н.Е. 2016. Комплексирование геофизических методов при инженерно-экологических изысканиях. Ростов-на-Дону, Изд-во Южного федерального университета, 292 с.

Список литературы

- Боровский М.Я., Шакуро С.В., Борисов А.С., Богатов В.И. 2020. Полигоны твердых бытовых отходов и свалки как дополнительные источники углеводородного сырья и объекты экологического мониторинга. Управление техносферой, 3(2): 191–206. <https://doi.org/10.34828/UdSU.2020.26.81.003>
- Водяницкий Ю.Н., Шоба С.А. 2015. Магнитная восприимчивость как индикатор загрязнения тяжелыми металлами городских почв. Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение, 1: 13–20.
- Гапонов Д.А. 2010. Исследования полигонов и свалок: геофизические методы. Твердые бытовые отходы, 7(49): 38–41.
- Гусев А.П. 2020. Изменения NDVI как индикатор динамики экологического состояния ландшафтов (на примере восточной части Полесской провинции). Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 1: 101–107. <https://doi.org/10.17308/geo.2020.1/2667>
- Гусев А.П. 2023. Комплексирование космической съемки и геоэлектрических методов при диагностике химического загрязнения геологической среды. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология, 3: 133–140. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/133-140>
- Гусев А.П. 2024. Комплексирование геоэлектрических методов и дистанционного зондирования Земли при оценке состояния окружающей среды в зоне влияния экологически опасных объектов. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 335(10): 134–145. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/10/4528>
- Давыдов В.А., Горшков В.Ю. 2022. Геофизическое обследование плотины старого Демидовского завода. Уральский геофизический вестник, 1(47): 17–24. <https://doi.org/10.25698/UGV.2022.1.3.17>
- Зырянова Е.С., Елохина С.Н., Худяков А.А. 2025. Комплексирование геофизических методов при изучении ареала загрязнения подземных вод нефтепродуктами в пгт. Верх-Нейвинский. Известия Уральского государственного горного университета, 1(77): 104–115. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2025-1-104-115>
- Королев В.А. 2020. Экологическая геокибернетика. М., ООО «Сам Полиграфист», 440 с.
- Мингалева Т.А., Шакуро С.В., Сенчина Н.П., Егоров А.С. 2023. Применение RGB-синтеза для комплексной интерпретации данных геофизических методов при изучении территорий, загрязненных нефтепродуктами. Геосистемы переходных зон, 7(1): 75–85. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.075-085>
- Оленченко В.В., Бортникова С.Б., Девятова А.Ю. 2022. Применение электроразведочных методов при исследовании техногенных тел (складированных отходов горнорудной промышленности). Обзор. Геофизические технологии, 4: 23–40. <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2022-4-23>
- Пугачевский А.В., Кравчук Л.А., Судник А.В., Моложавский А.А. 2007. Методические подходы к оценке и картографированию состояния и устойчивости к антропогенным нагрузкам насаждений городов. Природные ресурсы, 3: 33–44.
- Федорова О.И., Горшков В.Ю. 2023. Геоэлектрический мониторинг состояния грунтовой плотины пруда-отстойника шахтных вод. Управление техносферой, 6(2): 205–221. <https://doi.org/10.34828/UdSU.2023.29.73.007>
- Федорова О.И., Шестаков А.Ф. 2011. Геоэлектрический мониторинг при инженерно-экологических исследованиях в районе накопителей промстоков. Разведка и охрана недр, 12: 51–56.
- Bernardo B., Candeias C., Rocha F. 2022. Integration of Electrical Resistivity and Modified DRASTIC Model to Assess Groundwater Vulnerability in the Surrounding Area of Hulene-B Waste Dump, Maputo, Mozambique. Water, 14(11): 1746. <https://doi.org/10.3390/w14111746>
- Igboama W.N., Aroyehun M.T., Amosun J.O., Ayanda O.S., Hammed O.S., Olowofela J.A. 2023. Review of Geoelectrical Methods in Geophysical Exploration. Nigerian Journal of Physics, 32(3): 141–158.

- Nguyen V.H., Germer J., Pham T.D., Asch F. 2025. Mapping Saline Groundwater Under Rice-Paddy Fields in Vietnam's Mekong Delta. *Near Surface Geophysics*, 23(2): 121–133. <https://doi.org/10.1002/nsg.70001>
- Sanuade O.A., Arowoogun K.I., Amosun J.O. 2022. A Review on the Use of Geoelectrical Methods for Characterization and Monitoring of Contaminant Plumes. *Acta geophysics*, 70: 2099–2117. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00858-9>

References

- Borovsky M.Ya., Shakuro S.V., Borisov A.S., Bogatov V.I. 2020. Solid Waste Landfills and Landfills as Additional Sources of Hydrocarbon Gas and Environmental Monitoring Facilities. *Management of the Technosphere*, 3(2): 191–206 (in Russian). <https://doi.org/10.34828/UdSU.2020.26.81.003>
- Vodyanitsky Yu.N., Shoba S.A. 2015. Magnetic Susceptibility as an Indicator of Heavy Metal Contamination of Urban Soils. *Moscow University Soil Science Bulletin*, 70(1): 10–16 (in Russian).
- Gaponov D.A. 2010. Issledovaniya poligonov i svalok: geofizicheskiye metody [Landfill and Dump Surveys: Geophysical Methods]. *Tverdye bytovyye otkhody*, 7(49): 38–41.
- Gusev A.P. 2020. NDVI Changes as an Indicator of the Dynamics of the Ecological State of Landscapes (on the Example of the Eastern Part of the Polesie Province). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 1: 101–107 (in Russian). <https://doi.org/10.17308/geo.2020.1/2667>
- Gusev A.P. 2023. Integration of Satellite Imagery and Geoelectric Methods in the Diagnosis of Chemical Pollution of the Geological Environment *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 3: 133–140 (in Russian). <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/133-140>
- Gusev A.P. 2024. Integration of Geoelectric Methods and Remote Sensing in Assessing the Environment State in the Area of Impact of Ecologically Hazardous Objects. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 335(10): 134–145 (in Russian). <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/10/4528>
- Davydov V.A., Gorshkov V.Yu. 2022. Geophysical Investigation of the Dam of the Old Demidov's Factory. *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik*, 1(47): 17–24 (in Russian). <https://doi.org/10.25698/UGV.2022.1.3.17>
- Zyryanova E.S., Elokhina S.N., Khudyakov A.A. 2025. Integration of Geophysical Methods in Studying the Area of Groundwater Pollution by Oil Products in Verkh-Neyvinsky Village. *News of the Ural State Mining University*, 1(77): 104–115 (in Russian). <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2025-1-104-115>
- Korolev V.A. 2020. *Ekologicheskaya geokibernetika [Ecological Geocybernetics]*. Moscow, Publ. Sam Poligrafist, 440 p.
- Mingaleva T.A., Shakuro S.V., Senchina N.P., Egorov A.S. 2023. Application of RGB-Synthesis for Complex Interpretation of Geophysical Data in the Study of Areas Contaminated by Oil Products. *Geosystems of Transition Zones*, 7(1): 75–85 (in Russian). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.075-085>
- Olenchenko V.V., Bortnikova S.B., Devyatova A.Yu. 2022. Application of Electrical Prospecting Methods for Technogenic Bodies (Stored Wastes of the Mining Industry) Studies: Review. *Russian Journal of Geophysical Technologies*, 4: 23–40 (in Russian). <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2022-4-23>
- Pugachevsky A.V., Kravchuk L.A., Sudnik A.V., Molozhavsky A.A. 2007. Metodicheskiye podkhody k otsenke i kartografirovaniyu sostoyaniya i ustoychivosti k antropogennym nagruzkami nasazhdeniy gorodov [Methodological Approaches to Assessing and Mapping the Condition and Resistance of Urban Plantings to Anthropogenic Loads]. *Prirodnyye resursy*, 3: 33–44.
- Fedorova O.I., Gorshkov V.Yu. 2023. Geoelectric Monitoring of the Ground Dam Condition of Mine Water Retention Pond. *Management of the Technosphere*, 6(2): 205–221 (in Russian). <https://doi.org/10.34828/UdSU.2023.29.73.007>
- Fedorova O.I., Shestakov A.F. 2011. Geoelectrical Monitoring in Engineering and Environmental Research in the Area of Industrial Wastewater Stores. *Prospect and protection of mineral resources*, 12: 51–56 (in Russian).

- Bernardo B., Candeias C., Rocha F. 2022. Integration of Electrical Resistivity and Modified DRASTIC Model to Assess Groundwater Vulnerability in the Surrounding Area of Hulene-B Waste Dump, Maputo, Mozambique. *Water*, 14(11): 1746. <https://doi.org/10.3390/w14111746>
- Igboama W.N., Aroyehun M.T., Amosun J.O., Ayanda O.S., Hammed O.S., Olowofela J.A. 2023. Review of Geoelectrical Methods in Geophysical Exploration. *Nigerian Journal of Physics*, 32(3): 141–158.
- Nguyen V.H., Germer J., Pham T.D., Asch F. 2025. Mapping Saline Groundwater Under Rice-Paddy Fields in Vietnam's Mekong Delta. *Near Surface Geophysics*, 23(2): 121–133. <https://doi.org/10.1002/nsg.70001>
- Sanuade O.A., Arowoogun K.I., Amosun J.O. 2022. A Review on the Use of Geoelectrical Methods for Characterization and Monitoring of Contaminant Plumes. *Acta geophysics*, 70: 2099–2117. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00858-9>

*Поступила в редакцию 05.11.2025;
поступила после рецензирования 26.01.2026;
принята к публикации 02.03.2026*

*Received November 05, 2025;
Revised January 26, 2026;
Accepted March 02, 2026*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гусев Андрей Петрович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий кафедрой геологии и географии, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, г. Гомель, Беларусь

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Andrei P. Gusev, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Geology and Geography, F. Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus