Геоэкология

DOI: 10.35634/UdSU.2026.51.99.007

УДК 504.5+550.3

А. П. Гусев

ЦЕЛЕВОЙ ЭКОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ТЕХНОГЕННЫХ ГЕОСИСТЕМ [1]

Аннотация. Цель работы – обоснование целевого эколого-геофизического комплекса методов для решения геоэкологических задач, связанных с оценкой состояния геологической среды. Решаемые задачи: 1) изучение корреляционных взаимосвязей между геоэлектрическими, геохимическими и экологическими параметрами; 2) определение эффективных методов оперативной диагностики загрязнения; 3) применение целевого эколого-геофизического комплекса в техногенных геосистемах. Состав целевого комплекса: электроразведка (вертикальное электрическое зондирование, электрическое профилирование, резистивиметрия, метод естественного электрического поля), многозональная космическая съемка, наземная фитоиндикация. Выявлены эмпирические взаимосвязи между геоэлектрическими и экологическими параметрами. Рассмотрены примеры применения целевого эколого-геофизического комплекса на территории юго-востока Беларуси.

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

Для цитирования: Гусев А. П. Целевой эколого-геофизический комплекс оценки состояния геологической среды техногенных геосистем // Управление техносферой: электрон. журнал, 2026. Т.9. Вып.1. С. 101–114. DOI: 10.35634/UdSU.2026.51.99.007

Введение

Загрязнение геологической среды – острая экологическая проблема, которая в значительной степени проявляется на техногенно нарушенных ландшафтах. Высокую актуальность имеют исследования по разработке технологий оперативной диагностики загрязнения геологической среды.

[1] Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Х25УЗБ-079).

Анализ научной литературы показывает, что для изучения загрязнения геологической среды могут успешно использоваться геофизические методы. Так, электроразведочные методы применяют при изучении засоления почв и вод в аридных зонах [1, 2], при мониторинге утечек через дамбы хранилищ токсичных отходов [3, 4], а также для изучения полигонов и свалок бытовых отходов [5] и мониторинга состояния полигонов промышленных отходов [6, 7].

Геофизические методы обладают рядом преимуществ: возможность изучение без нарушения сплошности среды, без разрушения объектов исследований; объективность получаемой информации; пространственная объемность информации; возможность изучения подземных объектов, геологических и геохимических процессов на различных глубинах; относительно низкие затраты и высокая производительность; возможность повторных наблюдений в разных временных масштабах; возможность дистанционных исследований.

Целевой эколого-геофизический комплекс

Целевой эколого-геофизический комплекс – это комплекс геофизических методов, объединенных решаемой геоэкологической задачей. При разработке целевого эколого-геофизического комплекса для решения конкретной геоэкологической задачи необходимо учитывать: 1) пространственный масштаб и детальность работ; 2) временные особенности (сезон, сроки, оперативность); 3) эффективность геофизических методов в конкретных геологических условиях; 4) уровень техногенных и природных помех; 5) этапность в применении методов комплекса.

Цель работы – обоснование целевого эколого-геофизического комплекса методов для решения геоэкологических задач, связанных с оценкой загрязнения геологической среды. Решаемые задачи: 1) изучение корреляционных взаимосвязей между геоэлектрическими, геохимическими и экологическими

параметрами; 2) определение эффективных методов оперативной диагностики загрязнения; 3) применение целевого эколого-геофизического комплекса на промышленных и урбанизированных территориях.

В целевой эколого-геофизический комплекс отобраны методы, дополняющие друг друга и позволяющие оперативно дать всестороннюю оценку загрязнения на урбанизированных и промышленных территориях.

В комплекс включены:

1) электроразведка (резистивиметрия, электрическое профилирование и вертикальное электрические зондирование методом сопротивлений, метод естественного электрического поля);
2) космическая многозональная съемка (индикатор – вегетационный индекс NDVI);
3) наземная фитоиндикация (индикаторы – проективное покрытие, индекс жизненного состояния древостоя Ln).

В качестве дополнительных методов могут использоваться магниторазведка, каппаметрия, термометрия, радиометрия.

По данным космической съемки с учетом наземной фитоиндикации выделяются техногенные модификации геосистем, характеризующие различные уровни химического загрязнения (ТМ-1, ТМ-2 и фоновая геосистема), оценивается экологический эффект загрязнения. Геофизические исследования выполняются в пределах ареалов выделенных техногенных модификаций. По возможности геофизические профили должны пересекать зоны техногенных модификаций и фоновую геосистему в сопоставимых условиях.

При выполнении работ в сложных природно-техногенных условиях рекомендуется следовать правилу 3 точек и 3 сигм при выявлении геофизических аномалий, использовать по возможности интегральные

параметры (например, поперечное сопротивление T и продольную проводимость S), изучать временную динамику геофизических полей.

Геофизические параметры как индикаторы загрязнения

Среди геофизических параметров важное индикационное значение для оценки загрязнения геологической среды имеет удельное электрическое сопротивление (УЭС). В ходе исследований уточнена связь УЭС с химическим загрязнением компонентов геологической среды, определены условия применимости УЭС для оценки, изучены взаимосвязи между УЭС и собственно экологическими показателями. Так, выяснено, что между УЭС почвогрунтов и минерализацией водных вытяжек из проб почвогрунтов имеется статистически значимая отрицательная корреляция (коэффициент Спирмена составил – 0,81 при $p<0,0001$). Изменчивость литологического состава верхней части разреза является фактором-помехой при геоэлектрической диагностике химического загрязнения. Для изучения этой проблемы были подвергнуты анализу результаты резистивиметрии почвогрунтов. Выборка УЭС почвогрунтов была разделена на три части: песок, супесь и суглинок. В каждой категории были выбраны загрязненные (на участке минерализация воды более 1 г/дм^3, имеются признаки деградации растительности или результаты химических анализов проб почв) и незагрязненные почвогрунты. Установлено, что в случае измерений УЭС в почвогрунтах при большой статистической выборке влияние загрязнения уверенно фиксируется при любом литологическом составе (рис. 1).

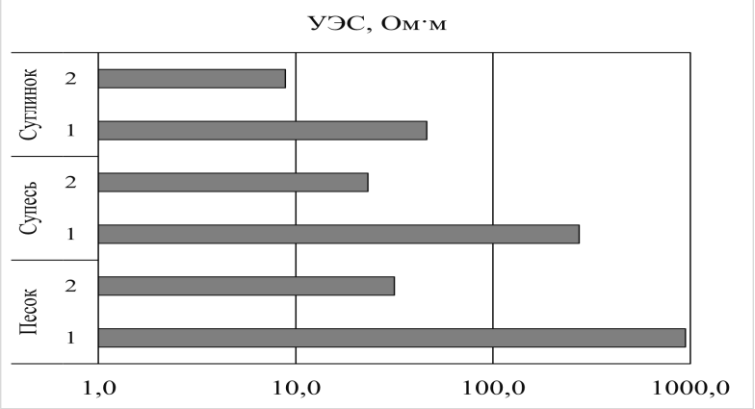


Рис. 1. Влияние литологии на различия УЭС загрязненных (1) и незагрязненных (2) почвогрунтов

В случае неоднородного по геоэлектрическим свойствам геологического разреза наиболее устойчиво и надежно определяемыми параметрами являются поперечное сопротивление высокоомных слоев T (T=ρ·h, где ρ·– УЭС слоя, h – мощность слоя) и продольная проводимость низкоомных слоев S (S=h/ρ) [8]. Для изучения влияния химического загрязнения на указанные геоэлектрические параметры был выбран тестовый объект – Гомельский химический завод. Здесь загрязнение геологической среды достаточно хорошо изучено в ходе геохимических, геоботанических, гидрогеохимических, геофизических исследований [6, 7]. Были отобраны точки ВЭЗ на участках, где имеются скважины на грунтовый, напорные подморенный и палеогеновый водоносные горизонты. По данным опробования скважин были получены значения минерализации вод соответствующих водоносных горизонтов. По данным ВЭЗ определены T и S зоны аэрации и верхней части разреза (ВЧР). Всего удалось сопоставить данные по минерализации подземных вод и геоэлектрические параметры T и S в 36 точках. Установлено, что T зоны аэрации имеют отрицательную корреляцию с минерализацией грунтовых вод. Эта взаимосвязь описывается степенным уравнением (коэффициент корреляции Спирмена составил – 0,708 при $p<0,0001$. Между S зоны аэрации и минерализацией грунтовых вод коэффициент корреляция – 0,578 при $p<0,01$.

Поперечное сопротивление T ВЧР отрицательно коррелирует с минерализацией первого от земной поверхности горизонта напорных подземных вод (коэффициент корреляции Спирмена составил – 0,609 при $p<0,001$). Продольная проводимость S ВЧР положительно коррелирует с минерализацией вод напорного горизонта (0,503 при $p<0,01$).

Экспресс-методом оценки уровня загрязнения почвогрунтов тяжелыми металлами является каппаметрия, основанная на измерении магнитной восприимчивости, которая зависит от концентрации ферромагнитных компонентов (железо, кобальт, никель). Доказано, что величина магнитной восприимчивости положительно коррелирует с содержанием тяжелых металлов [9].

Таким образом, геоэлектрические параметры и магнитная восприимчивость могут рассматриваться как надежные индикаторы загрязнения компонентов геологической среды.

Применение целевого эколого-геофизического комплекса

Полигон твердых отходов химического производства. Цель – картирование зоны химического загрязнения, оценка риска загрязнения подземных вод. Отвалы фосфогипса (образуется при производстве минеральных удобрений) являются источником загрязнения, формируемого сульфатами, фосфатами, фтор-ионом. Поверхностный сток с территории отвалов контролируется рельефом и направлен в близлежащую малую реку Рандовка. В ходе исследований на основе космической съемки (по изменению значений NDVI, которые зависят от степени деградации растительного покрова) и наземным геоботаническим наблюдениям выделены техногенные модификации исходной луговой геосистемы: ТМ-1 – зона сильного загрязнения; ТМ-2 – зона умеренного загрязнения. На основе резистивиметрии поверхностных вод и почв количественно оценена степень их загрязнения. Так, минерализация поверхностных вод в зоне ТМ-1 составляет до 5-10 г/дм^3, в зоне

ТМ-2 – до 2 г/дм^3. ЭП на серии малых разносов АВ=3, 10, 30 м выявило пространственные особенности засоления зоны аэрации и грунтовых вод, а ВЭЗ – более глубоких горизонтов (рис. 2).

Видно, что аномалия низкого УЭС (менее 10 Ом·м), индицирующая сильное загрязнение (в том числе увеличение минерализации грунтовых вод), на участке ТМ-1 распространяется до глубины 10 м. На участке ТМ-2 – до глубины 2-3 м. Это позволяет предположить, что миграция загрязняющих веществ к этому участку идет с поверхностным стоком, а загрязнение ниже грунтового водоносного горизонта отсутствует.

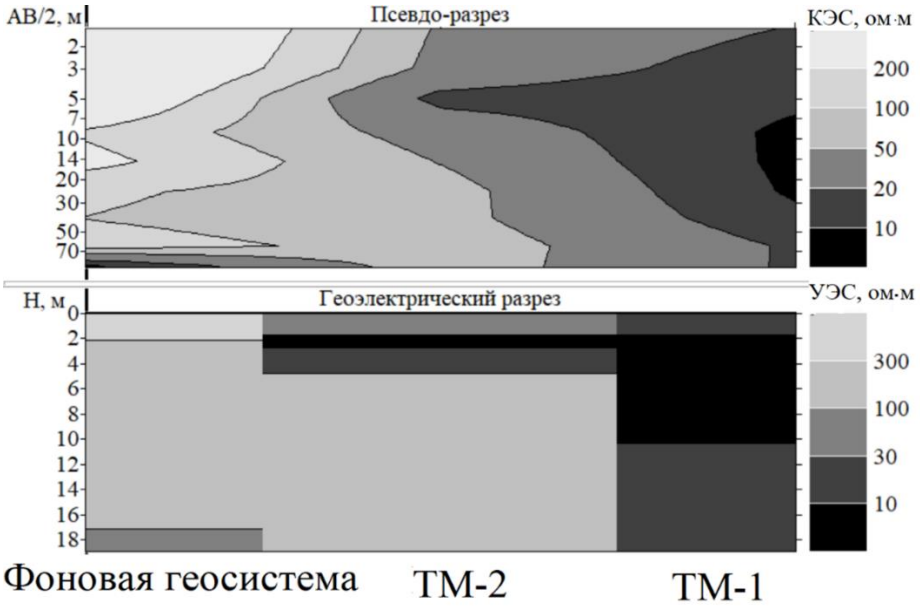


Рис. 2 Разрез КЭС и геоэлектрический разрез через зону влияния отвалов фосфогипса

Полигон твердых коммунальных отходов. Цель – картирование зоны влияния полигона ТКО на прилегающие лесные геосистемы, выяснение экологических последствий. Территория полигона выступает площадным источником загрязнения. По данным опробования скважин на территории полигона минерализация грунтовых вод составляет 3-10 г/дм^3 (химический состав хлоридно-натриево-карбонатный). В пределах полигона ТКО фиксируются хаотичные 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. УЭС почвогрунтов на территории полигона в 10 раз ниже, чем в соседних лесных геосистемах, что индицируется высокое их засоление. Магнитная восприимчивость, которая положительно коррелирует с содержанием тяжелых металлов [9]), в десятки раз превышает фоновые значения.

На основе фитоиндикаторов (NDVI – по данным космической съемки; Ln – данным наземного обследования) выделены техногенные модификации: ТМ-1 – зона сильного нарушения; ТМ-2 – зона умеренного нарушения. Снижение NDVI объясняется деградацией древесного яруса под воздействием подтопления загрязненными грунтовыми водами (в зоне ТМ-1 на сухостой приходится до 50% всех деревьев). Загрязнение ВЧР фиксируется по изменениям КЭС на серии разносов АВ по профилям ЭП, пересекающим зону влияния полигона (рис. 3).

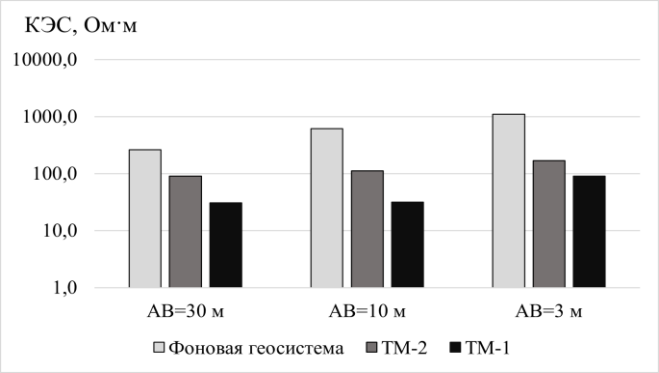


Рис. 3 Изменения КЭС в зоне влияния полигона ТКО

В ходе исследований установлено, что от полигона отходов свалочный фильтрат поступает в грунтовые воды, загрязняя их (увеличивается минерализация). Грунтовые воды разгружаются на земной поверхности в зоне

ТМ-1, вызывая массовое усыхание деревьев. В зоне ТМ-2 воздействие токсичного свалочного фильтрата уменьшается.

Буровые площадки. Цель – оценка эффективности рекультивации буровой площадки ликвидированной разведочной скважины. При бурении буровые сточные воды и шламы складировались в земляные амбары, которые являются постоянно действующим источником загрязнения геологической среды.

Для изучения долговременных последствий через рекультивированную буровую площадку был проложен профиль, на котором выполнялся комплекс исследований: определение проективного покрытия растительности (на пробных площадках 2х2 м), геомагнитная съемка, электрическое профилирование методом сопротивлений (АВ=10, 30 м). Шаг по профилю – 5 м. С помощью шурфов (глубина 1-1,5 м) были отобраны 6 проб грунтовых вод для определения pH и минерализации. Исследования проводились через 10 лет после ликвидации скважины. Результаты показаны на рис. 4.

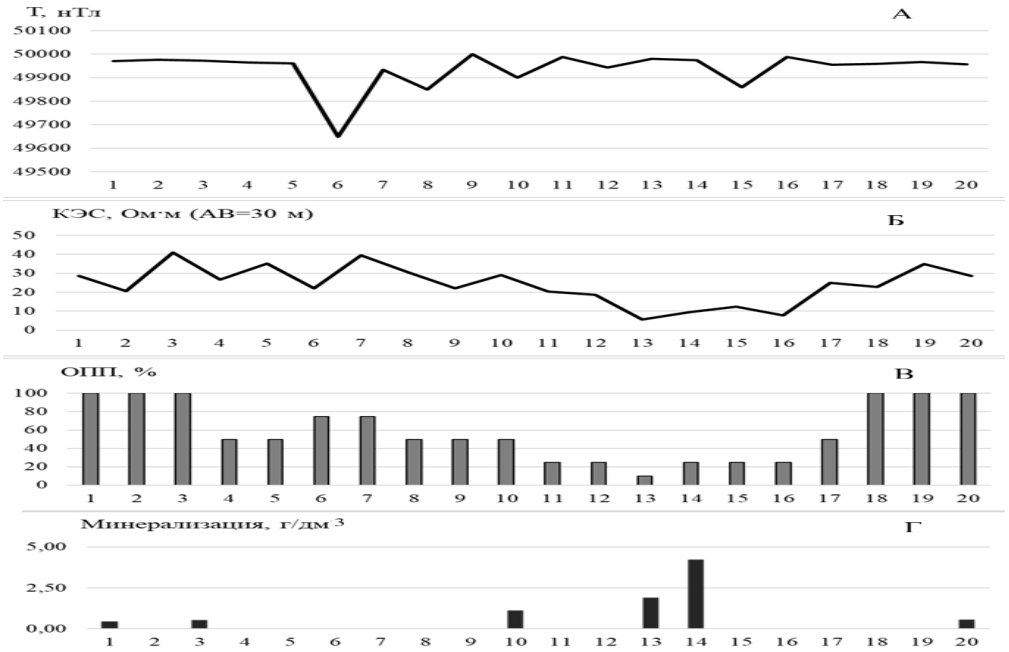


Рис. 4 Изменение показателей по профилю, пересекающему рекультивированную буровую площадку

Примечание: А – модуль полного вектора геомагнитного поля; Б – кажущееся электрическое сопротивление; В – общее проективное покрытие растительности; Г – минерализация грунтовых вод в шурфах.

Рекультивированная буровая площадка – 4-17 пикеты; фоновая геосистема 1-3 и 18-20 пикеты.

Несмотря на рекультивацию и естественную сукцессию, буровая площадка визуально выделяется в растительном покрове как заросшая древесно-кустарниковой и травяной растительностью поляна, окруженная смешанным березово-сосновым лесом. В пределах площадки общее проективное покрытие растительности изменяется от 10 до 75%. Ареал с низким покрытием (10-25%), вероятно, приурочен к зоне амбаров и месту размещения буровой остановки (пикеты 11-16).

Буровая площадка характеризуется пикообразными знакопеременными аномалиями, обусловленными захороненным железным ломом (амплитуда до 300 нТл). Геомагнитные аномалии расположены хаотично, что связано с перемешиваем железного мусора при рекультивации. В прилегающей лесной геосистеме амплитуда колебаний геомагнитного поля не превышает 10-20 нТл. Электрическое профилированное с разносом питающей линии АВ=30 м (глубинность исследования 3-7,5 м) выявило участок с низким кажущимся электрическим сопротивлением (менее 20 Ом·м). На остальной части профиля значения КЭС составляют 20-40 Ом·м. Аномалия низкого сопротивления пространственно совпадает с ареалом низкого проективного покрытия растительности.

Опробование грунтовых вод показало, что на территории буровой площадки минерализация составляет 1,1-4,2 г/дм^3, а величина pH – 4,75-6,15. В фоновой лесной геосистеме измеренная минерализация грунтовых вод составила 0,44-0,55 г/дм^3, а величина pH – 4,5-4,7. На участке бывшего амбара минерализация составила 1,9-4,2 г/дм^3, а pH – 5,75-6,15.

Таким образом, несмотря на проведенную свыше 10 лет назад рекультивацию, буровая площадка выделяется на фоне окружающей геосистемы как растительным покровом, так и геофизическими параметрами.

На участке бурового амбара фиксируется загрязнение зоны аэрации и грунтовых вод (минерализация выше фоновой в 3,8-8,4 раза, pH выше фонового – 1,2-1,3 раза). Загрязнение отражается в снижении кажущегося электрического сопротивления на глубине 3-7,5 м в 2,3 раза.

Заключение

Таким образом, разработанный целевой эколого-геофизический комплекс позволяет оперативно получить достаточно полную характеристику загрязнения геологической среды на территории и в зонах влияния экологически опасных объектов. Геофизические методы дополняются геоботанической индикацией и дистанционным зондированием Земли.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Х25УЗБ-079).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nguyen V.H., Germer J., Pham T.D., Asch, F. Mapping saline groundwater under rice-paddy fields in Vietnam’s Mekong Delta, Near Surface Geophysics, 2025, no. 23, pp. 121–133. Available at: https://doi.org/10.1002/nsg.70001
2. Оценка засоления почв и грунтовых вод методами электрического сопротивления / А.И. Поздняков, Е.В. Шеин, А.В. Федотова [и др.]. Астрахань: АГУ, 2013. 71 с.
3. Давыдов В.А., Горшков В.Ю. Геофизическое обследование плотины старого Демидовского завода // Уральский геофизический вестник. 2022. №1 (47). С. 17–24. URL: https://doi.org/10.25698/UGV.2022.1.3.17
4. Прохоров Н.Н. Взаимосвязь электрических параметров и фильтрационных характеристик грунта дамб шламохранилищ Солигорского промрайона // Горная механика. 2007. №3. С. 76–86.
5. Гапонов Д.А. Исследования полигонов и свалок: геофизические методы // Твердые бытовые отходы. 2010. №7. С. 38-41.
6. Гусев А.П. 2023. Комплексирование космической съемки и геоэлектрических методов при диагностике химического загрязнения геологической среды // Вестник

Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2023. №3. С. 133–140. URL: https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/133–140

7. Гусев А.П. Комплексирование геоэлектрических методов и дистанционного зондирования Земли при оценке состояния окружающей среды в зоне влияния экологически опасных объектов // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2024. vol. 335 (10), pp. 134–145. URL: https://doi.org/10.18799/24131830/2024/10/4528
8. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. М.: Недра, 1990. 501 с.
9. Водяницкий Ю.Н., Шоба С.А. Магнитная восприимчивость как индикатор загрязнения тяжелыми металлами городских почв // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2015. №1. С. 13–20.

Поступила в редакцию: 16.11.2025

Сведения об авторах

Гусев Андрей Петрович
кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий кафедрой геологии и географии Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, 246028, г. Гомель, ул. Советская, 104. Республика Беларусь.
E-mail: andi_gusev@)mail.ru

A. P. Gusev

TARGETED ECOLOGICAL-GEOPHYSICAL COMPLEX FOR ASSESSING THE STATE OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT OF TECHNOGENIC GEOSYSTEMS

Annotation. The aim of the work is to substantiate a targeted ecological-geophysical complex of methods for solving geoecological problems related to assessing the state of the geological environment. The tasks to be solved: 1) study of correlational relationships between geoelectrical, geochemical and ecological parameters; 2) determination of effective methods for operational diagnostics of pollution; 3) application of the targeted ecological-geophysical complex in technogenic geosystems. Composition of the targeted complex: electrical prospecting (vertical electrical sounding, electrical profiling, resistivimetry, natural electric field method), multispectral satellite imagery, ground-based phytoindication. Empirical relationships between geoelectrical and ecological parameters have been identified. Examples of the application of the targeted ecological-geophysical complex on the territory of the south-east of Belarus are considered.
Keywords: pollution of the geological environment, targeted ecological-geophysical complex, electrical prospecting, electrical resistivity.

For citation: Gusev A. P. [Targeted ecological-geophysical complex for assessing the state of the geological environment of technogenic geosystems] *Upravlenie tekhnosferoi*, 2026, vol. 9, issue 1, pp. 101–114. DOI: 10.35634/UdSU.2026.51.99.007. (In Russ.).

REFERENCES

1. Nguyen V.H., Germer J., Pham T.D., Asch, F. Mapping saline groundwater under rice-paddy fields in Vietnam’s Mekong Delta, Near Surface Geophysics, 2025, no. 23, pp. 121–133. Available at: https://doi.org/10.1002/nsg.70001
2. Pozdnyakov A.I., Shein E.V., Fedotova A.V. [et al.]. *Otsenka zasoleniya pochv i gruntovykh vod metodami elektricheskogo soprotivleniya* [Assessment of soil and groundwater salinity using electrical resistance methods]. Astrakhan: ASU, 2013, 71 p. (in Russ.).
3. Davydov V.A., Gorshkov V.Yu. Geofizicheskoye obsledovaniye plotiny starogo Demidovskogo zavoda [Geophysical survey of the dam of the old Demidov plant]. *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik* [*Ural Geophysical Bulletin*]. 2022, no. 1 (47), pp. 17–24. Available at: https://doi.org/10.25698/UGV.2022.1.3.17 (in Russ.)
4. Prokhorov N.N. Vzaimosvyaz' elektricheskikh parametrov i fil'tratsionnykh kharakteristik grunta damb shlamokhranilishch Soligorskogo promrayona [The relationship between electrical parameters and filtration characteristics of the soil of the sludge storage dams of the Soligorsk industrial district]. *Gornaya mekhanika* [*Mining mechanics*]. 2007, no. 3, pp. 76–86. (in Russ.).

5. Gaponov D.A. Issledovaniya poligonov i svalok: geofizicheskiye metody [Landfill and dump surveys: geophysical methods]. *Tverdyye bytovyye otkhody* [*Municipal solid waste*]. 2010, no 7, pp. 38–41. (in Russ.).
6. Gusev A.P. Kompleksirovaniye kosmicheskoy s"yemki i geoelektricheskikh metodov pri diagnostike khimicheskogo zagryazneniya geologicheskoy sredy [Integration of space imaging and geoelectric methods in the diagnosis of chemical pollution of the geological environment]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya* [*Voronezh State University Bulletin. Series: Geology*]. 2023, no 3, pp. 133–140. Available at: https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/133–140 (in Russ.).
7. Gusev A.P. Kompleksirovaniye geoelektricheskikh metodov i distantsionnogo zondirovaniya Zemli pri otsenke sostoyaniya okruzhayushchey sredy v zone vliyaniya ekologicheski opasnykh ob"yektov [Integration of geoelectric methods and remote sensing of the Earth in assessing the state of the environment in the zone of influence of environmentally hazardous objects]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2024, vol. 335 (10), pp. 134–145. Available at: https://doi.org/10.18799/24131830/2024/10/4528 (in Russ.).
8. Ogilvy A.A. *Osnovy inzhenernoy geofiziki* [Fundamentals of Engineering Geophysics]. Moscow, Nedra, 1990, 501 p. (in Russ.).
9. Vodyanitsky Yu.N., Shoba S.A. Magnitnaya vospriimchivost' kak indikator zagryazneniya tyazhelymi metallami gorodskikh pochv [Magnetic susceptibility as an indicator of heavy metal pollution of urban soils]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedeniye* [*Moscow University Bulletin. Series 17. Soil Science*]. 2015, no. 1, pp. 13–20. (in Russ.).

Received: 16.11.2025

About the Author

Gusev Andrei P.
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Geology and Geography of the Francysk Skaryna Gomel State University, F. Skaryna Gomel State University, 104 Sovetskaya St., Gomel, 246028, Republic of Belarus.
E-mail: andi_gusev@)mail.ru