

УДК 504.5+550.3
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4528
Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Комплекси́рование геоэлектрических методов и дистанционного зондирования Земли при оценке состояния окружающей среды в зоне влияния экологически опасных объектов

А.П. Гусев[✉]

Гомельский Государственный университет им. Ф. Скорины, Республика Беларусь, г. Гомель

[✉]andi_gusev@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования заключается в необходимости комплексной оценки компонентов окружающей среды в зонах влияния экологически опасных промышленных объектов, позволяющей оперативно выявлять пространственную структуру техногенного загрязнения. *Цель:* оценка степени химического загрязнения геологической среды в зонах влияния техногенных объектов на основе сопряженного использования космической съемки и наземных геоэлектрических методов. *Объект:* источники загрязнения при производстве минеральных удобрений (отвалы фосфогипса, склад серы). *Методы.* Разработан комплекс методов, состоящий из многозональной космической съемки (снимки спутников Sentinel-2) и наземных геоэлектрических исследований: резистивиметрии поверхностных вод, съемки потенциала естественного электрического поля, вертикального электрического зондирования. По данным космической съемки (вегетационные индексы NDVI, NBR, SWVI) выделяются техногенные модификации геосистем, характеризующие различные уровни химического загрязнения (ТМ-1, ТМ-2 и фоновая геосистема). В пределах зон модификаций выполняются геоэлектрические исследования для оценки распространения загрязнения в глубину. *Результаты.* В зоне влияния отвалов фосфогипса выделены две техногенные модификации общей площадью 83,3 га, характеризующиеся статистически значимым снижением значений вегетационных индексов по сравнению с фоном. По результатам вертикального электрического зондирования установлено, что глубина загрязнения в зоне ТМ-1 – до 20 м, в зоне ТМ-2 – до 2,5 м. От отвалов миграция загрязненных веществ осуществляется с поверхностным стоком. В зоне влияния склада серы ареал загрязнения, выделенный по вегетационным индексам, охватывает 2 га. По результатам метода естественного электрического поля и вертикального электрического зондирования поток загрязняющих веществ от склада серы проникает в грунтовые воды, которые разгружаются в зоне ТМ-1, вызывая гибель растительности. В зоне ТМ-2 загрязнение фиксируется только в грунтовом водоносном горизонте. Разработанный комплекс методов позволяет оперативно и достаточно полно диагностировать состояние окружающей среды, подвергающейся техногенному воздействию.

Ключевые слова: окружающая среда, химическое загрязнение, вегетационные индексы, геоэлектрические методы, вертикальное электрическое зондирование, резистивиметрия, удельное электрическое сопротивление

Для цитирования: Гусев А.П. Комплекси́рование геоэлектрических методов и дистанционного зондирования Земли при оценке состояния окружающей среды в зоне влияния экологически опасных объектов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 134–145. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4528

UDC 504.5+550.8
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4528

Integration of geoelectric methods and remote sensing in assessing the environment state in the area of impact of ecologically hazardous objects

A.P. Gusev[✉]

Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus

[✉]andi_gusev@mail.ru

Abstract. Relevance. The need for comprehensive assessment of environmental components in the zones of ecologically hazardous industrial facilities impact, which enables to operatively identify the spatial structure of technogenic pollution. **Aim.** Chemical pollution assessment of the geological environment in the zones of industrial objects impact, based on the combined use of remote sensing and ground-based geoelectric methods. **Objects.** Sources of pollution during the production of mineral fertilizers (phosphogypsum dumps, sulfur storage). **Methods.** The author has developed a complex of methods, consisting of multispectral space imaging (Sentinel-2 satellite images) and ground-based geoelectric researches: water surface resistivity measurements, natural electric field potential imaging, vertical electrical sounding. According to satellite image data (vegetation indices NDVI, NBR, SWVI), technogenic geosystems modifications are distinguished, characterizing different levels of chemical pollution (TM-1, TM-2 and natural geosystem). Within the modification zones, geoelectrical studies are carried out to assess the depth of contamination. **Results.** In the zone of phosphogypsum dumps impact, two technogenic modifications were distinguished, with a total area of 83.3 hectares, characterized by a statistically significant decrease in the values of vegetation indices compared to the average level. Based on the results of vertical electrical sounding, it was established that the depth of contamination in the TM-1 zone reaches up to 20 m, in the TM-2 zone – up to 2.5 m. The migration of contaminated substances from the dumps occurs with surface drain. In the zone of impact of the sulfur storage, the area of pollution, specified with vegetation indices, covers two hectares. According to the results of the natural electric field method and vertical electrical sounding, the flow of pollution from the sulfur storage site penetrates into groundwater, which is discharged in the TM-1 zone, causing the death of vegetation. In the TM-2 zone, contamination is registered only in the ground aquifer. The developed set of methods enables to quickly and relatively comprehensively diagnose the state of the undergoing technogenic impacts geological environment.

Keywords: environment, chemical pollution, vegetation indices, geoelectric methods, vertical electrical sounding, resistivity measurement, electrical resistivity

For citation: Gusev A.P. 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*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 134–145. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4528

Введение

Химическое производство является мощным источником воздействия на компоненты окружающей среды: атмосферный воздух, растительность, почвы, грунты, поверхностные и подземные воды. Оценка состояния окружающей среды, как правило, производится по отдельным компонентам, при этом основное внимание уделяется воздушному бассейну и поверхностным водам. Изучение геологической среды, как правило, ограничивается локальным мониторингом подземных вод в нескольких скважинах, разбросанных на площади в несколько км². Как следствие имеющаяся система экологической оценки дает разрозненную и неполную информацию о распространении химического загрязнения в окружающей среде. Поэтому актуальным является поиск рационального комплекса методов, который позволит оперативно получать информацию о состоянии как земной поверхности, так и геологической среды (т. е. обоснование сочетания методов, обеспечивающих надежное решение поставленной задачи в случае определенного типа объектов в конкретных геологических условиях).

Эффективным методом изучения химического загрязнения являются геоэлектрические исследования (электроразведка), основанные на взаимосвязи между удельным электрическим сопротивлением и содержанием растворенных солей в воде [1, 2]. Имеются многочисленные примеры успешного решения методами электроразведки задач по оценке и картографированию загрязнения подземных вод,

засоления почв, выявлению утечек стоков из шламохранилищ и т. д. [3–15].

Использование электроразведки позволяет осуществлять непрерывные площадные наблюдения при относительно низкой стоимости работ, без бурения скважин и нарушения растительного покрова и почв горными выработками.

Однако недостатком геоэлектрических методов является неоднозначность их интерпретации, поскольку удельное электрическое сопротивление зависит от многих факторов. Для повышения эффективности применения электроразведки при изучении химического загрязнения нами предложено использовать ее в комплексе с дистанционными методами [16]. Наиболее важным экологическим индикатором выступают вегетационные индексы, рассчитываемые на основе многозональной космической съемки и отражающие состояние растительного покрова [17–22].

Цель исследований – оценка химического загрязнения окружающей среды в зонах влияния техногенных объектов на основе сопряженного использования космической съемки и наземных геоэлектрических методов. При этом решались следующие задачи: выделение техногенных модификаций геосистем, соответствующих определенным уровням загрязнения; оценка химического загрязнения почв и поверхностных вод; изучение распространения загрязнения по вертикали, в подземных водах; выяснение механизмов распространения загрязнения в геологической среде.

Объекты исследования

Район исследований находится на юго-востоке Беларуси. Для геологического строения характерен сплошной чехол четвертичных отложений, имеющих мощность в среднем 20–25 м. В разрезе представлены: нерасчлененный комплекс водноледниковых отложений березинско-припятского (среднеплейстоценового) возраста (вскрывается на глубинах 4–18 м, имеет мощность 5–15 м, подстилается отложениями палеогена, перекрывается припятской мореной, представлен мелко- и тонкозернистыми песками); моренные отложения припятского горизонта (залегают на глубинах 1–17 м, имеют мощность 3,5–16 м, сложены супесями и суглинками с включениями гравия и гальки); водноледниковые надморенные отложения припятского горизонта (залегают с поверхности, имеют мощность 0,8–12 м, сложены мелко- и тонкозернистыми песками, с прослоями пылеватых супесей, реже суглинков); аллювиальные отложения второй надпойменной террасы позднеплейстоценового возраста (залегают с поверхности, характеризуются мощностью 1–11 м, сложены песками различного гранулометрического состава).

Зона активного водообмена (мощность 260–280 м) включает пять водоносных горизонтов: безнапорный грунтовый горизонт, приуроченный к водноледниковым отложениям припятского горизонта и отложениям второй надпойменной террасы рек Уза и Сож; напорный горизонт, приуроченный к нерасчлененным водно-ледниковым отложениям березинско-припятского возраста (подморенный); напорный горизонт, приуроченный к отложениям харьковского яруса палеогена (палеогеновый); напорный горизонт верхнемеловых отложений (турон-маастрихский); напорный горизонт пограничный между верхним и нижним отделами меловой системы (апт-нижнесеноманский).

Объекты исследования связаны с крупнейшим в Беларуси предприятием химической промышленности, производящим более 20 видов химической продукции (серная и фосфорная кислоты, аммофос, суперфосфат, азотно-фосфорно-калийные удобрения, фтористый алюминий и т. д.). Промышленный комплекс состоит из основных и вспомогательных производств, включает систему из наземных и подземных коммуникаций и продуктопроводов, складов технического сырья и готовой продукции, станций нейтрализации, прудов-отстойников, шламонакопителей и полигона твердых отходов. В ходе производства фосфорных удобрений применяется сернокислая обработка фосфатов, при которой в качестве твердого отхода образуется фосфогипс – сульфат кальция с примесью фосфатов. Фосфогипсовые отходы складываются на территории специального полигона (накоплено более 17 млн т, зани-

мающих территорию около 100 га). Отвалы фосфогипса являются постоянно действующим источником поступления загрязняющих веществ в поверхностные и грунтовые воды, почвогрунты, причиной деградации растительного покрова и т. д. [3, 21]. В поверхностных водах на территории отвалов минерализация достигает 10–20 г/дм³, содержание сульфат-иона – 1–6 г/дм³, фосфора фосфатного – 1–5 г/дм³, иона-фтора – 0,5–1,5 г/дм³. Грунтовые воды в зоне влияния отвалов также загрязнены сульфат-ионом, фосфором фосфатным, ионами железа, фтора, аммония. Минерализация грунтовых вод составляет до 10–20 г/дм³ [23].

Ряд источников загрязнения находится в пределах промышленной площадки предприятия. Из них наиболее экологически опасным является склад серы. Механизм формирования загрязнения в этом случае связан с окислением элементарной серы, складываемой на открытой площадке, микроорганизмами.

Методика исследования

Методика исследования включала:

- обработку и анализ космических многозональных снимков (спутники Sentinel-2), расчет вегетационных индексов, характеризующих состояние растительного покрова (NDVI, NBR, SWVI);
- резистивиметрию поверхностных вод (в лужах и канавах);
- съемку методом потенциала естественного электрического поля (ЕЭП) с шагом между точками наблюдения 10 м;
- вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) методом сопротивлений на постоянном токе (размеры питающих линий АВ от 3 до 300 м, приемных линий MN – от 1 до 20 м, расстояние между точками наблюдения – 100 м).

По данным космической съемки выделялись техногенные модификации геосистем, характеризующие различные уровни химического загрязнения (ТМ-1, ТМ-2 и фоновая геосистема). Геоэлектрические исследования для оценки распространения загрязнения в глубину выполнялись в пределах ареалов выделенных техногенных модификаций.

В работе использованы данные спутников Sentinel-2, осуществляющих мультиспектральную съемку в 13 каналах, охватывающих диапазон от 433 до 2280 нанометров. Пространственное разрешение съемки в зависимости от канала – 10–60 м. В частности, каналы В02 (голубой), В03 (зеленый), В04 (красный), В08 (ближний инфракрасный) имеют разрешение 10 м; каналы В11 и В12 (коротковолновые) – 20 м. Ширина полосы захвата – 290 км. Периодичность съемки – 2–3 дня. На основе съемки по формулам, приведенным в табл. 1, рассчитывались вегетационные индексы.

Для проведения геоэлектрических работ использована электроразведочная аппаратура ERA-MAX. Для съемки методом ЕЭП применены неполяризуемые электроды системы ВИРГ [1, 24]. Для определения минерализации вод использован портативный резистивиметр, измеряющий удельную электрическую проводимость и соответствующую ей минерализацию воды (в мг/дм³). Интерпретация данных ВЭЗ проводилась с помощью программы IPI2Win [24]. Интерполяции и построение карт потенциала ЕЭП в изолиниях – Golden Software Surfer. 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

Отвалы фосфогипса

В зоне влияния отвалов фосфогипса (рис. 1) образовались техногенные модификации (ТМ) исходной луговой геосистемы (луг разнотравно-злаковый на дерновых песчаных почвах), которые различаются по степени повреждения растительного покрова:

- ТМ-2 – участок с мозаичным тростниково-березовым фитоценозом;
- ТМ-1 – участок, полностью лишенный растительного покрова.

Образование техногенных модификаций вызвано воздействием загрязнения от отвалов фосфогипса по направлению движения поверхностного стока.

На основе снимков спутников Sentinel-2 рассчитывались вегетационные индексы. Так, например, для выяснения величины NDVI использовались снимки в красном и ближнем инфракрасном диапазонах. На рис. 2 показана схема расположения выделенных модификаций и полигона отходов фосфогипса, на рис. 3, 4 представлены снимки данного участка, соответственно, в красном и ближнем инфракрасном диапазонах. На рис. 5 представлен результат расчета NDVI.

Таблица 1. Формулы расчета вегетационных индексов

Table 1. Formulas for calculating vegetation indices

Вегетационный индекс Vegetation index	Формула для расчета на основе каналов спутников Sentinel-2 Formula for calculation based on channels of Sentinel-2 satellites
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(NIR-R)/(NIR+R)$
NBR (Normalized Burn Ratio)	$(NIR-SWIR2)/(NIR+SWIR2)$
SWVI (Short Wave Vegetation Index)	$(NIR-SWIR2)/(NIR+SWIR1)$

Примечание/Note. Каналы спутника Sentinel-2: NIR – ближний инфракрасный; R – красный; SWIR2 – второй коротковолновой инфракрасный; SWIR1 – первый коротковолновой инфракрасный/Sentinel-2 satellite channels: NIR – near infrared; R – red; SWIR2 – second shortwave infrared; SWIR1 – first shortwave infrared.



Рис. 1. Отвалы фосфогипса и их зона влияния
Fig. 1. Phosphogypsum dumps and their impact zone

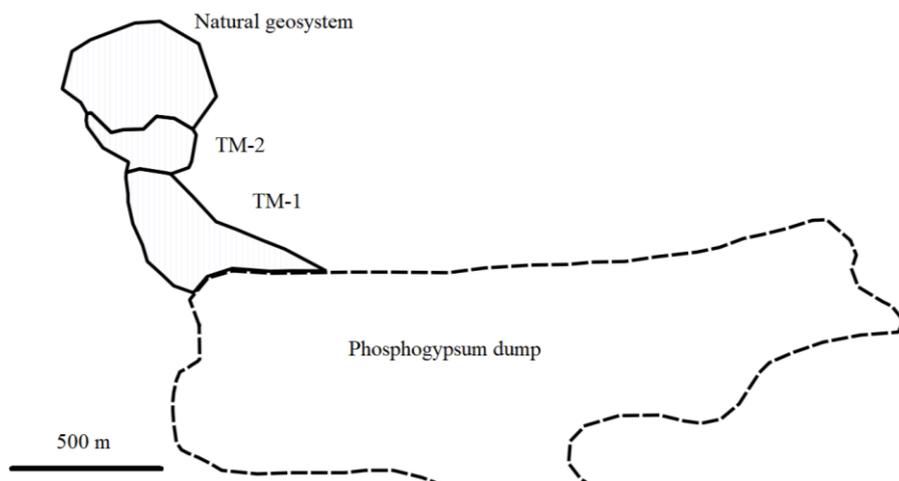


Рис. 2. Схема расположения отвалов фосфогипса и их зоны влияния
Fig. 2. Layout of phosphogypsum dumps and their impact zone

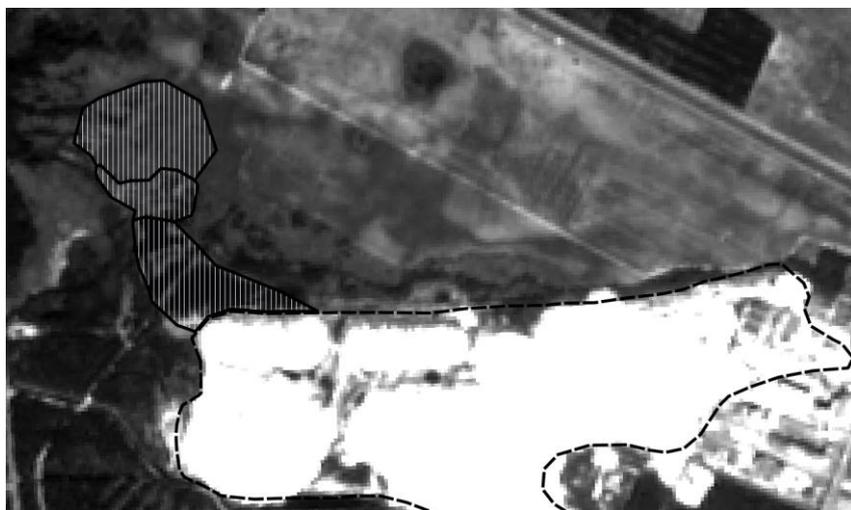


Рис. 3. Изображение участка в красном диапазоне
Fig. 3. Red image of the area

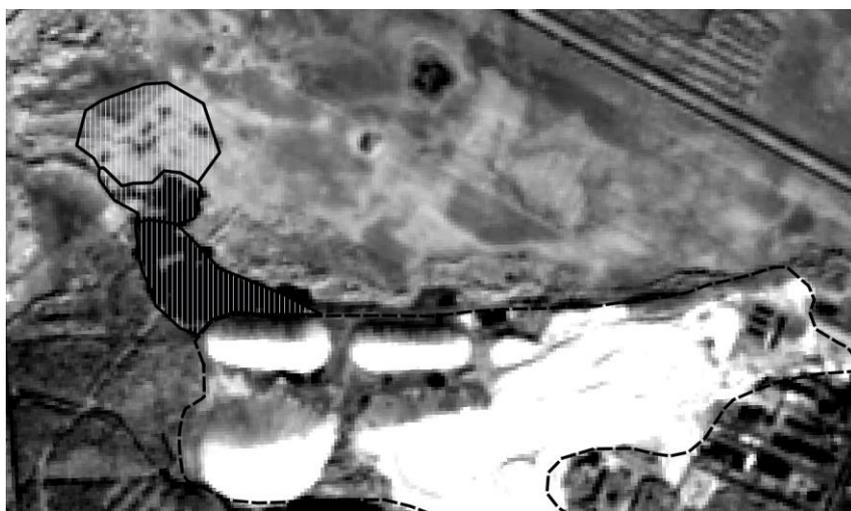


Рис. 4. Изображение участка в ближнем инфракрасном диапазоне
Fig. 4. Near-infrared image of the area

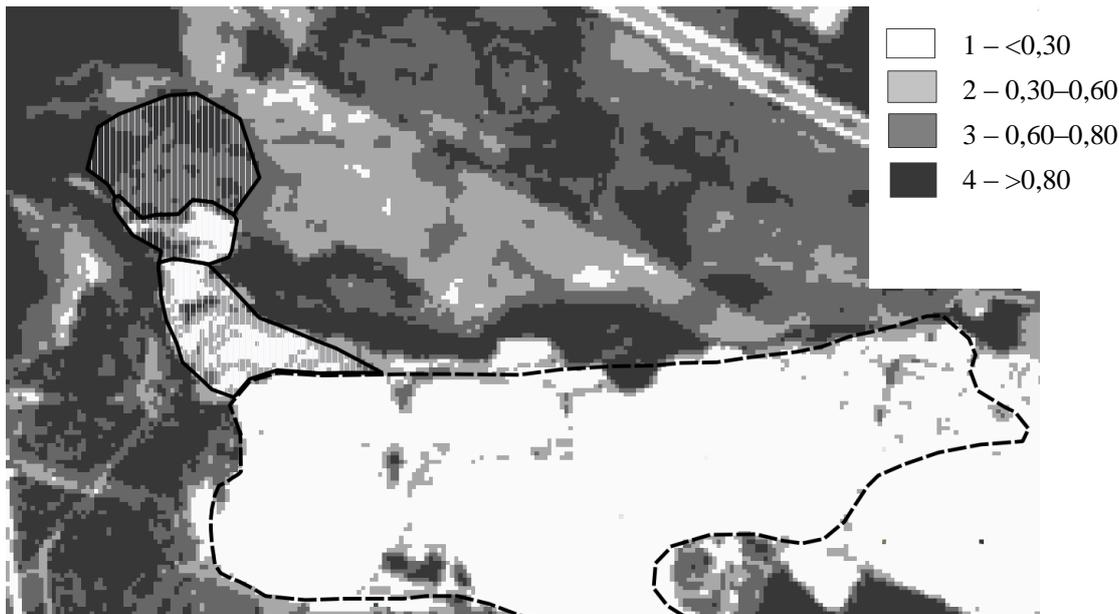


Рис. 5. Результаты расчета NDVI
Fig. 5. NDVI calculation results

Каждая модификация характеризуется определенным диапазоном величин вегетационных индексов (табл. 2). Это позволяет выделить ареалы распространения указанных модификаций и определить их площади. Так, площадь фоновой геосистемы составляет 101,4 га, зоны ТМ-2 – 34,5 га, зоны ТМ-1 – 48,8 га. Зона ТМ-1 находится в пределах отвалов фосфогипса (общая площадь полигона более 100 га).

Таблица 2. Изменения вегетационных индексов по градиенту химического загрязнения в зоне влияния экологически опасных объектов

Table 2. Changes in vegetation indices along the gradient of chemical pollution in the zone of influence of ecologically hazardous objects

Индикатор Indicator	Градиент химического загрязнения Chemical pollution gradient		
	Фоновая геосистема Natural geosystem	ТМ-2	ТМ-1
NDVI	0,803*	0,596	0,324
	0,773**	0,580	0,343
NBR	0,567	0,381	0,318
	0,536	0,315	0,170
SWVI	0,253	0,106	0,017
	0,241	0,030	-0,080

Примечание/Note: *отвалы фосфогипса (phosphogypsum dumps); **склад серы (sulfur storage).

Значения NDVI в зоне ТМ-1 колеблются от 0,044 до 0,780. Среднее значение NDVI здесь ниже фонового в 2,5 раза, медианное – в 3,4 раза. Значения NBR – от 0,04 до 0,579, среднее значение ниже фонового в 1,8 раза, медианное – в 1,9 раза. Значения

SWVI изменяются от –0,224 до 0,282, среднее значение ниже фонового в 14,9 раза, медианное – в 27,2 раза. Все указанные отличия статистически достоверные.

В зоне ТМ-2 величина NDVI находится в интервале 0,198–0,872, среднее значение ниже фонового в 1,4 раза, медианное – в 1,3 раза. Величина индекса NBR составляет 0,040–0,682, среднее значение ниже фонового в 1,5 раза, медианное – в 1,4 раза. Величина SWVI изменяется от –0,22 до 0,391, среднее значение ниже фонового в 2,4 раза, медианное – в 2,2 раза. В данном случае также отличия статистически достоверные.

Изменения NDVI отражают изменения продуктивности луговой геосистемы, подвергшейся воздействию химического загрязнения со стороны отвалов. Снижение NBR и SWVI указывают на стрессовое состояние растительности (усыхание, пожелтение, разрежение травостоя – фиксируются в отражательной способности земной поверхности). Наиболее чувствительным к повреждению растительности токсичными веществами оказывается SWVI. Рассмотренные результаты дают представление об экологическом эффекте, однако выявление механизма воздействия отвалов на растительность требует изучения процессов в геологической среде.

Для выяснения распространения загрязнения в глубину в пределах фоновой геосистемы и ее техногенных модификаций были проведены ВЭЗ. В качестве примера для сравнения на рис. 6 приведены кривые ВЭЗ, полученные на фоновом участке и на участке ТМ-1.

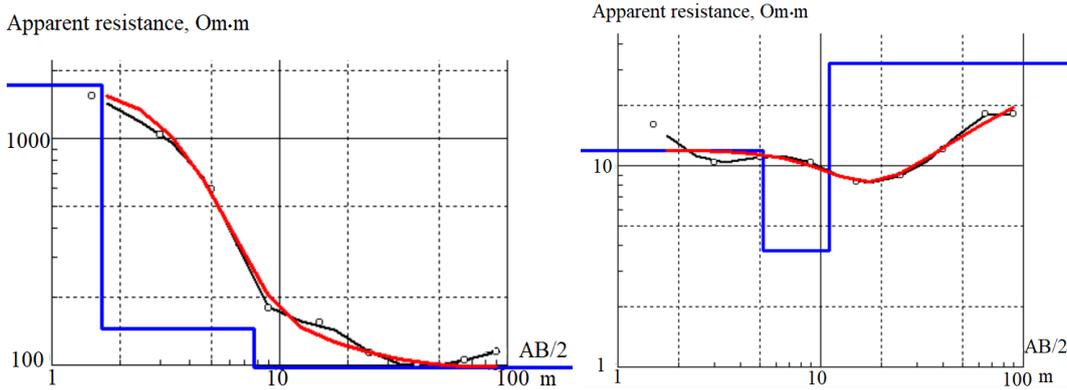


Рис. 6. Кривые ВЭЗ: фоновая геосистема (слева) и зона ТМ-1 (справа)
Fig. 6. VES curves: natural geosystem (left) and TM-1 zone (right)

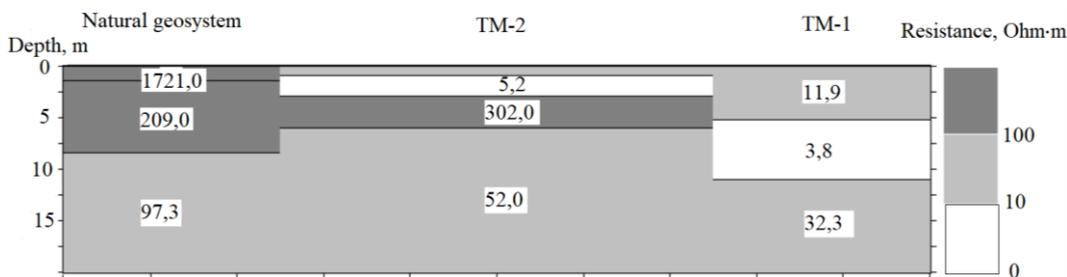


Рис. 7. Геоэлектрический разрез через зону влияния отвалов фосфогипса
Fig. 7. Geoelectric section through the impact zone of phosphogypsum dumps

Полученный в ходе интерпретации геоэлектрический разрез показан на рис. 7. Видно, что фоновый геоэлектрический разрез характеризуется снижением электрического сопротивления с глубиной, что обусловлено его литологическими особенностями: водно-ледниковые песчаные отложения подстилаются моренными супесями. Самый верхний слой представляет собой относительно сухие пески и характеризуется высоким сопротивлением. На глубине 1,4 м залегает слой с более низким сопротивлением, которой интерпретируется как грунтовый водоносный горизонт. На глубине около 8 м залегают моренные отложения (супеси, суглинки), что объясняет дальнейшее снижение сопротивления.

На участке ТМ-1 сопротивление до глубины 10 м аномально низкое, что обусловлено значительным повышением минерализации подземных вод. Минимальное сопротивление характерно для интервала 5–10 м, где, вероятно, имеет место максимальный уровень засоления. По данным резистивиметрии минерализация поверхностных вод в лужах здесь составляет 5–10 г/дм³. Минерализации проб воды из грунтового водоносного горизонта – 3–4 г/дм³. В интервале глубин 10–20 м сопротивление увеличивается, но все равно остается в 2–3 раза ниже, чем в зоне ТМ-2 и фоновой геосистеме.

На участке ТМ-2 низкое сопротивление отмечается только в самой верхней части разреза – до

глубины 2,5 м (рис. 7). Это позволяет предположить, что миграция загрязняющих веществ к этому участку идет с поверхностным стоком, а загрязнение ниже грунтового водоносного горизонта отсутствует.

Склад серы

В зоне влияния склада серы (рис. 8) находится геосистема заболоченного леса (мелколиственный лес разнотравный на дерново-глеявых супесчаных почвах). Под воздействием загрязнения в окружающем ландшафте сформированы техногенные модификации исходной геосистемы:

- ТМ-2 – участок с мозаичным тростниково-березовым фитоценозом;
- ТМ-1 – участок, полностью лишенный растительного покрова.

Как и в предыдущем случае, ареалы техногенных модификаций четко выделяются по значениям вегетационных индексов (табл. 2). При этом площадь фоновой геосистемы составляет 1,4 га, зоны ТМ-2 – 1,1 га, зоны ТМ-1 – 0,9 га. Склад серы находится на расстоянии 50 м от зоны ТМ-1 и на расстоянии 120 м от границы фоновой геосистемы (по прямой). Площадь склада серы составляет 0,18 га. Техногенные модификации отделены от фоновой геосистемы насыпью железной дороги (высота насыпи 1,5 м, ширина 10 м).



Рис. 8. Склад серы и зона его влияния
Fig. 8. Sulfur storage and its impact area

Наиболее низкие значения вегетационных индексов приурочены к зоне ТМ-1. По сравнению с фоновой геосистемой значение NDVI здесь снижается в 2–2,25 раза, значение NBR – в 2,31–3,15 раза, а значение SWVI – в десятки раз. В зоне ТМ-2 по сравнению с фоновой геосистемой значение NDVI снижается в 1,33–1,34 раза, значение NBR – в 1,65–1,7 раза, значение SWVI – в 4,28–8,03 раза.

Химическое загрязнение фиксируется в водах луж и каналов: по данным резистивиметрии в зоне ТМ-1 минерализация вод местами достигает 10 г/дм^3 (удельное электрическое сопротивление – менее $1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), а среднее значение составляет $7,237 \text{ г/дм}^3$. Негативное воздействие на растительность также обусловлено весьма высокой кислотностью вод ($\text{pH} < 3$). В зоне ТМ-2 минерализация поверхностных вод снижается до $0,3\text{--}1,5 \text{ г/дм}^3$ (среднее значение – 482 мг/дм^3). Величина pH здесь составляет 4,5–5,5 единицы. В пределах фоновой геосистемы минерализация ниже 1 г/дм^3 (среднее значение – 297 мг/дм^3), за исключением одной точки наблюдения, расположенной непосредственно напротив зоны ТМ-1. Величина pH – около 6.

Для изучения особенностей движения поверхностных и подземных вод, их взаимосвязи, а также распространения фронта загрязнения в геологической среде были использованы геоэлектрические методы – ЭЭП и ВЭЗ. Метод ЭЭП применяется для определения мест повышенной инфильтрации поверхностных вод, мест разгрузки подземных вод,

прослеживания направления миграции неглубоко залегающих подземных вод. Повышенная фильтрация диагностируется по отрицательным аномалиям, а разгрузка подземных вод – по положительным аномалиям потенциала естественного электрического поля [1].

Установлено, что зона ТМ-1 характеризуется положительными значениями потенциала естественного электрического поля (от 0 до +15 мВ), т. е. здесь происходит разгрузка грунтовых вод), а остальная часть территории – отрицательными (от –40 до 0 мВ), что указывает на инфильтрацию поверхностных вод в грунтовый горизонт (рис. 9). Исходя из этого, можно предположить, что загрязняющие вещества с земной поверхности на участке склада серы мигрируют в грунтовые воды, которые затем разгружаются в зоне ТМ-1, вызывая засоление поверхностных почвогрунтов и гибель растительности. Для зоны ТМ-2 характерна инфильтрация осадков в грунтовые воды и, как следствие, меньшая степень воздействия загрязненных грунтовых вод на растительность.

На основе выполненных ВЭЗ был построен геоэлектрический разрез (рис. 10). В фоновой геосистеме и на участке ТМ-2 верхняя часть геологической среды состоит соответственно из четырех и пяти слоев, различающихся по удельному электрическому сопротивлению. Верхний слой характеризуется высоким сопротивлением ($400\text{--}500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и мощностью 1,1–1,3 м (соответствует песчаными почвам).

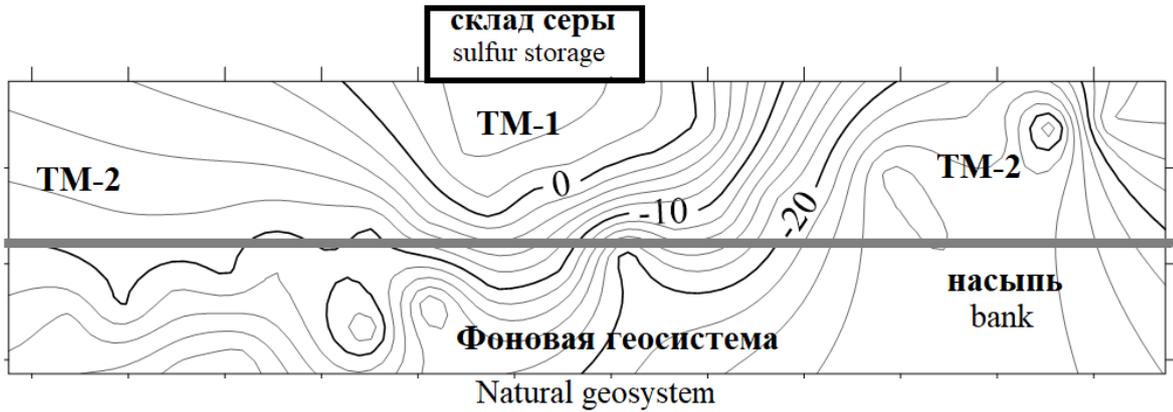


Рис. 9. Изолинии потенциала ЕЭП (в мВ) в зоне влияния склада серы
 Fig. 9. Isolines of the CES potential (in mV) in sulfur storage impact zone

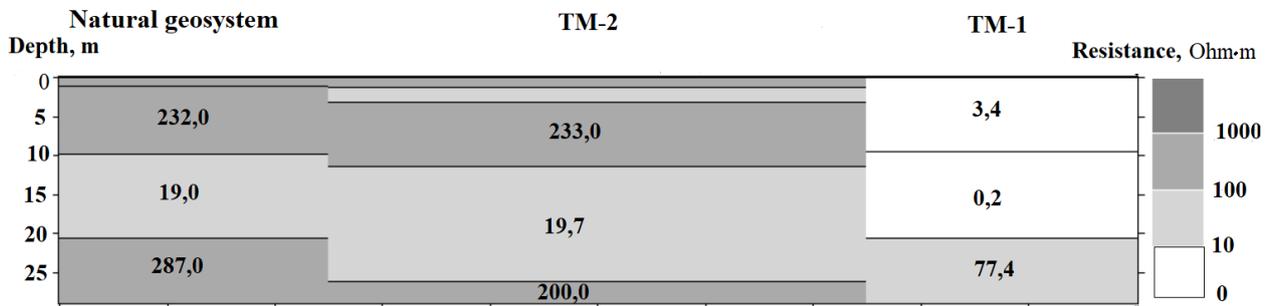


Рис. 10. Геоэлектрический разрез через зону влияния склада серы, Ом·м
 Fig. 10. Geoelectric section through the sulfur storage impact zone, Ohm·m

Второй слой в фоновой геосистеме (имеет сопротивление 232 Ом·м и мощность 9,7 м) интерпретируется как грунтовый водоносный горизонт в водно-ледниковых песках. Третий слой, в котором сопротивление снижается до 19 Ом·м, представляет собой моренные отложения (супеси и суглинки с гравием и галькой) и подморенный водоносный горизонт, распространенные до глубины 22 м. Подстилающий слой имеет высокое сопротивление (287 Ом·м) и соотносится с отложениями палеогена (пески, алевриты). На участке ТМ-2 второй слой имеет сопротивление 83 Ом·м и мощность 3,2 м – грунтовый водоносный горизонт. Третий слой (233 Ом·м) имеет мощность 10 м. По сравнению с фоновой геосистемой более четкое выделение грунтового водоносного горизонта обусловлено его загрязнением, вызвавшим снижение удельного электрического сопротивления. Ниже залегают моренные отложения и подморенный водоносный горизонт (19,7 Ом·м).

Геоэлектрический разрез на участке ТМ-1 резко отличается от вышеописанных. С поверхности до глубины около 20 м разрез характеризуется низким электрическим сопротивлением – до 5 Ом·м. Ниже сопротивление увеличивается до 77,4 Ом·м. Сни-

жение сопротивления по всему разрезу обусловлено высокой минерализацией вод: поверхностных и подземных – грунтового и подморенного водоносных горизонтов. Анализ результатов ВЭЗ показал, что на участке ТМ-1 загрязнение охватывает зону аэрации, грунтовый и подморенный водоносные горизонты (до глубины 20 м). На участке ТМ-2 загрязнение фиксируется только в грунтовом водоносном горизонте (в районе размещения точки ВЭЗ).

На основе анализа выполненных исследований разработана модель распространения загрязнения в зоне влияния склада серы (рис. 11). Предполагается, что поток загрязнения от склада серы проникает в грунтовые воды, а затем движется к участку разгрузки (зона ТМ-1). Здесь загрязненные грунтовые воды подходят к земной поверхности и оказывают негативное воздействие на растительность. В зоне ТМ-2 загрязнение распространяется с грунтовыми водами, но, вероятно, к корнеобитаемому слою почв не подходит (соответственно экологический эффект в виде повреждения растительности проявляется в меньшей степени). В пределах фоновой геосистемы загрязнение уже не вызывает сколько-либо значимого снижения сопротивления.

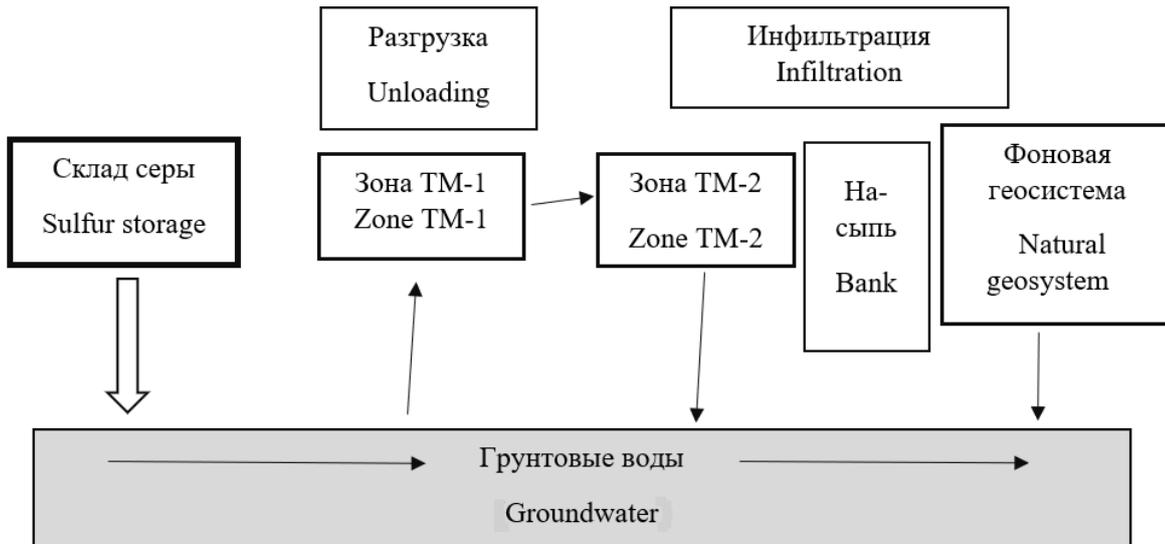


Рис. 11. Миграция загрязнения в зоне влияния склада серы
Fig. 11. Migration of pollution in the sulfur storage impact zone

Заключение

Таким образом, комплексирование космической съемки и геоэлектрических методов позволило получить достаточно полную картину химического загрязнения:

- по вегетационным индексам – картировать зоны техногенной трансформации, определить их границы и площади;

- по результатам резистивиметрии – определить минерализацию поверхностных вод и ее пространственные изменения в зависимости от расстояния до источника;
- по данным метода потенциала ЕЭП – установить закономерности движения грунтовых вод и соответственно миграции загрязняющих веществ;
- по данным ВЭЗ оценить глубину зоны загрязнения и описать ее вертикальную структуру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. – М.: Недра, 1990. – 501 с.
2. Оценка засоления почв и грунтовых вод методами электрического сопротивления / А.И. Поздняков, Е.В. Шейн, А.В. Федотова, А.П. Шваров, Л.В. Яковлева. – Астрахань: ИД «Астраханский университет», 2013. – 71 с.
3. Геоэлектрическая диагностика загрязнения геологической среды в зоне влияния полигона токсичных отходов / А.П. Гусев, М.Г. Верутин, П.А. Калейчик, И.О. Прилуцкий, И.А. Шаврин // Вестник Пермского университета. Геология. – 2019. – Т. 18. – № 1. – С. 79–85.
4. Meju M.A. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach // Journal of Applied Geophysics. – 2000. – Vol. 44. – P. 115–150. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0926-9851\(00\)00011-2](https://doi.org/10.1016/s0926-9851(00)00011-2)
5. Lashkaripour G.R., Sadeghi H., Qushaei M. Vertical electrical soundings for groundwater assessment in Southeastern Iran: a case study // Journal of Applied Sciences. – 2005. – Vol. 5 (6). – P. 973–977. DOI: <https://doi.org/10.3923/jas.2005.973.977>
6. Anomohanran O. Investigating the geoelectric response of water saturated and hydrocarbon impacted sand in the vicinity of petroleum pipeline // International Journal of Applied Science and Technology. – 2013. – Vol. 3. – № 2. – P. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.4236/jwarp.2014.68070>
7. Мыска М., Mendecki M.J. An application of geoelectrical methods for contamination plume recognition in Urbanowice waste disposal // Contemporary Trends in Geoscience. – 2014. – Vol. 2. – P. 42–47. DOI: <https://doi.org/10.2478/ctg-2014-0006>
8. Ofomola M.O. Mapping of aquifer contamination using geoelectric methods at a municipal solid waste disposal site in Warri, Southern Nigeria // Journal of Applied Geology and Geophysics. – 2015. – Vol. 3. – P. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.9790/0990-03313947>
9. Electrical resistivity imaging (ERI) monitoring for groundwater contamination in an uncontrolled landfill, South Korea / S. Park, M.-J. Yi, J.-H. Kim, S.W. Shin // Journal of Applied Geophysics. – 2016. – Vol. 135. – P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.07.004>
10. Detection and determination of groundwater contamination plume using time-lapse electrical resistivity tomography (ERT) method / S. Moghaddam, S. Dezhpasand, A. Kamkar Rouhani, S. Parnow, M. Ebrahimi // Journal of Mining & Environment. – 2017. – Vol. 1. – № 8. – P. 103–110. DOI: <https://doi.org/10.22044/jme.2015.523>
11. Investigating the pollution range in groundwater in the vicinity of a tailings disposal site with vertical electrical soundings / R. Duda, S. Mzyk, J. Farbisz, G. Bania // Polish Journal of Environmental Studies. – 2020. – Vol. 29 (1). – P. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/100478>

12. Sanuade O.A., Arowoogun K.I., Amosun J.O. A review on the use of geoelectrical methods for characterization and monitoring of contaminant plumes // *Acta geophysics*. – 2022. – Vol. 70. – P. 2099–2117. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00858-9>
13. Application of geoelectric technique in groundwater protection of quaternary aquifer in Wadi El Natrun, Egypt / M.F. Bedair, R.I. Rifai, A. Gamal, M.S.M. Barseem // *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*. – 2023. – Vol. 27. – № 2. – P. 29–48. DOI: [10.9734/JGEEESI/2023/v27i2669](https://doi.org/10.9734/JGEEESI/2023/v27i2669)
14. Asfahani J. Geo-electrical investigation for characterizing the shallow Quaternary aquifer parameters and vulnerability to contamination: a case study from semi-arid Khanasser Valley region, Syria // *Water Practice & Technology*. – 2023. – Vol. 18. – № 7. – P. 1639–1662. DOI: <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.084>
15. Application of frequency selection and geoelectrical sounding methods of mapping of leachate's pathways in an active dumpsite / T.A. Adagunodo, A.I. Ojoawo, N.O. Anie, P.O. Edukugho // *SN Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 5. – P. 352. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05557-8>
16. Гусев А.П. Комплексование космической съемки и геоэлектрических методов при диагностике химического загрязнения геологической среды // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. – 2023. – № 3. – С. 133–140.
17. The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: a review of the current status, future trends, and practical considerations / G.T. Yengoh, D. Dent, L. Olsson, A.E. Tengberg, C.J. Tucker. – Lund: University Centre for Sustainability Studies LUCSUS, 2014. – 80 p.
18. Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П. Многолетняя динамика вегетационных индексов темнохвойных лесов после повреждения сибирским шелкопрядом // *Лесоведение*. – 2016. – № 1. – С. 3–14.
19. Miller J.D., Quayle B. Calibration and validation of immediate post-fire satellite-derived data to three severity metrics // *Fire Ecology*. – 2015. – Vol. 11. – № 2. – P. 12–30. DOI: <https://doi.org/10.4996/fireecology.1102012>
20. Мюльгаузен Д.С., Панкратова Л.А., Лесовая С.Н. Оценка экологического состояния ландшафтов по данным о продуктивности растительного покрова // *Гигиена и санитария*. – 2017. – Т. 96 (8). – С. 723–729.
21. Гусев А.П., Шпилевская Н.С. Фитоиндикаторы техногенного химического воздействия на луговые экосистемы // *Экосистемы*. – 2020. – Т. 22. – С. 53–59.
22. Prakasam C., Aravindh R., Nagarajan B. Estimating NDVI and LAI as a precursor for monitoring air pollution along the BBN industrial corridor of Himachal Pradesh, India // *Proceedings*. – 2022. – Vol. 61 (2). – P. 593–603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.360>
23. Особенности формирования ландшафтно-геохимических барьеров в зоне влияния отходов химических производств (Гомельский химический завод) / А.П. Гусев, О.В. Шершнева, А.И. Павловский, И.О. Прилуцкий, А.Ф. Акулевич // *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геохронология*. – 2013. – № 2. – С. 147–152.
24. Бобачев А.А., Большаков Д.К., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электроразведка. Т. 2. Малоглубинная электроразведка / под ред. А.А. Бобачева, В.А. Шевнина. – М.: МГУ, 2013. – 123 с.

Сведения об авторах

Андрей Петрович Гусев, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геологии и географии, Гомельский Государственный университет им. Ф. Скорины, Республика Беларусь, 246028, г. Гомель, ул. Советская, 104. andi_gusev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1169-1172>

Поступила в редакцию: 11.01.2024

Поступила после рецензирования: 18.01.2024

Принята к публикации: 27.09.2024

REFERENCES

1. Ogilvy A.A. *Fundamentals of engineering geophysics*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 501 p. (In Russ.)
2. Pozdnyakov A.I., Shein E.V., Fedotova A.V., Shvarov A.P., Yakovleva L.V. *Assessment of soil and groundwater salinity using electrical resistance methods*. Astrakhan, Astrakhan University Publ., 2013. 71 p. (In Russ.)
3. Gusev A.P., Verutin M.G., Kaleichik P.A., Prilutsky I.O., Shavrin I.A. Geoelectric diagnostics of geological environment pollution in the zone of influence of a toxic waste site. *Bulletin of Perm University. Geology*, 2019, vol. 18, no. 1, pp. 79–85. (In Russ.)
4. Meju M.A. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, vol. 44, pp. 115–150. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(00\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00011-2)
5. Lashkaripour G.R., Sadeghi H., Qushaei M. Vertical electrical soundings for groundwater assessment in Southeastern Iran: a case study. *Journal of Applied Sciences*, 2005, vol. 5, no. 6, pp. 973–977. DOI: <https://doi.org/10.3923/jas.2005.973.977>
6. Anomohanran O. Investigating the geoelectric response of water saturated and hydrocarbon impacted sand in the vicinity of petroleum pipeline. *International Journal of Applied Science and Technology*, 2013, vol. 3, no 2, pp. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.4236/jwarp.2014.68070>
7. Mycka M., Mendecki M.J. An application of geoelectrical methods for contamination plume recognition in Urbanowice waste disposal. *Contemporary Trends in Geoscience*, 2014, vol. 2, pp. 42–47. DOI: <https://doi.org/doi.10.2478/ctg-2014-0006>
8. Ofomola M.O. Mapping of aquifer contamination using geoelectric methods at a municipal solid waste disposal site in Warri, Southern Nigeria. *Journal of Applied Geology and Geophysics*, 2015, vol. 3, pp. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.9790/0990-03313947>

9. Park S., Yi M.-J., Kim J.-H., Shin S.W. Electrical resistivity imaging (ERI) monitoring for groundwater contamination in an uncontrolled landfill, South Korea. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, vol. 135, pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.07.004>
10. Moghaddam S., Dezhpasand S., Kamkar Rouhani A., Parnow S., Ebrahimi M. Detection and determination of groundwater contamination plume using time-lapse electrical resistivity tomography (ERT) method. *Journal of Mining & Environment*, 2017, vol. 1, no. 8, pp. 103–110. DOI: <https://doi.org/10.22044/jme.2015.523>
11. Duda R., Mzyk S., Farbisz J., Bania G. Investigating the pollution range in groundwater in the vicinity of a tailings disposal site with vertical electrical soundings. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, vol. 29 (1), pp. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/100478>
12. Sanuade O.A., Arowoogun K.I., Amosun J.O. A review on the use of geoelectrical methods for characterization and monitoring of contaminant plumes. *Acta geophysics*, 2022, vol. 70, pp. 2099–2117. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00858-9>
13. Bedair M.F., Rifai R.I., Gamal A., Barseem M.S.M. Application of geoelectric technique in groundwater protection of quaternary aquifer in Wadi El Natrun, Egypt. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 2023, vol. 27, no. 2, pp. 29–48. DOI: [10.9734/JGEEI/2023/v27i2669](https://doi.org/10.9734/JGEEI/2023/v27i2669)
14. Asfahani J. Geo-electrical investigation for characterizing the shallow Quaternary aquifer parameters and vulnerability to contamination: a case study from semi-arid Khanasser Valley region, Syria. *Water Practice & Technology*, 2023, vol. 18, no. 7, pp. 1639–1662. DOI: [10.2166/wpt.2023.084](https://doi.org/10.2166/wpt.2023.084)
15. Adagunodo T.A., Ojoawo A.I., Anie N.O., Edukugho P.O. Application of frequency selection and geoelectrical sounding methods of mapping of leachate's pathways in an active dumpsite. *SN Applied Sciences*, 2023, vol. 5, pp. 352. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05557-8>
16. Gusev A.P. Integrating satellite imaging and geoelectric methods in diagnosing chemical contamination of the geological environment. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 3, pp. 133–140. (In Russ.)
17. Yengoh G.T., Dent D., Olsson L., Tengberg A.E., Tucker C.J. *The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: a review of the current status, future trends, and practical considerations*. Lund, University Centre for Sustainability Studies LUCSUS, 2014. 80 p.
18. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eidlina S.P. Long-term dynamics of vegetation indices of dark coniferous forests after damage by the Siberian silkworm. *Forestry*, 2016, no. 1, pp. 3–14. (In Russ.)
19. Miller J.D., Quayle B. Calibration and validation of immediate post-fire satellite-derived data to three severity metrics. *Fire Ecology*, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 12–30. DOI: <https://doi.org/10.4996/fireecology.1102012>
20. Mulhausen D.S., Pankratova L.A., Lesovaya S.N. Assessment of the ecological state of landscapes based on data on the productivity of vegetation cover. *Hygiene and sanitation*, 2017, vol. 96 (8), pp. 723–729. (In Russ.)
21. Gusev A.P., Shpilevskaya N.S. Phytoindicators of technogenic chemical impact on meadow ecosystems. *Ecosystems*, 2020, vol. 22, pp. 53–59. (In Russ.)
22. Prakasam C., Aravindh R., Nagarajan B. Estimating NDVI and LAI as a precursor for monitoring air pollution along the BBN industrial corridor of Himachal Pradesh, India. *Proceedings*, 2022, vol. 61 (2), pp. 593–603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.360>
23. Gusev A.P., Shershnev O.V., Pavlovsky A.I., Prilutsky I.O., Akulevich A.F. Features of the formation of landscape-geochemical barriers in the zone of influence of chemical production waste (Gomel Chemical Plant). *Geoecology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2013, no. 2, pp. 147–152. (In Russ.)
24. Bobachev A.A., Bolshakov D.K., Modin I.N., Shevnin V.A. *Electrical prospecting*. Vol. 2. Shallow electrical prospecting. Eds. A.A. Bobachev, V.A. Shevnin. Moscow, MGU Publ., 2013. 123 p. (In Russ.)

Information about the authors

Andrei P. Gusev, Cand. Sc., Head of the Department of Geology and Geography, Francisk Skorina Gomel State University, 104, Sovetskaya street, Gomel, 246028, Republic of Belarus; andi_gusev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1169-1172>

Received: 11.01.2024

Revised: 18.01.2024

Accepted: 27.09.2024