

## Комплексирование космической съемки и геоэлектрических методов при диагностике химического загрязнения геологической среды

© 2023 А. П. Гусев✉

*Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,  
ул. Советская, 104, 246019, Гомель, Беларусь*

### Аннотация

*Введение:* Работа посвящена оценке химического загрязнения геологической среды на основе сопряженного использования космической съемки и геоэлектрических методов.

*Методика:* Разработан комплекс методов, состоящий из многозональной космической съемки (снимки спутников Sentinel-2) и геоэлектрических исследований (резистивиметрия поверхностных вод, съемка потенциала естественного электрического поля, вертикальное электрическое зондирование методом сопротивлений). В качестве индикаторов загрязнения использованы: вегетационные индексы и удельное электрическое сопротивление поверхностных вод и компонентов геологической среды (почвогрунты, подземные воды, горные породы).

*Результаты и их обсуждение:* В зоне влияния склада серы выделены техногенные модификации геосистем, отличающиеся по величине вегетационных индексов (ТМ-1, ТМ-2 и фоновая геосистема); по градиенту воздействия величина NDVI изменяется в 2–2.3 раза, величине NBR – 2.3–3.2 раза, величине SWVI в 4–21.4 раза; минерализация поверхностных вод изменяется от 0.3–1.1 до 3.5–10 г/дм<sup>3</sup>; выполнена оценка химического загрязнения верхней части геологической среды, определены направление движения загрязнения от источника, площадь и глубина загрязнения; по данным вертикального электрического зондирования в зоне ТМ-1 загрязнение проникло на глубину до 20 м.

*Заключение:* Разработанный комплекс методов позволяет оперативно и достаточно полно диагностировать состояние геологической среды, подвергающейся техногенному воздействию.

**Ключевые слова:** химическое загрязнение, геологическая среда, вегетационный индекс, геоэлектрический метод, кажущееся удельное электрическое сопротивление.

*Для цитирования:* Гусев А. П. Комплексирование космической съемки и геоэлектрических методов при диагностике химического загрязнения геологической среды // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2023. № 3. С. 133–140. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/133-140>

### Введение

Сложное строение геологической среды обуславливает необходимость комплексирования различных методов исследований (в том числе космических и наземных), позволяющих изучать ее различные свойства и, соответственно, давать более полную информацию о ее состоянии [1].

Цель исследований – изучение состояния геоло-

гической среды в зоне влияния экологически опасных объектов на примере склада серы крупного предприятия по производству минеральных удобрений с помощью комплекса методов. Решались следующие задачи: изучение химического загрязнения геологической среды в зоне влияния склада серы с помощью космической съемки и геоэлектрических исследований; выделение техногенных модификаций геосис-



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

---

✉ Гусев Андрей Петрович, e-mail: [andi\\_gusev@mail.ru](mailto:andi_gusev@mail.ru)

тем; выяснение механизма распространения загрязнения в геологической среде.

### Объект и методика исследований

Район исследований – юго-восток Беларуси. Для геологического строения характерен сплошной чехол четвертичных отложений, имеющих мощность в среднем 20–25 м. Тестовый участок, на котором проводились исследования расположен в водно-ледниковом ландшафте, характеризующимся волнистым рельефом и литогенной основой, представленной водно-ледниковыми песками и супесями, моренными суглинками. По данным бурения и шурфования верхняя часть разреза представлена техногенными грунтами (0.5 м), под которыми залегают водноледниковые отложения днепровского подгоризонта (песок серовато-желтый, мелкозернистый, плавун), имеющие мощность 2.7 м. Ниже залегают моренные отложения днепровского подгоризонта (супесь серая, красно-бурая, пластичная с включениями гравия и гальки 5–20 %). Абсолютные высоты в пределах участка – 131–132 м.

Вероятным источником техногенного загрязнения является склад серы, находящийся на территории крупного предприятия химической промышленности Беларуси. Механизм формирования загрязнения связан с окислением элементарной серы (которая складывается на открытой площадке) микроорганизмами, включая, вероятно, тионовые бактерии. Процесс окисления серы может описываться уравнением:



В зоне влияния склада серы находится геосистема заболоченного леса (мелколиственный лес разнотравный на дерново-глеевых супесчаных почвах). Фоновая геосистема представляет собой мелколиственный лес разнотравный на дерново-глеевых почвах.

Древесный ярус представлен ольхой черной, березой повислой, осинкой. Подлесок – крушина ломкая, ивы. В травяном ярусе – тростник обыкновенный, розг широколиственный, хмель обыкновенный, подмаренник цепкий, крапива двудомная, сныть обыкновенная, вербейник обыкновенный, осоки.

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.

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).

Методика работ включала:

расчет вегетационных индексов по данным многозональной космической съемки (снимки спутников Sentinel-2);

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).

В работе использованы результаты космической съемки 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.

Обработка и атмосферная корреляция космических снимков была выполнена в геоинформационной системе QGIS.

Вегетационные индексы рассчитывались по формулам, приведенным в таблице 1.

Для проведения геоэлектрических работ использована электроразведочная аппаратура ERA-MAX. Для съемки методом ЕЭП применены неполяризующиеся электроды системы ВИРГ. Интерпретации данных ВЭЗ проводилась с помощью программы IPI2Win. Для интерполяции и построения карт потенциала ЕЭП в изолиниях – Golden Software Surfer. Для определения минерализации вод использован портативный резистивиметр, измеряющий удельную электрическую проводимость и соответствующую ей минерализацию воды (в мг/дм<sup>3</sup>).

### Результаты и их обсуждение

Вегетационные индексы, определяемые на основе многозональной космической съемки, являются надежными индикаторами экологического состояния растительного покрова [3–5]. Имеет место высокая степень корреляции значений NDVI с фитомассой и продуктивностью растительности [4]. Индексы NBR и SWVI чувствительны к жизненному состоянию растительности [3, 5]. Ухудшение состояния растительности определяется по снижению величины указанных индексов относительно фонового растительного покрова.

В нашем случае величины вегетационных индексов четко фиксируют выделенные техногенные модификации и слабо меняются в зависимости от времени съемки. Для каждой модификации значения, полученные по одному снимку 2020 г., статистически не отличаются от средних значений, полученных по трем летним снимкам 2018 г. 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 – 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 – 4.28–8.03 раза. Изменения

вегетационных индексов по градиенту воздействия химического загрязнения отражают связанные с ним процессы деградации растительного покрова (табл. 2). По величине вегетационных индексов определены границы и площади ареалов распространения техногенных модификаций.

**Табл. 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)	$(NIR - SWIR1)/(NIR + SWIR1)$

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

**Табл. 2.** Изменения индикаторов химического загрязнения в зоне влияния склада серы  
[Table 2. Changes in indicators of chemical pollution in the zone of influence of the sulfur storage]

Индикатор [Indicator]	Градиент химического воздействия [Gradient of Chemical Pollution]		
	Фоновая геосистема [Natural Geosystem]	ТМ-2 [TM-2]	ТМ-1 [TM-1]
Вегетационные индексы [Vegetation indices]			
NDVI	0,773*	0,580	0,343
	0,763**	0,570	0,383
NBR	0,536	0,315	0,170
	0,509	0,308	0,220
SWVI	0,241	0,03	-0,08
	0,214	0,05	0,01
Геохимические показатели [Geochemical indicators]			
Минерализация поверхностных вод по данным резистивиметрии, г/дм <sup>3</sup> [Mineralization of surface waters according to resistivity data, g/dm <sup>3</sup> ]	0,3–1,1	0,5–1,5	3,5–10,0
pH поверхностных вод [surface water pH]	5,5–6,0	4,0–5,0	<3,0

Примечания: \* космический снимок 11.07.2020 г.; \*\* среднее значение по космическим снимкам 20.06.2018, 11.08.2018, 26.08.2018 г.

[Note: \* space image 07.11.2020; \*\* average value for space images 20.06.2018, 11.08.2018, 26.08.2018.]

Химическое загрязнение фиксируется в водах луж и каналов: по данным резистивиметрии в зоне ТМ-1 минерализация вод местами достигает 10 г/дм<sup>3</sup> (удельное электрическое сопротивление – менее 1 Ом·м). В зоне ТМ-2 минерализация поверхностных вод снижается до 0.5–1.5 г/дм<sup>3</sup>. В пределах фоновой геосистемы минерализация ниже 1 г/дм<sup>3</sup>, за исключением одной точки наблюдения, расположенной непосредственно напротив зоны ТМ-1. Негативное воздействие на растительность также обусловлено весьма высокой кислотностью вод: в зоне ТМ-1 величине рН ниже 3 единиц (табл. 2).

Вышерассмотренные методы дают представление о пространственной структуре загрязнения почв и поверхностных вод, однако, не позволяют однозначно определить источник и механизм распространения загрязняющих веществ в ландшафте. Для изучения особенностей движения поверхностных и подземных вод, их взаимосвязи, а также распространения фронта загрязнения в геологической среде были использованы геоэлектрические методы – естественного электрического поля (ЕЭП) и вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) на постоянном токе.

Метод ЕЭП 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. Глубинность метода составляет до 5–10 м [6].

Съемка потенциала ЕЭП проводилась нами по профилям, расположенным параллельно железной дороге (расстояние между профилями 20 м). На рис. 1 показаны изменения величины потенциала ЕЭП по профилю, расположенному южнее железной дороги (профиль 1), и по профилю, расположенному севернее железной дороги (профиль 2). Профиль 1 проходит по территории фоновой геосистемы. Значение потенциала здесь отрицательные (от -33.8 до -6.0 мВ), что указывает на нисходящий

характер движений вод в зоне аэрации (т.е. грунтовые воды питаются с поверхности). Часть профиля 2 проходит по территории зоны ТМ-1 (с 7 пикета).

Значения потенциала ЕЭП колеблются в районе нуля (от -5.1 до +1.5 мВ). Западная часть профиля 2 захватывает зону ТМ-2 (1–6 пикеты) и характеризуется отрицательными значениями потенциала (от -14.5 до -9.7 мВ). Соответственно в зоне ТМ-2 питание грунтового горизонта с поверхности идет более интенсивно, чем в зоне ТМ-1.

Карта-схема в изолиниях потенциала ЕЭП (рис. 2) дает представление о пространственной структуре движения грунтовых вод на изучаемом участке. Видно, что зона ТМ-1 характеризуется положительными значениями потенциала (т.е. здесь происходит разгрузка грунтовых вод), а остальная часть территории – отрицательными (инфильтрация поверхностных вод в грунтовый горизонт).

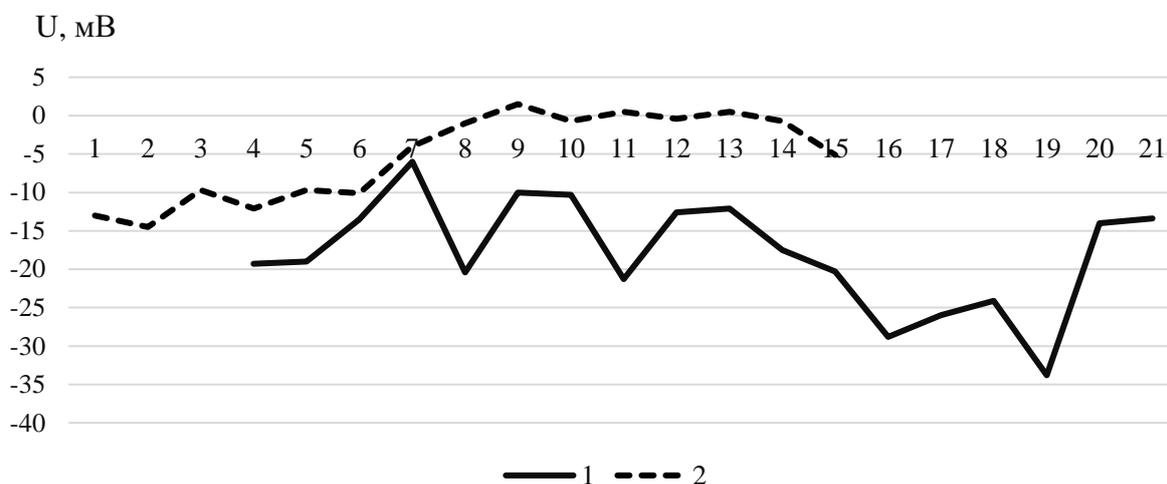


Рис. 1. Изменения потенциала ЕЭП по профилям, пересекающим фоновую геосистему (профиль 1) и ее модификации (профиль 2).

[Fig. 1. Changes in the CES potential along profiles crossing the background geosystem (profile 1) and its modifications (profile 2).]

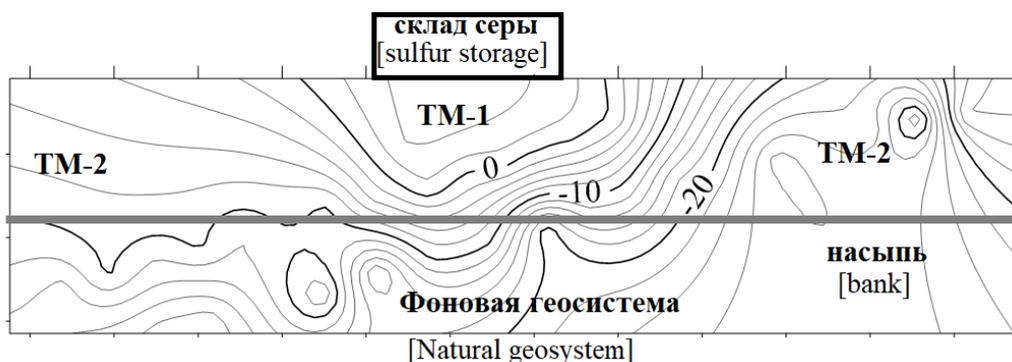


Рис. 2. Изолинии потенциала ЕЭП (в мВ) в зоне влияния склада серы.

[Fig. 2. Isolines of the CES potential (in mV) in the zone of influence of the sulfur storage.]

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. Насыпь железной дороги, может выполнять роль геохимического барьера, защищающего фоновую геосистему от воздействия со стороны источника в случае формирования поверхностного стока в весенний период.

Для выяснения распространения загрязнения в глубину были выполнены ВЭЗ. Установлены существенные изменения в геоэлектрических характеристиках геологической среды. Так, кажущееся электрическое сопротивление в зоне ТМ-1 на глубине, соответ-

ствующей разности АВ=3 м (т.е. 0.3–0.75 м), отличается от аналогичного показателя в фоновой геосистеме в 15.6 раза, на глубине, соответствующей разности АВ=6 м (0.6–1.5 м), – в 11.3 раза, на глубине, соответствующей разности АВ=10 м (1–2.5 м), – в 10.7 раза.

На основе выполненных ВЭЗ был построен разрез кажущегося электрического сопротивления (псевдоразрез), а после интерпретации кривых ВЭЗ – геоэлектрический разрез (рис. 3). Электрическое сопротивление отражает как литологический состав пород, так и минерализацию подземных вод [6–8].

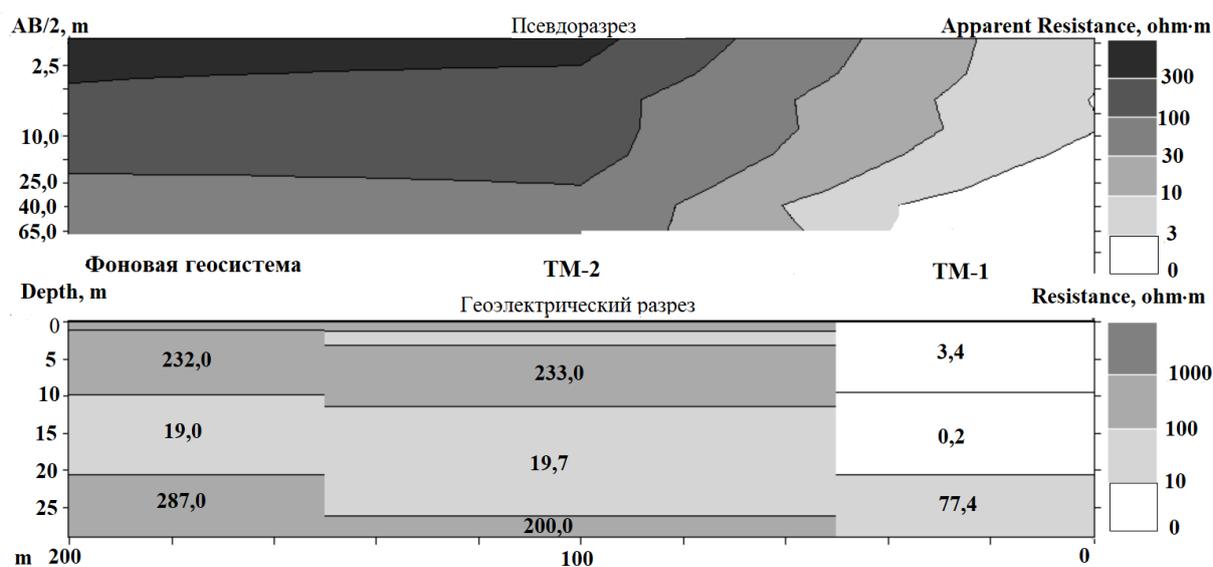


Рис. 3. Разрез кажущегося сопротивления (вверху) и геоэлектрический разрез (внизу) через зону влияния склада серы, Ом·м.

[Fig. 3. Apparent resistivity section (top) and geoelectric section (bottom) through the zone of influence of the sulfur storage, Ohm·m.]

В фоновой геосистеме и на участке ТМ-2 верхняя часть геологической среды состоит соответственно из 4 и 5 слоев, отличающихся по удельному электрическому сопротивлению. Самый верхний слой, характеризующийся высоким сопротивлением (400–500 Ом·м) и мощностью 1.1–1.3 м, соответствует песчаными почвам. Второй слой в фоновой геосистеме имеет сопротивление 232 Ом·м и мощность 9.7 м – грунтовый водоносный горизонт в водноледниковых 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. Ниже залегающий слой характеризуется высоким сопротивлением (287 Ом·м) и, вероятно, представляет собой отложения харьковской свиты 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 1.3 м. По сравнению с фоновой геосистемой более четкое выделение грунтового водоносного горизонта обусловлено его загрязнением, вызвавшее снижение удельного электрического сопро-

тивления. Ниже залегают моренные отложения и подморенный водоносный горизонт (19.7 Ом·м). С глубины 26 м они подстилаются отложениями палеогена (200 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. Снижение 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, грунтовой 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 исследования разработана модель распространения загрязнения в зоне влияния склада серы (рис. 4). На основе полученных данных 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 распрост-

раняется с грунтовыми водами, но, вероятно, к корнеобитаемому слою почв не подходит. В пределах фоновой геосистемы загрязнение уже практически не ощущается.

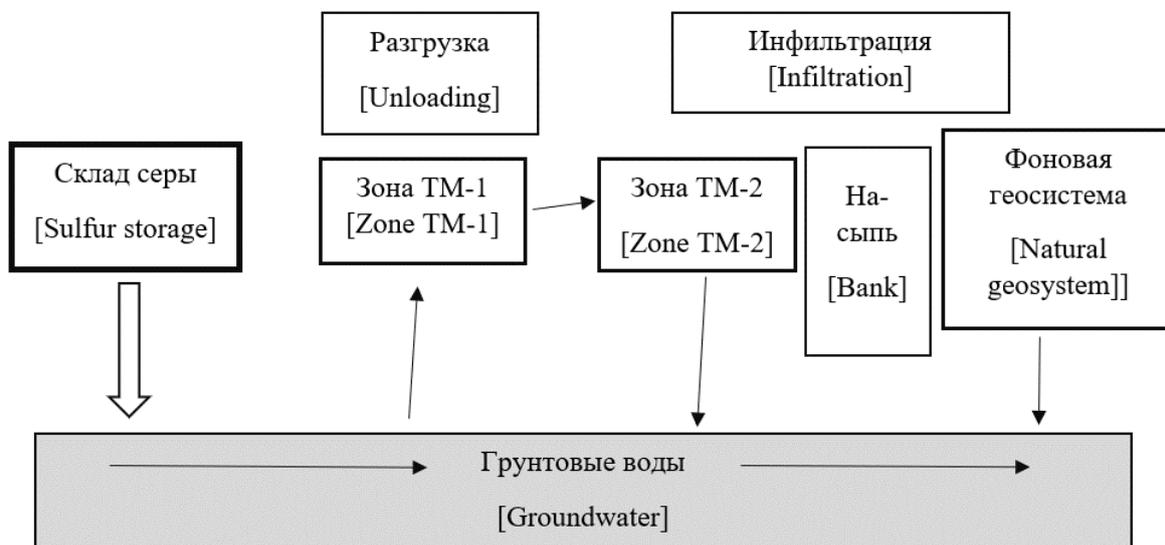


Рис. 4. Миграция загрязнения в зоне влияния склада серы.  
[Fig. 4. Migration of pollution in the zone of influence of the sulfur storage.]

### Заключение

Таким образом, комплексирование методов позволило получить достаточно полную картину химического загрязнения:

- дистанционные методы – по вегетационным индексам позволяют картировать зоны техногенной трансформации, определить их границы и площади;
- резистивиметрия поверхностных вод – дает возможность определить минерализацию поверхностных вод и ее пространственные изменения в зависимости от расстояния до источника;
- метод потенциала естественного электрического поля – позволяет установить закономерности движения грунтовых вод и соответственно миграции загрязняющих веществ;
- вертикальное электрическое зондирование методом сопротивлений – позволяет оценить глубину зоны загрязнения и описать ее вертикальную структуру.

**Конфликт интересов:** Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев А. П. Комплексирование фитоиндикации и геоэлектрического метода для оценки загрязнения геологической среды (на примере полигона химических отходов) // *Вектор ГеоНаук*. 2022. 5(1). С. 74–82.

2. Шентерова Е. М., Мазиров М. А., Гафурова Л. А., Джалилова Г. Т. Биология и экология почв. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2020. 217 с.

3. Стыщенко Ф. В., Барталев С. А., Егоров В. А., Лупян Е. А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли*. 2013. Т. 10. № 1. С. 254–266.

4. 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.

5. Гусев А. П., Шпилевская Н. С. Фитоиндикаторы техногенного химического воздействия на луговые экосистемы // *Экосистемы*. 2020. Т. 22. С. 53–59.

6. Огильви А. А. Основы инженерной геофизики. М.: Недра, 1990. 501 с.

7. Гусев А. П., Верутин М. Г., Калейчик П. А., Прилуцкий И. О., Шаврин И. А. Геоэлектрическая диагностика загрязнения геологической среды в зоне влияния полигона токсичных отходов // *Вестник Пермского университета. Геология*. 2019. Т. 18. № 1. С. 79–85.

8. Поздняков А. И., Шеин Е. В., Федотова А. В., Шваров, А. П., Яковлева, Л. В. Оценка засоления почв и грунтовых вод методами электрического сопротивления: учеб. Пособие. Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2013. 71 с.

## Integration of satellite imagery and geoelectric methods in the diagnosis of chemical pollution of the geological environment

© 2023 A. P. Gusev✉

*Francisk Skorina Gomel State University, st. Sovetskaya, 104, 246019, Gomel, Belarus*

### Abstract

**Introduction:** The work is devoted to the assessment of chemical pollution of the geological environment based on the combined use of satellite imagery and geo-electrical methods.

**Methodology:** A set of methods has been developed, consisting of multi-zone satellite imagery (images of the Sentinel-2 satellites) and geoelectric studies (resistivity of surface waters, survey of the potential of the natural electric field, vertical electrical sounding by the method of resistance). The following indicators of pollution were used: vegetation indices and electrical resistivity of surface waters and components of the geological environment (soils, groundwaters, rocks).

**Results and Discussion:** In the zone of influence of the sulfur warehouse, technogenic modifications of geosystems were identified, differing in the value of vegetation indices (TM-1, TM-2 and the background geosystem); according to the impact gradient, the NDVI value changes by 2–2.3 times, the NBR value by 2.3–3.2 times, the SWVI value by 4–21.4 times; mineralization of surface waters varies from 0.3–1.1 to 3.5–10 g/dm<sup>3</sup>; the assessment of chemical pollution of the upper part of the geological environment was carried out, the direction of movement of pollution from the source, the area and depth of pollution were determined; According to vertical electrical sounding data, in the TM-1 zone, pollution has penetrated to a depth of 20 m.

**Keywords:** chemical pollution, geological environment, vegetation index, geoelectric method, apparent electrical resistance.

**For citation:** Gusev A. P. Integration of satellite imagery and geoelectric methods in the diagnosis of chemical pollution of the geological environment // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 3, pp. 133–140. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/133-140>

**Conflict of interests:** The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

### REFERENCES

1. Gusev A. P. Kompleksirovaniye fitoindikatsii i geoelektricheskogo metoda dlya otsenki zagryazneniya geologicheskoy sredy (na primere poligona khimicheskikh otkhodov) [Combination of phytoindication and geoelectric method for assessing pollution of the geological environment (on the example of a chemical waste dump)]. *Vector GeoHauk – GeoScience Vector*, 2022, vol. 5, no. 1, pp. 74–82 (In Russ.)
2. Shenterova E. M., Mazirov M. A., Gafurova L. A., Dzhililova G. T. *Biologiya i ekologiya pochv* [Biology and ecology of soils]. Vladimir, VIGU publ., 2020, p. 217 (In Russ.)
3. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Egorov V. A., Lupyan E. A. Metod otsenki stepeni povrezhdeniya lesov pozharami na osnove sputnikovykh dannykh MODIS [Method for assessing the degree of forest damage by fires based on MODIS satellite data]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli – Modern problems of remote sensing of the Earth*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 254–266 (In Russ.)
4. 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 consideration.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

---

✉ Andrey P. Gusev, e-mail: [andi\\_gusev@mail.ru](mailto:andi_gusev@mail.ru)

Lund University Centre for Sustainability Studies LUCSUS, 2014, 80 p.

5. Gusev A. P., Shpilevskaya N. S. Fitoindikatoriy tekhnogenogo khimicheskogo vozdeystviya na lugovye ekosistemy [Phytoindicators of technogenic chemical impact on meadow ecosystems]. *Ekosistemy – Ecosystems*, 2020, vol. 22, pp. 53–59 (In Russ.)

6. Ogilvi A. A. *Osnovy inzhenernoy geofiziki* [Fundamentals of engineering geophysics]. Moscow, Nedra publ., 1990, p. 501 (In Russ.)

7. Gusev A. P., Verutin M. G., Kalejchik P. A., Priluckij I. O., Shavrin I. A. Geoelektricheskaja diagnostika zagraznenija

geologicheskoy sredy v zone vlijanija poligona toksichnyh othodov [Goelectric diagnostics of contamination of the geological environment in the zone of influence of the landfill of toxic waste]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya – Bulletin of the Perm University. Geology*, 2019, vol. 18, no. 1, pp. 79–85 (In Russ)

8. Pozdnyakov A. I., Shein Ye. V., Fedotova A. V. Shvarov, A. P., Yakovleva, L. V. *Otsenka zasoleniya pochv i gruntovykh vod metodami elektricheskogo soprotivleniya* [Assessment of soil and groundwater salinity by electrical resistivity methods]. Astrakhan, AGU publ., 2013, p. 71 (In Russ.)

---

Андрей Петрович Гусев, к. г.-м. н., декан геолого-географического факультета, доц. кафедры геологии и географии ГГУ им. Ф. Скорины, Гомель, Республика Беларусь; e-mail: andi\_gusev@mail.ru; ORCID 0000-0002-1169-1172

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

---

Andrey P. Gusev, PhD in Geol.-Min., dean of the Faculty of Geology and Geography, associate professor of the Department of Geology and Geography, Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus; e-mail: andi\_gusev@mail.ru; ORCID 0000-0002-1169-1172

Author have read and approved the final manuscript.