

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Камбалин И.О., Кошурников А.В., Балихин Е.И. Роль цифровых моделей рельефа для увеличения точности геофизических исследований техногенного металлического загрязнения в условиях криолитозоны (На примере Норильского полигона) // Арктика и Антарктика. 2024. № 4. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.4.71872 EDN: NKJSBV URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=71872](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=71872)

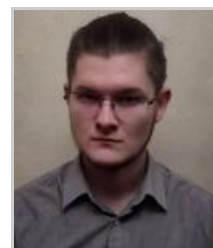
## Роль цифровых моделей рельефа для увеличения точности геофизических исследований техногенного металлического загрязнения в условиях криолитозоны (На примере Норильского полигона)

**Камбалин Игорь Олегович**

аспирант; географический факультет; Московский Государственный Университет

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1

✉ [igorkambalin@gmail.com](mailto:igorkambalin@gmail.com)



**Кошурников Андрей Викторович**

ORCID: 0000-0001-6160-7795

доктор геолого-минералогических наук

преподаватель; кафедра гляциологии и криолитологии; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

119192, Россия, г. Москва, ул. Столетова, 9, кв. 12

✉ [koshurnikov@msu-geophysics.ru](mailto:koshurnikov@msu-geophysics.ru)

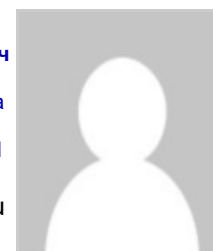


**Балихин Ермолай Игоревич**

аспирант; геологический факультет; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1

✉ [ermikus2@mail.ru](mailto:ermikus2@mail.ru)



---

[Статья из рубрики "Природные ресурсы Арктики и Антарктики"](#)

**DOI:**

10.7256/2453-8922.2024.4.71872

**EDN:**

NKJSBV

**Дата направления статьи в редакцию:**

03-10-2024

**Дата публикации:**

21-10-2024

**Аннотация:** Исследование направлено на повышение точности геофизических исследований антропогенного металлического загрязнения с использованием цифровых моделей рельефа (ЦМР). На примере Норильского полигона, расположенного в непосредственной близости к террикону шлаковых отвалов никелевого завода был апробирован метод комплексного изучения среды на основе данных ЦМР, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), для проведения детального геоморфологического анализа исследуемой территории. Также применялись геофизические методы естественного поля (ЕП) и частотного зондирования для выявления зон возможного распространения металлического загрязнения, а также характера и пространственного положения прогнозируемых мерзлых толщ. Основное внимание уделено преимуществам интеграции геофизических методов с ЦМР и производными картографическими материалами для повышения точности и достоверности обнаружения и картирования поверхностного металлического загрязнения с учётом геоэкологической ситуации в пределах исследуемого полигона. Использованы геофизические методы естественного поля (ЕП), метод частотного зондирования для определения электрофизических характеристик среды района исследования. Проведены рекогносцировочные работы и полётные миссии для формирования цифровой модели рельефа и ортофотоплана, а также создана схема распределения стоков поверхностных вод на основе полученных растров и проведено их дешифрирование. На основе полученных геофизических данных были выделены зоны предположительного распространения металлического загрязнения от шлакоотвального террикона, которые после анализа ЦМР подтвердились по характеру геоморфологии исследуемого участка. Картина распределения полей удельного электрического сопротивления также была проинтерпретирована с учетом полученных данных и показала свою состоятельность посредством заверки при помощи бурения. Стоит отметить, что комплексный подход позволил определить необходимость изменения плана интерпретации, так как только посредством анализа характера и интенсивности металлического загрязнения стало возможно объяснить аномально низкие значения сопротивлений в областях удаленных от термокарстовых озер и обладающих сравнительно низкими значениями глубин до многолетнемерзлых пород. Также стало возможно без определения количественного состава металлического загрязнения качественно оценить зоны накопления пылевого материала.

**Ключевые слова:**

Геофизическое исследование, Частотное зондирование, Метод естественного поля, БПЛА, ЦМР, Удельное электрическое сопротивление, Шлакоотвал, Террикон, Норильск, Геоэкологическое строение

**Природные условия района исследований**

Район исследований располагается в непосредственной близости к террикону шлакоотвала никелевого завода города Норильска. Климат района расположения

Норильска – субарктический, суровый, с продолжительной морозной зимой, причем очень часто сильные морозы отмечаются в сочетании с сильными ветрами. Характерной особенностью климата являются частые метели. Лето короткое, прохладное и пасмурное. Увлажнение достаточное, осадки практически равномерно выпадают в течение года. Над рассматриваемой территорией перенос воздушных масс обычно осуществляется в направлении с запада на восток, однако временами наблюдаются выходы циклонов с юга или юго-запада, обуславливающие нередко обильные осадки. Осенью, наоборот, сюда чаще вторгаются воздушные массы, приходящие с севера, – со стороны Баренцева и Карского морей. Зимой, особенно в декабре-феврале, циклоническая деятельность проявляется слабо, так как в это время обычно развивается антициклогенез. Участок изысканий расположен в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Наибольшая глубина сезонного оттаивания на метеостанции Норильск составляет 150 см.

Влажность воздуха характеризуется тремя основными показателями: парциальным давлением водяного пара (упругостью водяного пара) и относительной влажностью. Парциальное давление водяного пара увеличивается от зимы к лету, повторяя ход температуры воздуха, и в среднем за год составляет 4,1 гПа (таблица 5.1.8). Максимальное в году значение парциального давления водяного пара (10,9 гПа) наблюдается в июле, минимальное (0,7 гПа) – в январе. Относительная влажность воздуха имеет слабо выраженный годовой ход. Наиболее высокие её значения наблюдаются в осенние месяцы, наиболее низкие – в летние месяцы. Среднегодовая относительная влажность воздуха 77 %. Наименьшая относительная влажность, равная 67 % отмечается в июле, наибольшая, равная 82 %, – в октябре.

На участке изысканий располагаются два небольших озера, связанных через систему проток с рекой Наледной (Новой Наледной), протекающей в 360 м к востоку от границы участка (рис. 1).



### Условные обозначения

Зона проведения исследования

Рис. 1. Схема участка изысканий

Также по участку изысканий с запада на восток в направлении озер растекается поверхностный плоскостной сток с отвала Никелевого завода (искусственный сток). Данный сток распластан, течет между локальными понижениями рельефа. Глубина воды в потоке не более 10 см (в естественных углублениях), в среднем – 3–6 см.

Преимущественно, приповерхностные отложения сложены тундровыми глеево-торфянистыми и торфяными (глееземы торфянистые и торфяные тундровые) почвами, залегающими на глинистых и тяжелосуглинистых щебнистых породах. [\[1,2\]](#) Также были получены данные о составе техногенных отложений террикона, представленных силикатами железа ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ), обладающими хорошими проводящими свойствами при условиях активного выветривания [\[3,4\]](#).

### Методы исследований

Для определения характера распространения металлического загрязнения пылевыми частицами были произведены геофизические исследования методом естественного поля и методом частотного зондирования, а также полётные миссии на БПЛА для создания ЦМР.

Метод ЕП (естественного поля) основан на изучении естественных постоянных электрических полей, формирующихся вследствие окислительно-восстановительных, фильтрационных и диффузионно-адсорбционных процессов в среде [\[5\]](#). В силу высокой

чувствительности данного метода к окислительно-восстановительным реакциям, для производства работ использованы специальные неполяризующиеся электроды.

В ходе выполнения геофизических работ методом естественного поля, было сделано 704 физических наблюдений, по 11 профилям северо-западного простираения, расположенных в границах кадастрового участка исследований, расположенных на постоянном расстоянии друг от друга равным 10 м и перемещаемыми одновременно по профилю с шагом 10 метров. Расположение точек ЕП относительно участка проведения инженерно-геофизических изысканий приведены на рис. 2.

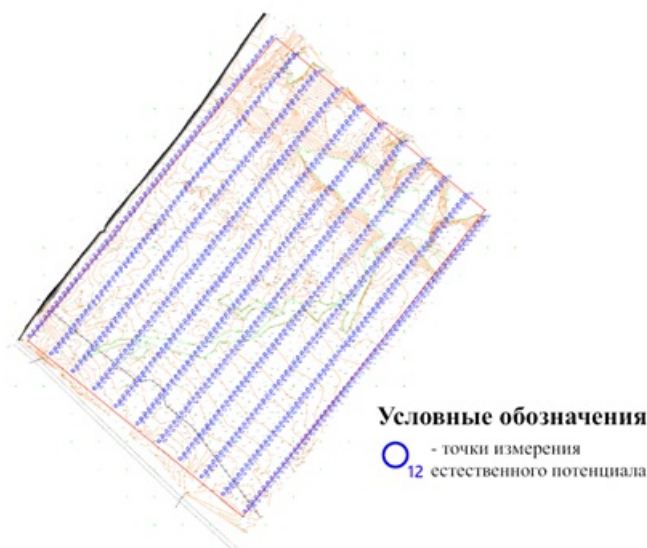


Рис. 2. Карта фактического материала по методу ЕП

Электропрофилирование методом частотного зондирования осуществлялось бесконтактным способом - создается управляемое по фазе переменное магнитное поле последовательно на нескольких частотах (количество частот выбирает оператор в зависимости от поставленной задачи). На каждой частоте выполняется измерение реальной и мнимой компонент вторичного поля. Цикл измерения на каждой частоте включает два этапа:

Первый - измерение прямого поля, по значению которого определяется величина тока в генераторе.

Второй - измерение сигнала от токов, наведенных в изучаемой среде.

Диапазон частот зондирования 2.5-250 кГц число значений частот 14, глубина исследуемого грунта до 7 м. Измеряемые сигналы обрабатываются путем трансформации в кажущиеся сопротивления. Распределения полученных кажущихся величин УЭС представляются в виде разрезов и карт.

Всего было выполнено 5414 физических наблюдения по 11 профилям северо-западного простираения. Шаг по профилю фиксирован и равен 0,5 метра, расстояние между профилями – 50 метров. Расположение точек относительно границ кадастрового участка приведены на рис. 3.

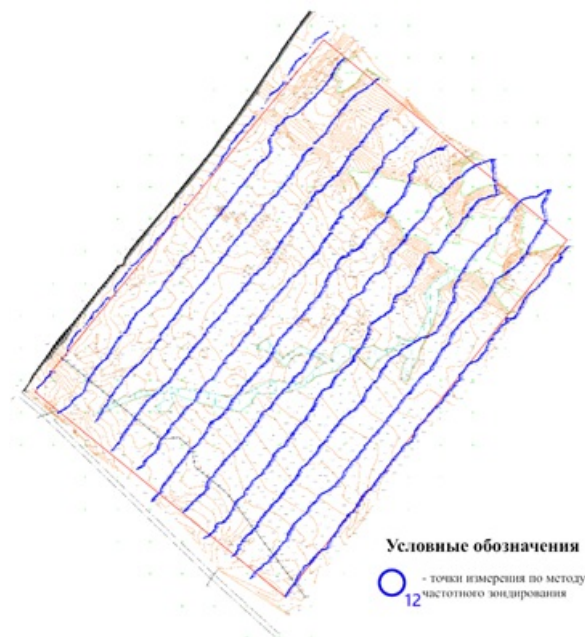


Рис. 3. Карта фактического материала по методу ЧЗ

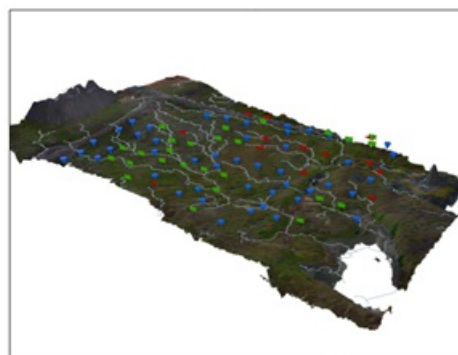
Также была проведена съемка цифровой модели рельефа на бпла Mavic 3 Enterprise с привязкой GNSS, которая обладает сравнительно низкой точностью для определения абсолютных координат точек модели в пространстве, но высокой точностью точек относительно друг друга, что позволило произвести дешифрирование по ортофотоплану, а также построить карту распределения стоков по характеристикам наклона в пределах каждой ячейки (пикселя) растра поверхности (рис. 4).

### Результаты и обсуждение

Полученные данные методом комплексного анализа были изучены в программном комплексе ArcGis Pro и были выявлены следующие закономерности: 1. В областях распространения около-нулевых значений естественного напряжения по методу ЕП наблюдаются повышенные значения удельного электрического сопротивления по методу ЧЗ. Также, в этих областях наблюдается концентрация истоков линий стока.

2. Господствующие ветра имеют направление от террикона в ЮЗ части территории к СВ части исследуемой области, что говорит о возможности пылевого переноса терригенных отложений.

3. Области повышенных значений ЕП располагаются в местах с относительно низкой концентрацией растительности. После дешифрирования ортофотоплана также стало ясно, что эти области, в отличие от областей низких значений ЕП не заболочены, что видно на рис. 4.



#### Условные обозначения

точки измерения естественного поля  
на дневной поверхности 0 метров

• < -9, мВ

▲ -9 - 7, мВ

■ > 7, мВ

— Линии стока по данным ЦМР

Рис. 4. Значения естественного потенциала в точках измерения на дневной поверхности

Такие характеристики, при условии, в целом, постоянного литологического состава отложений, что было выявлено в ходе натурных наблюдений и заверочного бурения, были проинтерпретированы следующим образом:

1 . Области высоких удельных электрических сопротивлений, расположенные на относительном возвышении (в центральной части исследуемой территории) являются зоной распространения мерзлых грунтов. По-видимому, за счёт гипсометрического положения этой области металлические частицы в течение года не накапливаются в этой области, а при накоплении – смываются сезонными осадками.

2 . Области низких удельных электрических сопротивлений могут иметь наведенную проводимость за счёт окислительных процессов в пределах областей высоких значений естественного потенциала, что объясняет несоответствие глубин до высокоомного слоя полученных в ходе исследования методом частотного зондирования в ЮЗ части площадки. Также это говорит о наличии загрязнения металлическими частицами сдувов со шлакоотвального террикона, которые подвержены воздействию света и воздуха и находятся в активной стадии выветривания.

3 . В областях пониженных естественных потенциалов, напротив, наблюдается большая заболоченность территории, что говорит о развитии микробиологической активности, способствующей ускорению восстановительных реакций с учетом притока ионов с ЮЗ части территории. Однако, так как значения сопротивлений в этой части остаются высокими – велика вероятность, что металлическая пыль в этой оседает в меньшей степени (рис. 5).



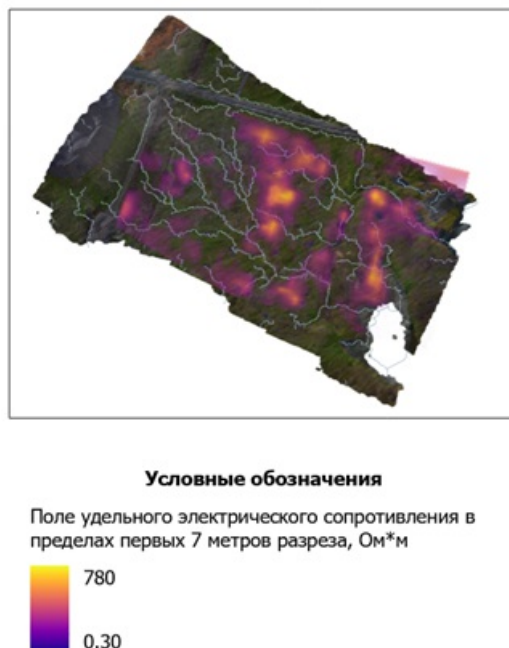


Рис. 5. Модель распространения электрического сопротивления по методу частотного зондирования в первых семи метрах разреза

Актуальность исследования сдувов с террикона шлакоотвала проявляется в недостаточной изученности схожих процессов и широкой их распространенности [6,7]. Территория шлакоотвала Никелевого завода в Норильске представляет собой сложную геофизическую среду, характеризующуюся многолетней мерзлотой и неоднородными грунтами с развитым техногенным загрязнением. Но при правильном комплексировании методов непрямого изучения грунтов можно эффективно решать задачи по картированию как геокриологических характеристик среды, так и экологических. Чтобы подтвердить это положение построена карта-схема природных условий и техногенного загрязнения (рис. 6), которая позволяет в пространстве оценить распространение загрязнения с юго-запада на северо-восток, а также влияние этого загрязнения на структуру выделяемых мерзлых толщ. Так, стало ясно, что мерзлые толщи распространены в пределе большей части исследуемой площадки, глубина до кровли составляет от 30 сантиметров, до 2.4 метров с юга к северу, соответственно. Однако, в непосредственной близости к двум озёрам в северной части наблюдается таликовая область в которой кровлю мерзлоты не удалось обнаружить методом частотного зондирования, что говорит о её глубоком залегании. Проведение дополнительных исследований материалов керна позволяет оценить абсолютные значения загрязнений, однако, без анализа оных оценка возможна только на качественном уровне.

### Заключение

Нашими исследованиями установлено, что металлическое загрязнение распространено в пределах исследуемой почти повсеместно, максимальное удаление загрязненных территорий от центра террикона шлаковых отвалов достигает 980 метров. Мощность сезонно-талого слоя в пределах исследуемой территории колеблется от 0.3 сантиметров до 2 метров (с юга на север с локальным уменьшением до 0.25 в центральной части) и переходит в таликовую зону на севере, в которой обнаружить кровлю мерзлых пород не удалось. Высокая заболоченность наблюдается в северной части исследуемой территории, что, однако, не приводит к увеличению мощности сезонно-талого слоя, но и металлическое загрязнение в этой области замечено в наименьшей степени. Южная часть, в свою очередь, обладает значительно большей загрязненностью металлическими



частицами, значительную концентрацию линий стока и близкое залегание многолетне мерзлых пород. Цифровая модель рельефа, послужившая основой для анализа стока и геоморфологического исследования, позволила более точно оконтурить и оценить как геоэкологическое строение участка, так и характер техногенного загрязнения.

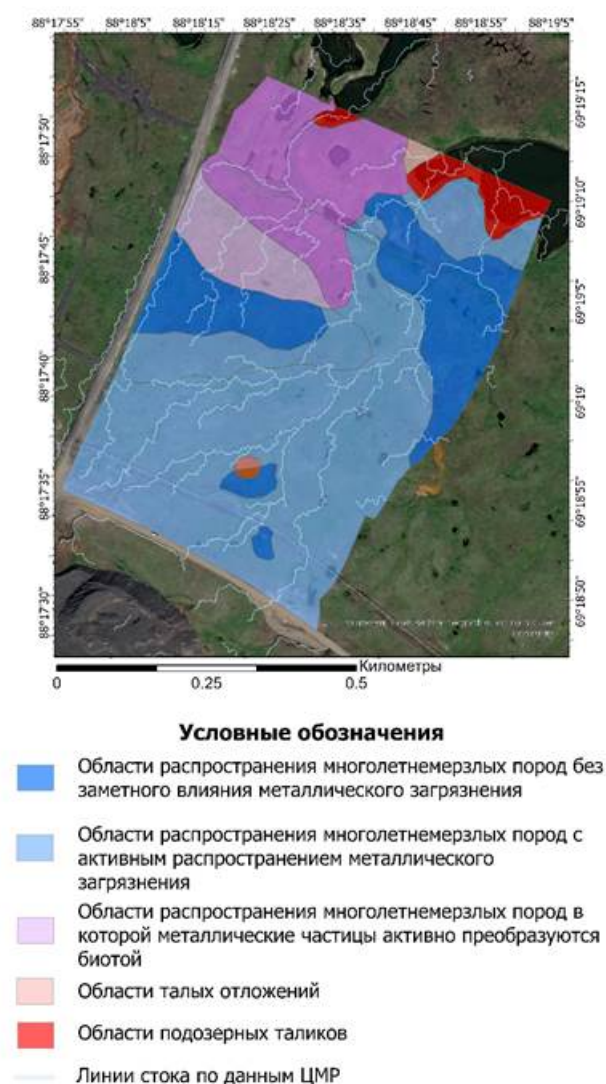


Рис. 6. Комбинированная карта-схема природных условий и техногенного загрязнения

## Библиография

1. Карта четвертичных отложений: R-45 (Норильск). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Третье поколение. Норильская серия. Карта четвертичных образований, масштаб: 1:1000000 / ред. В.А. Радько. М. : ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2016.
2. Падерин П.Г., Деменюк А.Ф., Назаров Д.В., Чеканов В.И. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Норильская. Лист R-45 — Норильск. Объяснительная записка; СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016.
3. Халтурина Т.И. К вопросу утилизации металлургического шлака никелевого производства // Вестник ИргТУ. 2016. № 3 (110). С. 124-130.
4. Ковтун А.А. Физические свойства Земли по данным глубинной геоэлектрики // Вопросы геофизики. 2009. Вып. 42, С. 84-104.
5. Хмелевской В.К., Костицын В.И. Основы геофизических методов: учебник для вузов.;

П. : Пермский университет, 2010.

6. Богословский В.А., Жигалин А.Д., Хмелевской В.К. Экологическая геофизика: учебное пособие.; М. : Издательство Московского государственного университета, 2000.

7. Пустозеров М.Г. Возможности геофизических методов при изучении свалок твердых отходов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2002. № 2, С. 182.

## Результаты процедуры рецензирования статьи

*В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.*

*Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).*

Предметом исследования в данной работе являются цифровые модели рельефа техногенно загрязненных территорий криолитозоны.

Методология исследования заключается в геофизических исследованиях методами естественного поля и частотного зондирования, а также методом цифровой съёмки модели рельефа с помощью БПЛА. В ходе выполнения геофизических работ было выполнено 5414 физических наблюдения по 11 профилям северо-западного простирания.

Актуальность исследований заключается в необходимости всестороннего изучения роли цифровых моделей рельефа для увеличения точности геофизических исследований техногенного металлического загрязнения в условиях криолитозоны Норильского полигона. Геофизические исследования техногенного металлического загрязнения в условиях криолитозоны очень важны и в последние годы стали особенно актуальными в связи с потеплением климата и техногенным загрязнением окружающей среды. Так, Норильский центр по добыче и переработке цветных металлов ежегодно в атмосферу выбрасывает 2 млн. т диоксида серы, около 60 тыс. т хлора, десятки тонн пыли и других загрязнителей. В загрязнении грунтовых комплексов вносят и различные накопители твердых отходов. Серьезной проблемой является ветровой перенос загрязнителей с поверхностей этих отстойников. Проблема консервации отходов производства осложняется наблюдаемой в регионе тенденцией к деградации многолетней мерзлоты, при этом увеличиваются глубины сезонного протаивания грунтов, которые еще более усугубляют геоэкологическую и геокриологическую ситуацию (появлению надмерзлотных таликов в основаниях сооружений, приводящих к заболачиванию огромных территорий; потере несущей способности грунтов оснований, усиленной миграции тяжелых металлов, радионуклидов и других экологически опасных загрязнителей). В связи с этим, тема исследований автора данной статьи весьма актуальна в настоящее время.

Научная новизна заключается в применении электропрофилирования методом частотного зондирования бесконтактным способом. Сущность которого заключается в том, что создается управляемое по фазе переменное магнитное поле последовательно на нескольких частотах (количество частот выбирает оператор в зависимости от поставленной задачи), на каждой частоте выполняется измерение реальной и мнимой компонент вторичного поля. Первый - измерение прямого поля, по значению которого определяется величина тока в генераторе. Второй - измерение сигнала от токов, наведенных в изучаемой среде.

Стиль статьи - научный, соответствует установленным требованиям журнала. Структура статьи включает в себя введение, результаты и обсуждение, заключение, библиографию. Содержание научной статьи полностью раскрывает ее тему, выводы доказательны и обоснованы. Текст написан грамотно, однако следует его немного

расширить, согласно требованиям журнала (должно быть не менее 12 тысяч знаков). Библиография статьи, включает в себя 7 литературных источников, что не соответствует требованиям журнала (должно быть не менее 15 источников). Отсутствуют источники на иностранном языке (желательно не менее 2 источников). В тексте имеются корректные ссылки на используемые литературные источники.

Выводы в рецензируемой статье достаточно аргументированы и обоснованы. Исследованиями установлено, что металлическое загрязнение распространено в пределах исследуемой почти повсеместно, максимальное удаление загрязненных территорий от центра террикона шлаковых отвалов достигает 980 метров. Высокая заболоченность наблюдается в северной части исследуемой территории, однако это не приводит к увеличению мощности сезонно-талого слоя, а металлическое загрязнение в этой области заметно в наименьшей степени.

Рецензируемая работа бесспорно имеет практическую значимость. Цифровая модель рельефа, послужившая основой для анализа стока и геоморфологического исследования, позволила более точно оконтурить и оценить как геокриологическое строение участка, так и характер техногенного загрязнения. Это очень важно с точки зрения практического применения результатов исследований.

Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на использованные литературные источники. Рецензируемая статья несомненно будет интересна и полезна ученым, практикам для внедрения и обучающимся по направлению 1.6.7. «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение».

Данная статья заслуживает внимания научного сообщества, рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика» после устранения незначительных замечаний.