

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гордин В.М. Способы учета влияния рельефа при высокоточных гравиметрических измерениях: обзор. – М.: ВИЭМС, 1974. – 89 с. – (Сер. IX. Региональная, разведочная и промысловая геофизика: ВИЭМС. ОЦНТИ).
2. Долгаль А.С. Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитной съемки в горной местности. – Абакан: Таймыркомприродресурсы, 2002. – 187 с.: ил.
3. Симанов А.А. Повышение достоверности учета рельефа местности при высокоточных гравиметрических исследованиях // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 9. / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2011. – С. 144-146.
4. Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E., Hole-filled seamless SRTM data V 3. – 2006 / International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). – Текст электронный. – URL: <http://srtm.csi.cgiar.org>. (Дата обращения 23.09.2023).
5. Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // Environmental Research Letters. –2022. – V. 17, № 2. – 024016. – DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4ff.

УДК 550.837

DOI:10.7242/echo.2023.4.11

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ
ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЕСТЕСТВЕННОГО ПОЛЯ
НА КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ РУДНИКАХ**Ю.И. Степанов¹, И.Л. Кузнецов², Е.С. Зубрикова¹, А.А. Тайницкий¹¹Горный институт УрО РАН, г. Пермь²ПАО «Уралкалий»

Аннотация: Метод естественного электрического поля является одним из первых (Р.В. Фокс 1830), и стал отправной точкой развития многочисленных методов электроразведки. Он применяется для решения различных задач как в наземном, так и в скважинном и шахтном вариантах. Этому методу посвящено много фундаментальных и прикладных исследований. В то же время изучению возникновения естественного поля в подземных выработках соляных месторождений и его практическому применению посвящено малое количество исследований.

Ключевые слова: электроразведка, метод естественного электрического поля, рудники, калийно-магниевого месторождения, надсоленая и соляная толщи, диффузия, фильтрация.

Введение

Метод естественных электрических полей (ЕП) – один из старейших геофизических методов (Фокс, 1830). По генетическому признаку различают электрохимические, электрокинематические и диффузионные естественные поля. Необходимым условием возникновения естественного поля является наличие контакта твердой и жидкой фазы горных пород [1-2]. Как правило, ЕП узлокализировано в пространстве, его интенсивность изменяется от первых до сотен милливольт. Долгое время метод ЕП применялся в наземном варианте для поисков и оконтуривания рудных месторождений. С течением времени естественные электрические поля, обусловленные не природными электронными проводниками (фильтрационные, диффузионные, ранее рассматриваемые как помехи), стали предметом специальных исследований и начали использоваться для решения практических задач при изучении слабопроводящих объектов, для решения гидрогеологических и инженерно-геологических и других задач (Семенов А.С., 1980, Огильви, Титов В.К., 2003). Впервые попытки изучения рудных естественных полей в подземных горных выработках предприняты в 19 веке (Фокс R.W.). Начиная с 50-х годов

20 века выполнен ряд исследований Череменинским Г.А., Рыссом Ю.С., Свешниковым Г.Б. для изучения возможности использования наблюдений ЕП в подземных выработках, в основном связанных с разработкой железорудных и угольных месторождений. В то же время изучению возникновения естественного поля в подземных выработках соляных месторождений и его практическому применению посвящено малое количество исследований.

В работе представлены некоторые практические результаты проведения метода ЕП в подземных выработках калийно-магниевых месторождений ПАО «Уралкалий» и ООО «Еврохим-Волгакалий». Шахтные электроразведочные работы на рудниках Верхнекамского месторождения начали выполнять с 1986 г. после аварийного обрушения на одном из рудников. Однако до настоящего времени осталось много невыясненных моментов, касающихся природы происхождения поля ЕП, влияния техногенных факторов, приуроченности аномалий к геологическим структурам и т.д.

В частности, по мнению авторов [6], природа возникновения естественного электрического поля обусловлена диффузионными процессами, которые возникают в областях контакта вод различной минерализации в надсолевой толще. Электродиффузионный потенциал возникает вследствие разности чисел переноса катионов и анионов в пористой среде, что определяется различием их подвижности и средней концентрации. При наличии градиента концентрации ионов диффузия происходит с разной скоростью, что приводит к нарушению равновесия и возникновению электрического поля.

Геологическое истолкование возникновения естественного поля как в надсолевой, так и соляной толщах приведено в работе [7], в которой указано, что при установлении специфики и взаимосвязи тектонических и эпигенетических процессов, проявившихся в надсолевой и соляной толщах Верхнекамского месторождения, отмечается, что проскальзывание надсолевой толщи над соляными поднятиями вызывает ее перегиб и формирование трещин отрыва, благоприятных для нисходящей инфильтрации атмосферных вод. Последние растворяют рассеянный в породе ангидрит, что увеличивает агрессивность подземных вод и вызывает активное выщелачивание карбонатного материала с образованием субвертикальных зон. В этих зонах в соляных отложениях наряду с типичными для соляной залежи минералами и формами их проявления зафиксированы специфические минерализованные зоны, которые обогащены пирротином и сфалеритом. Приуроченность сульфидной минерализации к границе двух пластов с различным характером складчатости позволяет предполагать разгрузку растворов в образовавшуюся между ними зону отслоения.

На шахтных полях Верхнекамского месторождения при измерении методом естественного поля применяют методику измерения градиентов со 100% повторением с шагом по профилю 10 или 30 м. В качестве неполяризующихся электродов используются электроды Рb-РbCl₂, которые позволяют проводить измерения естественного поля и ВП практически без влияния потенциала самих электродов.

Известно, что на результаты наблюдений методом ЕП существенное влияние оказывают техногенные помехи: блуждающие токи, металлические конструкции, электрические установки, генерирующие электрическое поле (комбайн, конвейер, вентилятор, заземляющий контур, СУБР, и др.), лужи и другие помехи. Приведем пример влияния подобных помех на результаты измерений методом ЕП по одному из штреков [3]. В штреке находятся токопроводящие предметы: работающий буровой станок на пикете 2040, подстанция ПК 2350, вентилятор и вагон на ПК 2480, заземляющий контур на ПК 2000-2100, которые создают техногенные помехи и оказывают влияние на результаты измерений.

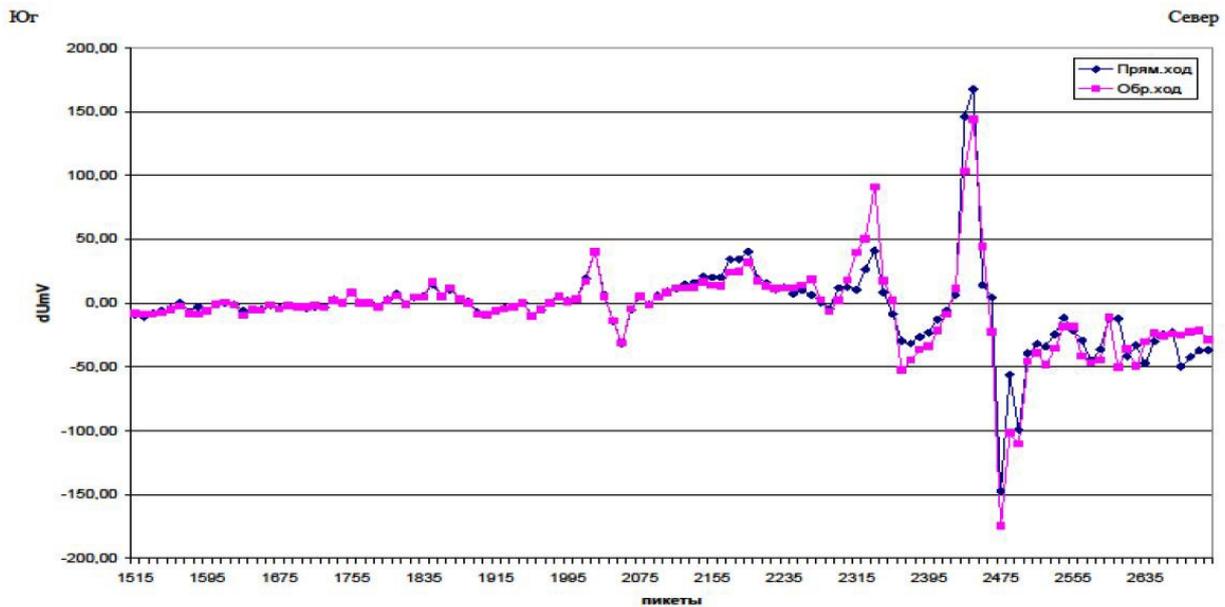


Рис. 1. Графики градиентов потенциалов естественного поля

Таким образом, при спокойном естественном поле (отсутствии блуждающих токов) аномалии естественного поля связаны только с техногенными помехами.

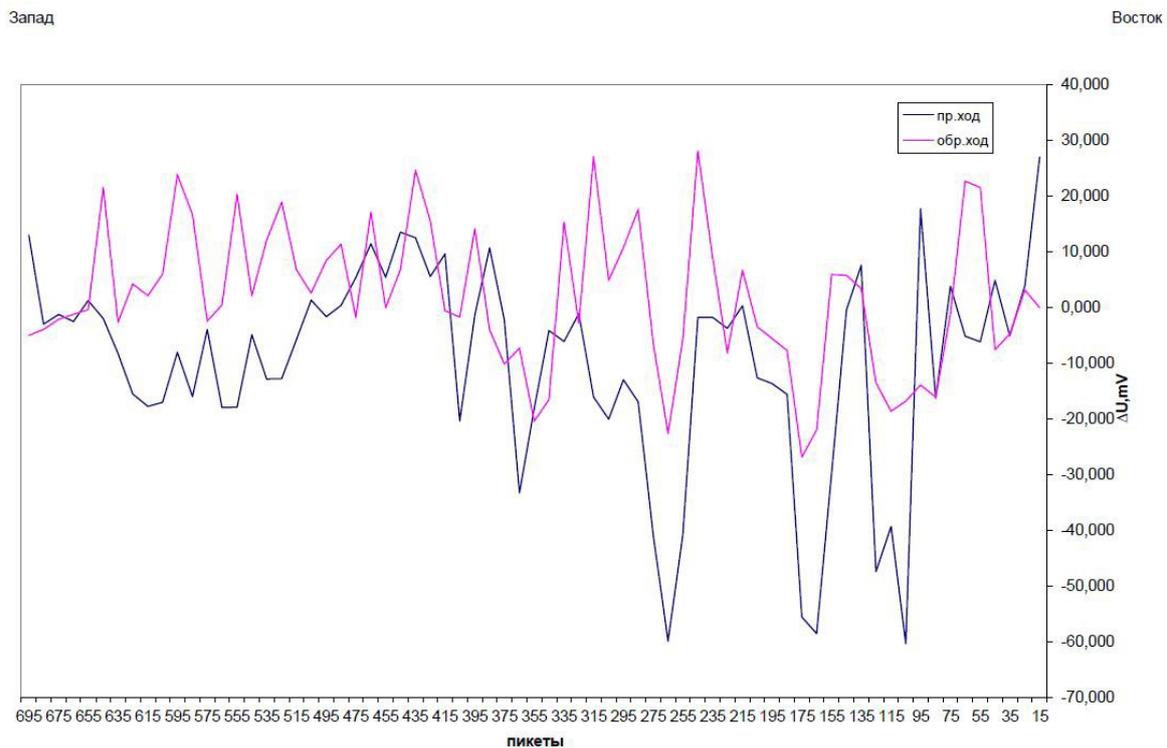


Рис. 2. Графики градиентов потенциалов естественного поля при наличии блуждающих токов

При наличии блуждающих токов, как это следует из рис. 2, результаты измерений в прямом и обратном ходе измерений сильно отличаются, градиент потенциала изменяется от -60 до $+30$ мВ. Такие измерения истолкованию не подлежат. При наличии этих помех оценивают интенсивность, область распределения этих полей, а также местоположение и режим работы источников. С учетом проявления помех определяются время и порядок проведения подземных наблюдений.

Приведем пример электроразведочных работ на одном из шахтных полей ООО «Еврохим-Волгакалий». В горной выработке протяженностью 475 м проведены работы методом естественного поля и трехразностного электрического профилирования. Профиль пересекает участки увлажнения кровли выработки (капель) 1/21 и 4/21 (рис. 3).

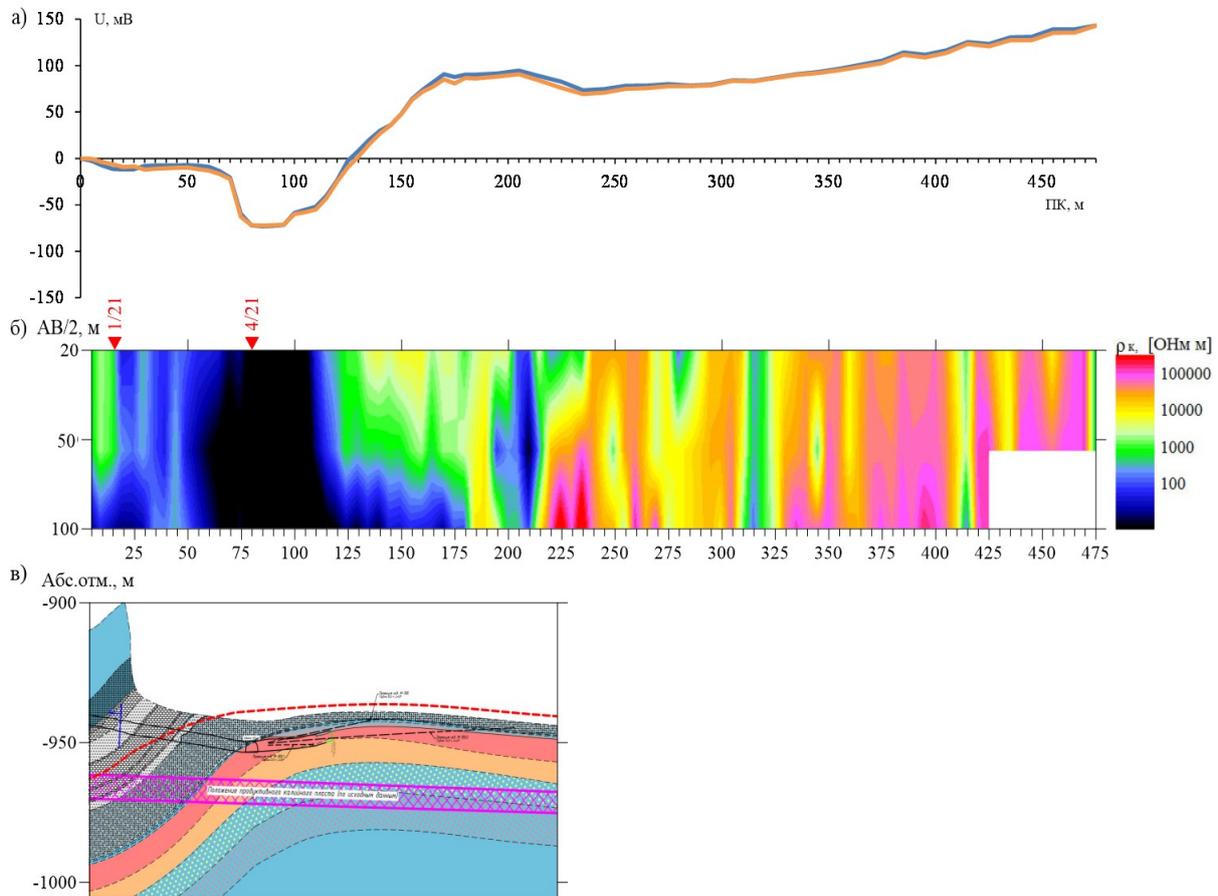


Рис. 3. Результаты метода ЕП а); трехразностного профилирования б); геологический разрез в выработке в)

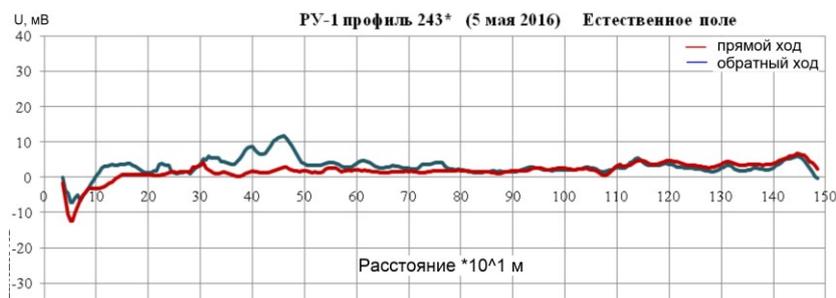
По данным метода ЕП (рис. 3а) значения потенциала естественного электрического поля изменяются в диапазоне от -72 до $+145$ мВ. В районе увлажнения 1/21 отмечается область отрицательных значений до -11 мВ. В районе увлажнения 4/24 (пикеты 60-120) прослеживается сильная отрицательная аномалия до -72 мВ, в этом интервале по данным трехразностного профилирования наблюдается зона пониженных сопротивлений (рис. 3б). На остальной части профиля прослеживается плавный рост потенциала в северном направлении без ярко выраженных неоднородных участков. Аномалии, обусловленные фильтрационными полями, обычно составляют порядок до 30 мВ. В данном случае, вероятнее всего, кроме фильтрационного потенциала формирование сопряженных аномалий связано с эпигенетическими процессами, проявившимися в надсолевой и соляной толщах. На рис. 3в представлен геологический разрез исследуемого участка, из которого видно, что аномальная область приурочена к породам сульфатно-карбонатного состава с включениями галита на северном крыле синклинальной структуры. Таким образом, в области резкого перегиба пород возможно наличие субвертикальной зоны трещиноватых пород, по которым происходит фильтрация вод. В этих зонах в соляных отложениях наряду с типичными для соляной залежи минералами и формами их проявления могут формироваться специфические минерализованные зоны, которые обогащены пирротинном и сфалеритом. В естественном поле эти зоны будут характеризоваться пони-

женными значениями потенциалов [3]. Результаты метода естественного поля на других участках данного шахтного поля указывает, что участкам увлажнения штреков соответствуют области отрицательных значений естественного поля. Эти практические материалы косвенно говорят о возможной причине возникновения естественного поля вследствие электрокинетических явлений (фильтрационных полей). Отрицательные значения потенциала на первый взгляд можно связать с переувлажнением (лужи рассола) подошвы выработки, но приведенные ниже практические исследования позволяют усомниться в этом.

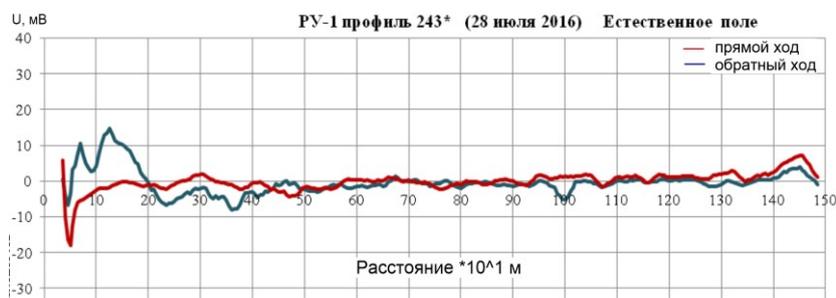
Приведем ежеквартальные мониторинговые измерения методом ЕП на одном из штреков шахтного поля ООО «Уралкалий» (профиль 243). На этом штреке протяженностью 1500 м проведены измерения поля ЕП градиентной установкой с шагом 10 м. На рис. 4 представлены результаты изменения потенциалов по подошве выработки.



Примечание: * – во время проведения геофизических работ на выработке в интервале ПК 0-30 – силовой кабель, заземляющий контур, щитки; ПК 10-15– сейсмометр, щитки; ПК 30-35 – будка, холодильная установка, лебедка; ПК 200-210, ПК 485-490, ПК 1155-1160, ПК 1270-1275, ПК 1320 – лужи рассола.



Примечание: * – во время проведения геофизических работ на выработке в интервале ПК 0-40 - силовой кабель, заземляющий контур, щитки, металлические бочки; ПК 10- 15- щитки, сейсмометр; ПК 20- 35- будка, холодильная установка, лебедка; ПК 60 - металлические ворота; ПК 65-70 - металлические конструкции; ПК 200-210 - лужи рассола, частично засыпаны; ПК 485-490, ПК 1155-1160, ПК 1270-1275, ПК 1320 – лужи рассола



Примечание: * – во время проведения геофизических работ на выработке в интервале ПК 0-32 – силовой кабель, заземляющий контур, щитки установка для проведения исследований по заморозке, холодильная установка; ПК 90 – сеймопавильон; ПК 355 – металлолом; ПК 195-210, ПК 410, ПК 490, ПК 885, ПК 1155, ПК 1150-1160, ПК 1270-1275, – лужи рассола.



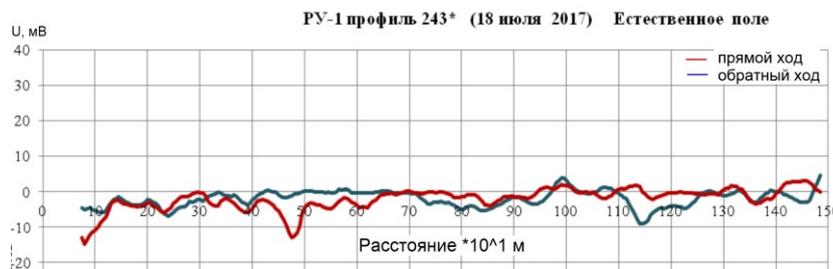
Примечание: * – во время проведения геофизических работ на выработке – в интервале ПК 60-70 – работает холодильная установка; ПК 90 – сейсмопавильон; ПК 355, ПК 450 – металлолом; ПК 195-210, ПК 410, ПК 490, ПК 885, ПК 1150-1160, ПК 1270-1275, ПК 1320 – лужи рассола.



Примечание: * – во время проведения геофизических работ на выработке в интервале ПК 90 – сейсмопавильон; ПК 195-210, ПК 485-490, ПК 1015, ПК 1155-1160, ПК 1270-1275, ПК 1315-1320 – лужи рассола.



Примечание: * – во время проведения геофизических работ на выработке в интервале ПК 90 – сейсмопавильон; ПК 195-210, ПК 485-495, ПК 1155-1160, ПК 1265-1280 – лужи рассола; ПК 350-355, ПК 360-375, ПК 450 – металлолом.



Примечание: * – во время проведения геофизических работ на выработке в интервале ПК 90 – сейсмопавильон; ПК 195-210, ПК 1155, ПК 1270-1275, ПК 1320-1325 – лужи рассола.



Примечание: * – во время проведения геофизических работ на выработке в интервале ПК 90 – сейсмопавильон; ПК 200-210, ПК 490-495, ПК 880-885, ПК 1020, ПК 1155-1160, ПК 1270-1280, ПК 1320-1325, ПК 1470 – лужи рассола; ПК 450 – м/трос; ПК 1005-1015 – м/конструкция.

Рис. 4. Результаты мониторинговых наблюдений методом ЕП по профилю 243

Как видно из графиков изменения потенциалов, поле ЕП спокойное, изменения в пределах от -5 до $+5$ мВ, при этом расхождения значений потенциалов в прямом и обратном ходе в большинстве случаев не превышают ошибки измерений. Что важно, в местах скопления рассолов на подошве штрека не наблюдается аномальных зон пониженных потенциалов, как это зафиксировано на рис. 3, где в зоне просачивания влаги с кровли выработки и скопления рассолов на подошве наблюдаются отрицательные зоны потенциалов естественного поля. Из этого факта практических исследований следует предположить, что в этом случае поле ЕП связано с фильтрационными процессами или обусловлено как диффузионными, так и фильтрационными явлениями в горных породах. Этот вопрос остается открытым и требует дальнейших исследований – как практических, так и путем численного моделирования. На некоторых графиках изменения потенциалов (рис. 4), например, за октябрь 2016 г. и октябрь 2017 г. потенциал изменяется в широких пределах от -60 мВ до $+50$ мВ, наблюдаются значительные расхождения потенциалов при повторных измерениях. Такие расхождения обусловлены техногенными помехами (включением или отключением электрических установок и блуждающими токами).

Выводы

При исследованиях методом ЕП на рудных полях калийно-марганцевых месторождений следует применять методику наблюдений со 100% повторением, которая позволяет определить влияние техногенных помех в виде блуждающих токов, работающих электрических установок и др. в районе проведения работ.

Считаем, что публикаций по данному методу недостаточно, чтобы сделать вывод о причинах возникновения естественного поля, следует продолжить как практические, так и теоретические исследования, которые по мере накопленных материалов позволяют осмысленно истолковать результаты метода ЕП.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер проекта 122012000398-0)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матвеев Б.К. Электроразведка. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 368 с.: ил.
2. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. – Л. Недра, 1980. – 446 с.: ил.

3. Степанов Ю.И., Бушуева Е.С. Опыт применения метода естественного поля в соляных шахтах // Инженерная и рудная геофизика – 2020: 16-я науч.-практ. конф. и выставка, 14-18 сент. 2020. – Пермь, 2020. – С. 47. – DOI: 10.3997/2214-4609.202051063.
4. Титов В.К. Электрокинетические явления в горных породах и их применение в геоэлектрике: дис. ... к.г.-м.н.; 25.00.10 / Титов Константин Владиславович. – СПб., 2003 – 198 с.: ил.
5. Михайленко А.А., Коносавский П.К., Титов К.В. Методические вопросы моделирования естественного электрического поля, вызванного откачкой воды из скважины // Математические модели техники, технологий и экономики: материалы Всерос. науч.-практ. студенч. конф., 14-15 мая 2019 г. – СПб., 2019. – С. 34-37.
6. Арсеньева А.А., Титов К.В., Коносавский П.К., Жуков А.А. Изучение природы естественного электрического поля, возникающего в подземной горной выработке в руднике на месторождении калийно-магниевых солей // Актуальные проблемы недропользования: тез. докл. XVIII Междунар. форум-конкурса студентов и молодых ученых. – СПб., 2022. – С. 208-210.
7. Чайковский И.И., Калинина Т.А., Коротченко О.В. Тектонические и эпигенетические процессы в надсолевой толще Верхнекамского месторождения // Литосфера. – 2015. – № 5. – С. 71-80.
8. Шевнин В.А., Бобачев А.А., Иванова С.В. Результаты применения методов естественного поля и электротомографии для изучения Александровского городища (Калужская область) // Записки Горного института. – 2015. – Т. 211. – С. 35-42.

УДК 550.831

DOI:10.7242/echo.2023.4.12

ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ РЕЗКО РАСЧЛЕНЕННОГО РЕЛЬЕФА

В.В. Хохлова

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация. При проведении гравиметрических работ на расчлененном рельефе сложность представляет не только выполнение съемки в горной местности, но и последующая первичная обработка гравиметрических данных. Тщательный подбор плотности промежуточного слоя, вычисление влияния топографических масс, слагающих рельеф, а также учет сферичности – всё это необходимые этапы обработки.

Ключевые слова: гравиразведка, расчлененный рельеф, сферичность, поправка за рельеф.

Согласно «Инструкции по гравиразведке» при обработке гравиметрических данных поправки Буге и за влияние рельефа вводятся в предположении, что промежуточный слой является плоской однородной горизонтальной пластиной. Возникающие при этом погрешности, обусловленные неучетом сферичности Земли, рассмотрены в работах [2, 6]. Рассмотрим учет сферичности Земли на примере гравиметрической съемки, выполненной в условиях среднегорного резко расчлененного рельефа.

При планировании гравиметрических работ в горной местности следует опираться на ландшафт. Допускается отклонение от прямолинейности профилей в случаях, когда необходимо избежать неблагоприятных участков для проведения измерений; либо выполнить наблюдения вдоль дорог, троп или горных ущелий. Для минимизации поправок за влияние рельефа при дальнейшей камеральной обработке следует выбирать местоположение точки наблюдения на относительно ровном участке. Желательно, чтобы в радиусе 1 метра не было неровностей рельефа более чем на 10 см. выше или ниже пункта наблюдения. Измерений на краю скал или крутых берегов рекомендуется избегать.