

5. Гравиразведка: справ. геофизика / под ред. Е.А. Мудрецово́й, К.Е. Веселова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 607 с.: ил.
6. Долгаль А.С. Декомпозиция решения обратной задачи гравиразведки рудного типа монтажным методом // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. – 2019. – № 1 (41). – С. 25-36. – DOI: 10.31431/1816-5524-2019-1-41-25-36.
7. Долгаль А.С., Костицын В.И., Новикова П.Н., Пугин А.В. Алгоритмы аппроксимации геопотенциальных полей истокообразными функциями // Геофизика. – 2016. – № 5. – С. 4-10.
8. Математический форум Math Help Planet [Электронный ресурс] – URL : <http://mathhelpplanet.com/static.php?p=iteratsionnyi-metod-shultsa-nakhozheniya-obratnoi-matritsy> (Дата обращения 2.04.2020 г.)
9. Пугин А.В. Истокообразные аппроксимации геопотенциальных полей. От теории к практике // Геофизические исследования. – 2018. – Т.19, № 4. – С. 16-30. DOI:10.21455/gr2018.4-2.
10. Фаддеев Д.К. Об обусловленности матриц // Труды математического института АН СССР. – 1959. – Т. 53. – С. 387–391.
11. Форсайт Д., Молер К. Численное решение систем линейных алгебраических уравнений: пер. с англ. – М.: Мир, 1969. – 166 с.: ил.

УДК 550.834.05

DOI:10.7242/echo.2020.2.11

ИЗУЧЕНИЕ СТРОЕНИЯ ЗОН ВЫКЛИНИВАНИЯ ПЛАСТОВ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ СОЛЯНЫХ РУДНИКОВ КОМПЛЕКСОМ ШАХТНОЙ И НАЗЕМНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

И.А. Санфи́ров

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Латеральная изменчивость толщин водоупорных пластов на месторождения водорастворимых полезных ископаемых – обычное геологическое явление. В отдельных случаях оно может принимать и критические формы вплоть до полного выклинивания, например в пределах разного рода положительных структур. Картирование границ выклинивания данных пластов, определяющих возможность ведения горных работ, предлагается на основе результатов сейсморазведочных исследований, как с поверхности, так и во внутренних точках среды. В качестве информационного обеспечения формирования интерпретационных заключений в дополнение к волновым картинам в первую очередь рассматриваются различные динамические характеристики разноразмерных волновых полей: амплитуды и двумерные амплитудные спектры. Привлекаются также данные о распределении эффективных скоростей в пределах плоскости профиля.

Ключевые слова: сейсморазведка, двумерные спектры, зона выклинивания, скоростная характеристика, интерференция, Верхнекамское месторождение.

Для Верхнекамского месторождения известен ряд поднятий, осложненных куполами, в пределах которых выклиниваются продуктивные и вмещающие их отложения [1]. Очевидно, что при уменьшении толщин пластов, защищающих калийную залежь от воздействия водоносных горизонтов надсоляных отложений, ведение горных работ становится невозможно. В этой связи прогноз пространственных координат «нулевой» изопахиты соляных пластов, входящих в состав водозащитной толщи (ВЗТ), крайне важен для обеспечения безопасности ведения горных работ.

Задача определения границ зон выклинивания отдельных литологических комплексов хорошо известна из практики сейсморазведочных исследований по методике многократных перекрытий [2], при поисках и разведке месторождений углеводородов. Актуальность изучения подобных объектов связана с прогнозом неструктурных ловушек [3]. Очевидно, что прямое решение за счет повышения частотного диапазона регистрируемого волнового поля, объективно ограничено технологическими возможностями реализуемых систем наблюдений.

Целесообразность разработки специализированных методических приемов, связанных с усложнениями полевого процесса, также не всегда очевидна. Перспективы дета-

лизации границ зон выклинивания при предельной разрешающей способности, соответствующей используемым полевым технологиям, связаны с привлечением в интерпретационный процесс параметров волнового поля, наиболее информативных в подобной ситуации.

Решения прямых задач [4, 5] с различным уровнем приближения к реальным условиям показывают, что для подобных объектов определяющим свойством волнового поля является соотношение переменной временной мощности выклинивающегося пласта и достигнутого частотного состава регистрируемого волнового поля. За счет изменения данного соотношения на участке отсутствия отдельных от кровли и подошвы пласта отражений можно выделить целый ряд особенностей волнового поля:

- 1) в значениях амплитуд окончательного временного разреза проявляются эффекты деструктивной и конструктивной интерференции (рис.);
- 2) распределение значений эффективных скоростей приобретает форму, соответствующую изучаемому объекту;
- 3) по мере уменьшения временного сдвига интерферируемых отражений преобладающие частоты в соответствии с теоремой запаздывания [6] смещаются в область повышенных значений.

Для анализа первого и второго из перечисленных критериев не требуется каких-либо дополнительных процедур цифровой обработки, кроме необходимых для получения качественного временного разреза. Данные о их поведении представлены в стандартном наборе результатов цифровой обработки: динамический временной разрез и скоростная характеристика [7].

Изучение закономерностей изменения спектров требует выполнения определенных условий [4]. Во-первых, необходимо на временном разрезе определить интервал, в котором находится изучаемый объект, т.е. на основании второго критерия привести первый в соответствие с априорной геологической информацией. Далее во временном окне, соответствующем данному интервалу, но с размерами не менее двух периодов сейсмических колебаний, представленных на временном разрезе, выполняется расчет амплитудных спектров. Спектры визуализируются аналогично временному разрезу, где вместо трасс суммарной сейсмозаписи в координатах частот и профиля представляются их амплитудные спектры (рис.). Таким образом, процедура прогнозирования включает ряд простых операций:

- 1) определение на профиле участка с переменной толщиной пластов водозащитной толщи по особенностям волновой картины и с учетом геологической информации;
- 2) выбор временного интервала для формирования интерпретационного заключения, на основании результатов скоростного анализа и волновой картины, представленной на окончательном временном разрезе;
- 3) потрасный спектральный анализ в выбранном временном интервале;
- 4) линейная интерполяция в область высоких частот максимальных значений амплитудных спектров на участке интерференции отражений от кровли и подошвы «клины»;
- 5) контроль координат «точки пересечения» линии интерполяции максимумов спектров с осью частот по особенностям поведения амплитудной (динамический разрез) и кинематической (скоростная характеристика) составляющих волновой картины на участке интерференции отражений от кровли и подошвы «клины».

Применение подобной интерпретационной технологии позволяет принимать обоснованные решения о существовании либо отсутствии контролируемых пластов на пределе разрешающей способности анализируемого волнового поля в $\frac{1}{4}$ длины волн.

Основные отличия волновых полей наземной и шахтной сейсморазведки связаны с существенно различным частотным диапазоном результирующей сейсмической записи, представленной на временных разрезах. При выполнении наземных

сейсморазведочных наблюдений с регистрацией продольного типа волн речь идет о преобладающей частоте в 60-80 гц, а для шахтных наблюдений – 300-600 гц. При скоростях распространения упругих волн продольного типа в 3200-3400 м/с для наземных и в 3800-4000 м/с для шахтных сейсморазведочных наблюдений пределы разрешающей сейсморазведки составят 10-14 м и 1.6-3.3 м соответственно. Согласно этим критериям и определяются потенциальные возможности прогнозирования.

В случае комплексирования наземных и шахтных сейсморазведочных наблюдений [8] применение более информативных шахтных исследований ограничивается результатами наземных. При прогнозировании участков с критическими значениями мощности переходной пачки и покровной каменной соли в диапазоне менее 10 м очевидно, что проведение горных работ там нецелесообразно. Следовательно, и проведение шахтных сейсморазведочных исследований становится нереальным. С другой стороны, при достаточно неравномерной плотности наземных сейсморазведочных исследований в пределах действующих шахтных полей соляных рудников возможны ситуации с проходкой разведочных выработок на площадях с критическими изменениями мощности ВЗТ. В подобных ситуациях совместная интерпретация разноуровневных и разнонаправленных волновых полей безусловно повышает достоверность прогнозов контура «нулевых» изопакит водоупорных пластов надсоляной толщи.

В качестве практического примера реализации предложенной интерпретационной технологии рассмотрим результаты наземных и шахтных сейсморазведочных исследований на одном из участков Верхнекамского месторождения.

Результаты цифровой обработки и интерпретации шахтных сейсмоакустических данных представлены на рис. 1, а. Основные отражающие горизонты приурочены к кровлям пластов: В (ОГ Вк), Г (ОГ Гк), Д (ОГ Дк), Е (ОГ Ек), ПКС (ОГ ПКСк), к подошве покровной каменной соли – ОГ ПКСп. Отражающий горизонт ППк приурочен к интервалу кровли переходной пачки.

В пределах профильной линии в исследуемом интервале геологического разреза выделено три участка с осложнениями волнового поля: 1) 0-80 м, 2) 220-300 м, 3) 440-520 м. Все выделенные участки отмечаются резкими перепадами распределения эффективных скоростей на скоростной характеристике (рис. 1, б) на общем фоне смещения пониженных значений вверх по разрезу к началу профиля.

В структуре волновой картины все выделенные участки приурочены к зонам «ступенчатого» уменьшения временной мощности пластов каменной соли в надпродуктивной толще ОГ ПП – ОГ ПКСп и сопровождаются латеральной изменчивостью интенсивности сейсмической записи на динамическом временном разрезе (рис. 1, б). Налицо все признаки наличия пласта переменной мощности, конфигурация которого наиболее наглядна после процедуры миграции (рис. 2, а).

В пределах выделенных участков на двумерном амплитудном спектре временного разреза (рис. 2, б) отмечаются зоны смещения преобладающих частот в область более высоких значений. Максимальное уменьшение мощности очевидно в пределах первого участка и после 50 м к началу профиля находится за пределами разрешающей способности анализируемых данных, т.е. меньше 2 м (1/4 длины волны). Аналогичный анализ проведен и по результатам наземных сейсморазведочных наблюдений (рис. 3). Учитывая разрешающую способность данных материалов, можно предположить, что начиная с 3550 м мощность соляных пластов в надпродуктивных отложениях меньше 10 м (1/4 длины волны).

Совместный анализ динамических (частота) и кинематических (время) по наземным и шахтным профилям позволяет локализовать границу пониженных толщин соляных пластов в надпродуктивной толще в среднем менее 6 м, что может являться основанием для корректировок границ аномалий, в обязательном порядке учитываемых при разработке калийной залежи.

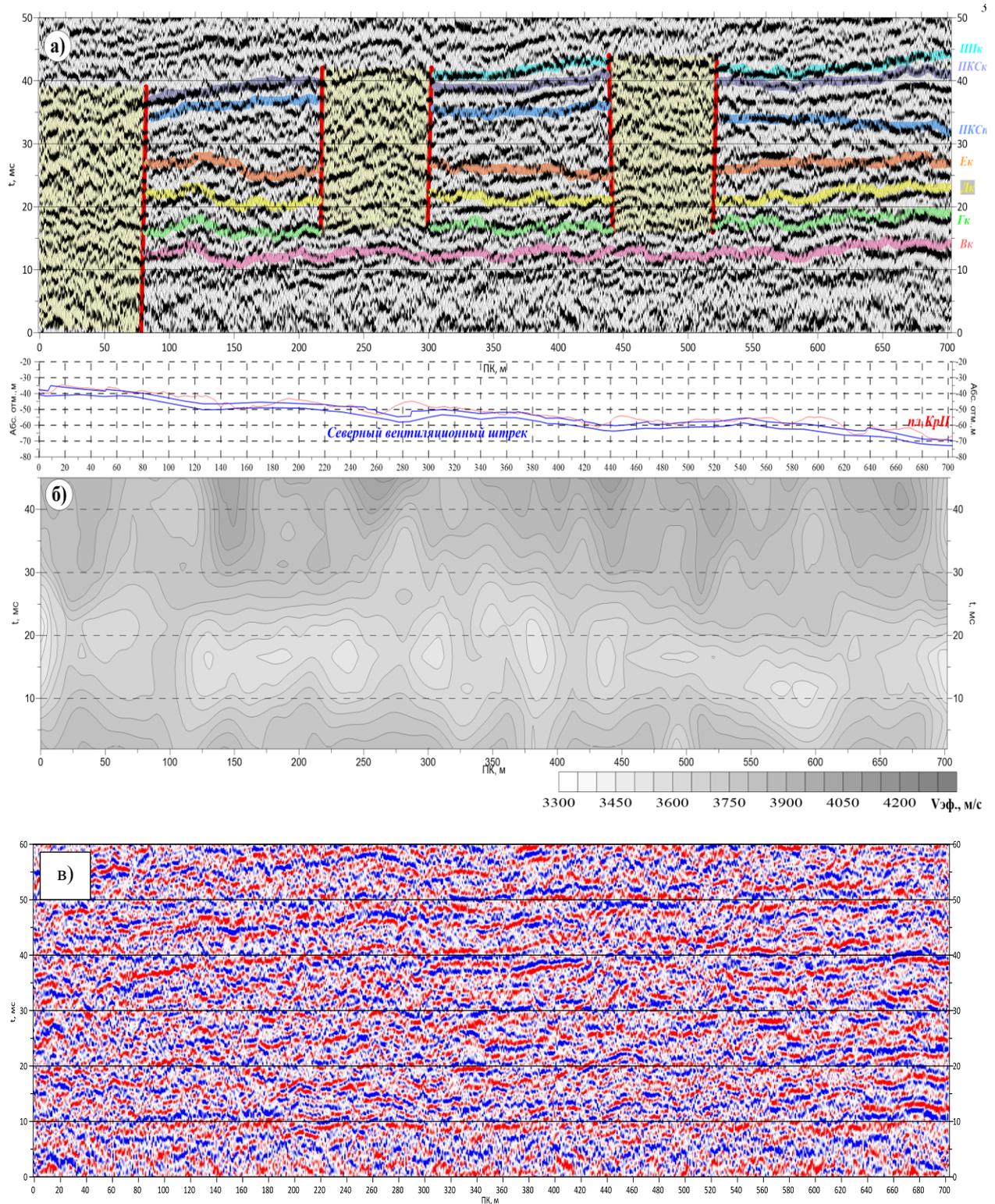


Рис. 1. Временной разрез МОГТ (а), скоростная характеристика (б), динамический временной разрез (в)

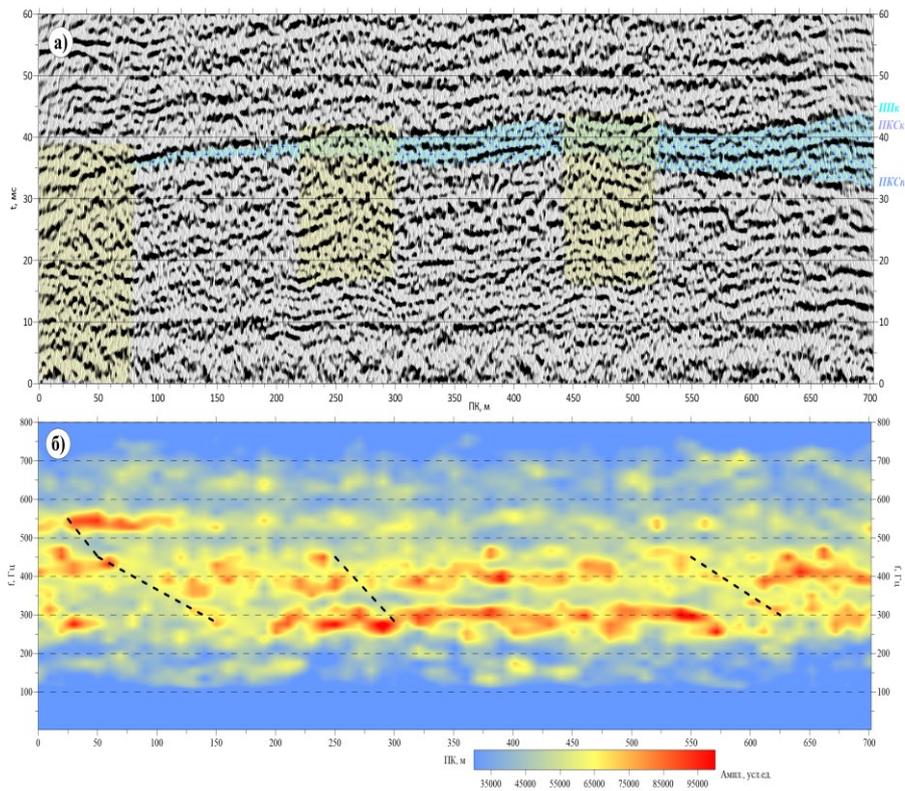


Рис. 2. Миграция временного разреза (а) и двумерный амплитудный спектр (б), рассчитанный в интервале 30-50 мсек.

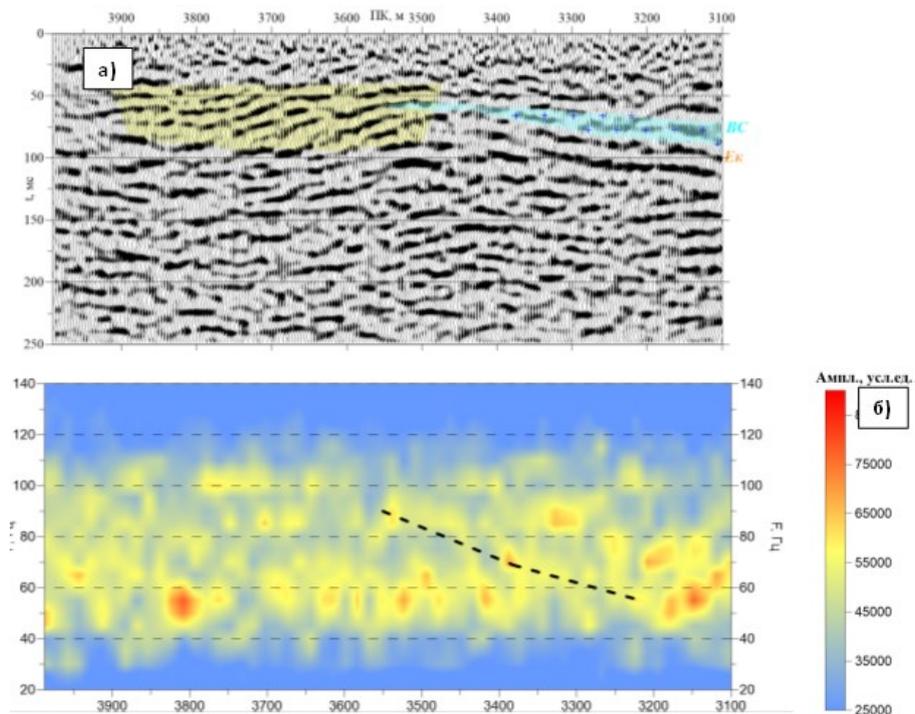


Рис. 3. Временной разрез (а) по данным наземной сейсмозаписки и его двумерный спектр (б) в интервале 50-100 мс.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы ФНИ, проект № 0422-2019-0146-С-02 (регистрационный номер темы НИОКТР: АААА-А18-118040690028-5).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / под ред. Н.М. Джиноридзе. – СПб; Соликамск, 2000. – 400 с
2. Мешбей В.И. Методика многократных перекрытий в сейсморазведке. – М.: Недра, 1985. – 264 с.: ил.
3. Нейдель И.С., Поджаглиолми Э. Геофизическое обоснование и методика сейсмостратиграфического моделирования и интерпретации // Сейсмическая стратиграфия. Использование при поисках и разведке нефти и газа / под ред. Ч. Пейтона. – М., 1982. – Ч. 2. – С. 645-692.
4. Санфилов И.А., Ильичев Ю.В. Результаты изучения зоны выклинивания продуктивных отложений способами динамического анализа // Разведочная геофизика: отечеств. производств. опыт: экспресс-информ. / ВИЭМС. – М., 1988. – вып. 6. – С. 14-20.
5. Shoenberger M., Levin F.K. Reflected and transmitted filter functions for simple subsurface geometries // Geophysics. – 1976. – V.41, № 6. – P. 1305-1317. DOI: 10.1190/1.1440681.
6. Бат М. Спектральный анализ в геофизике: пер. с англ. – М.: Недра, 1980. – 535 с.: ил.
7. Санфилов И.А., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г., Прийма Г.Ю., Фаткин К.Б. Сейсморазведочные исследования условий разработки калийной залежи // Геофизика. – 2011. – № 5. – С. 53-58.
8. Барях А.А., Санфилов И.А., Федосеев А.К., Бабкин А.И., Цаюков А.А. Сейсмо-геомеханический прогноз состояния водозащитной толщи на калийных рудниках // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 6. – С. 10-22. DOI: 10.15372/FTPRPI20170602.

УДК 550.312

DOI:10.7242/echo.2020.2.12

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОНИТОРИНГОВЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ

А.А. Симанов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Карст является одним из наиболее сложных и трудно прогнозируемых геологических процессов, представляющих опасность для жизнедеятельности урбанизированных территорий. Процесс сопровождается образованием специфических форм рельефа, подземных пространств (каверны, полости, системы полостей) и обуславливает развитие деформационных явлений различного характера (обрушения, провалы, оседания).

Вместо констатации фактов провалов и обрушений, что практикуется в настоящее время при изучении карстовых явлений, предлагается применять методику мониторинговых гравиметрических исследований, которая позволит получать сведения о геологическом строении массива, об участках с интенсивным развитием карстово-суффозионных процессов, о наличии полостей на начальном этапе их развития. Это позволит сориентировать инженерные работы по обеспечению сохранности и безопасной жизнедеятельности.

Представлены результаты гравиметрических работ, проводимых с целью изучения последствий разработки Верхнекамского калийного месторождения. Показано, что современные методы обработки и интерпретации высокоточных мониторинговых исследований существенно повышают возможности прогнозирования негативных инженерно-геологических явлений. Приведены примеры гравиметрических исследований на аварийных участках рудников.

Ключевые слова: гравиразведка, мониторинг, аномалия гравитационного поля, динамическая гравитационная аномалия, обратные задачи геофизики.

Проблема изучения горного массива, расположенного над естественными или техногенными полостями в геологическом пространстве, существует уже давно. К естественным полостям относятся пещеры доступные для проникновения. К техногенным – горные выработки шахтного производства, а также подземные коммуникационные сети на урбанизированных территориях. От сохранности массива горных пород над этими полостями часто зависит безопасность жизнедеятельности населения, сохранность самого рудника или природного объекта. Изучение территории с поверхности посредством геофизических наблюдений даёт хорошие результаты как с точки зрения выявления ослабленных или потенциально опасных зон (при однократно проведенной