

IV. ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ

УДК 550.83+551.24

Г.Г. Кассин, В.В. Филатов

К ПРОБЛЕМЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ И КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ

Проблема охраны рудников на территории Верхнекамского месторождения калийных и калийно-магниевого солей с каждым годом становится все острее в связи с ростом сейсмической активности в этом регионе. Поэтому актуальной для эксплуатации месторождения становится задача прогнозирования мест проявления динамических событий (геодинамическое районирование территории), решение которой невозможно без детального изучения тектонического строения месторождения. Японский сейсмолог К. Касараха прямо отмечает, что "...вероятные размеры и вид будущего сейсмического события ... возможно спрогнозировать, если достаточно хорошо известна тектоническая обстановка района" исследования.

Опыт геодинамического районирования различных регионов свидетельствует, что для его осуществления необходимо: выявить блочно-иерархическую структуру земной коры, оценить динамическое взаимодействие блоков, определить степень их активности и положение тектонически напряженных зон [1].

Из анализа результатов региональных геолого-геофизических исследований, описанных в [2], следует, что современная динамика земной коры Среднего Урала и Приуралья определяется ее разломно-блоковой тектоникой; что блок земной коры, в котором расположено Верхнекамское месторождение, характеризуется повышенной сейсмичностью, аномально высокими значениями скоростей современных вертикальных движений дневной поверхности, ограничен активными на современном этапе тектогенеза глубинными разломами. Детальное тектоническое строение месторождения, ставшее основой для геодинамического районирования его территории, нами было установлено путем геологической интерпретации результатов высокоточных гравимагнитных съемок масштабов 1:10000, 1:25000 (рис. 1).

Блоки и разломные зоны земной коры в районе Верхнекамского месторождения являются, как это следует из принципа автомодельности, элементами высоких рангов единой иерархической блочно-разломной структуры Уральской складчатой системы. В пределах месторождения установлено четыре системы разломов: субмеридиональная, субширотная и две диагональные. В физических полях наиболее отчетливо картируется ортогональная система субмеридиональных и субширотных разломов. Меридиональные разломы, особенно Красноуфимский, контролируют в плане цепочки локальных поднятий по кровле солей. Широтный Дуринский разлом и генетически связанный с ним Дуринский прогиб по кровле солей делит месторождение на две части, являясь границей между двумя блоками земной коры, различие между которыми отчетливо проявляется в морфологии аномалий в гравитационном и магнитном полях. Большая густота сети наблюдений гравитационного и магнитного полей позволила не только выполнить картирование разломных зон, но и установить их внутреннее строение и определить кинематический тип разломов. Так, большинство разломов субмеридионального и северо-западного простирания являются правосторонними сдвигами.

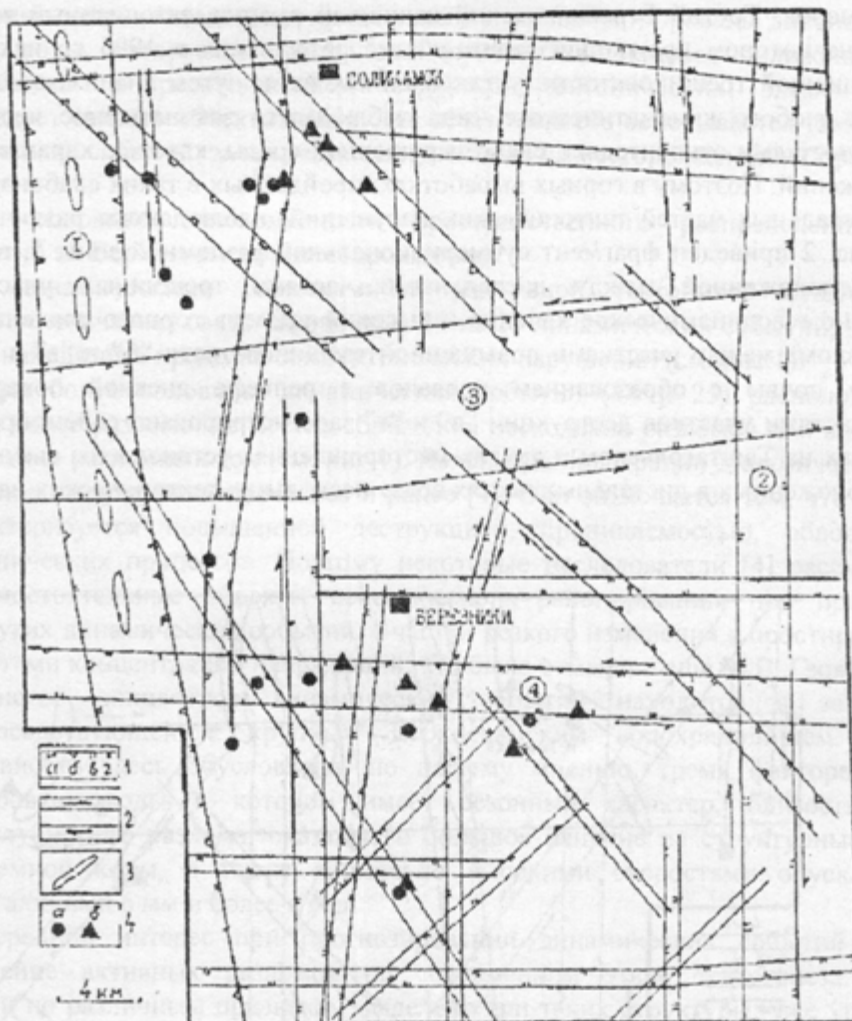


Рис. 1. Тектоническая схема Верхнекамского месторождения калийных солей:

1 – зоны разломов и время их активизации: а – дорифейское; б – рифейское; в – фанерозойское; г – новейшие; 2 – те же разломы со сдвиговой составляющей. Цифрами отмечены крупные разломы: 1 – Красноуфимский; 2 – Западно-Уральский; 3 – Дуринский; 4 – Зырянский; 3 – зоны повышенной трещиноватости пород надсолевой толщи в зоне Красноуфимского разлома; 4 – эпицентры динамических событий (по В.М. Нежданову): а – землетрясения, сейсмопроявления; б – оседания дневной поверхности

К числу важнейших тектонических структур месторождения, кроме разломных зон, следует отнести и локальные участки дилатационного разуплотнения среды или участки повышенной трещиноватости – участки деструкции среды. Такие участки на месторождении распространены повсеместно в основном в надсолевой толще. Породы, слагающие их, обладают пониженной плотностью и пониженными значениями модулей деформации, и поэтому они как отверстия в напряженной среде являются концентраторами напряжений и представляют большую угрозу для целостности водозащитной толщи месторождения.

Развитие трещиноватости приводит к вспучиванию геологической среды. В зонах разломов-сдвигов при этом на поверхности сместителя образуются локальные выпуклости. При движении блоков эти выпуклости сближаются, и вдоль разломной зоны происходит чередование участков концентрации напряжений и их разрядки [1]. Многие участки повышенной трещиноватости, сильно вытянутые в плане, представляют собой линейные структуры, которые в геомеханическом отношении можно рассматривать или как тектонические нарушения высокого ранга, или как трещины, в дистальных частях которых всегда наблюдается концентрация напряжений. Если величина этих напряжений превышает предел прочности среды, то последняя разрушается.

В подтверждение возможного влияния участков повышенной трещиноватости на перераспределение в среде естественного поля напряжений, приводящее к ее разрушению, приведем

несколько примеров. Третий Березниковский калийный рудник, затопленный в 1986 г., и второй Соликамский, на котором произошли значительные разрушения в 1995 г., находятся в пределах участков повышенной трещиноватости, установленных нами путем анализа поля силы тяжести. В зонах разломов любого кинематического типа наблюдается закономерное чередование участков деструкции с участками относительно слабо нарушенной среды, которые характеризуются высоким уровнем напряжений. Поэтому в горных выработках, пройденных в таких слабонарушенных породах или вблизи дистальных частей тектонических нарушений, наблюдаются различные динамические явления. На рис. 2 приведен фрагмент субмеридиональной разломной зоны 5, в которой в горной выработке, расположенной между дистальными частями трещинных участков "а" и "б", зарегистрировано газодинамическое явление и высокий уровень горного давления. В зоне влияния Зырянского разлома между участками повышенной трещиноватости "б" и "в" в 1999 г. произошло растрескивание почвы с образованием провалов в рельефе дневной поверхности, а между дистальными частями участков деструкции "в" и "г" зарегистрировано сейсмоявление – горный удар. В рудниках на Таштагольском и других месторождениях установлены высокие напряжения на участках, расположенных в дистальных частях сразу нескольких тектонических нарушений [1].

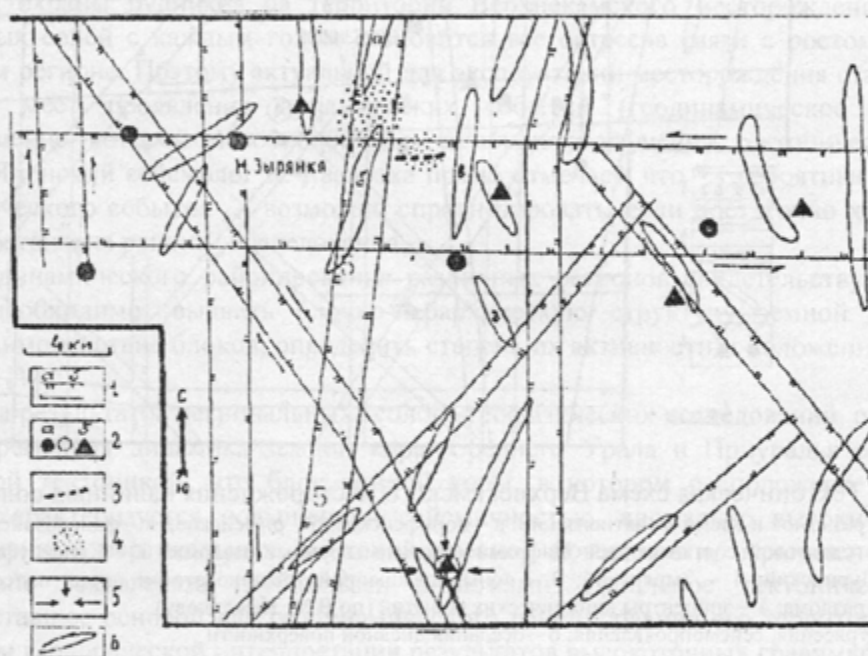


Рис. 2. Фрагмент тектонической схемы в районе Зырянского разлома:

1 – зоны разломов фундамента и время их активизации (по геофизическим данным): а – палеозойское и более позднее, б – новейшее. Стрелками показано направление сдвиговой составляющей по разлому; 2 – динамически активные участки (по В.М. Нежданову): а – землетрясения, сейсмоявления, б – оседания дневной поверхности; 3 – линейные зоны провалов дневной поверхности в 1999 г.; 4 – проявления горного и газового давления; 5 – место катастрофы с провалом и затоплением рудника БКРУ-3; 6 – зоны повышенной трещиноватости пород надсолевой толщи

Уровень напряжений быстрее повышается в зонах активных разломов, поскольку в таких разломах происходит не только перераспределение напряжений, но и внесение в разломную зону дополнительной упругой энергии за счет движения блоков. Высокий уровень напряжений между участками повышенной трещиноватости "а"- "б", "б"- "в" и "в"- "г" обусловлен отчасти тем, что они находятся либо вблизи, либо внутри зоны активного Зырянского разлома.

Из приведенных примеров следует, что при прогнозировании мест проявления динамических событий большое значение имеет изучение не только разломных зон, но и отдельных участков повышенной трещиноватости среды.

Детальная схема тектонического строения Верхнекамского месторождения была нами построена без учета данных о произошедших на месторождении динамических событиях

(землетрясения, горные удары, газодинамические явления, оседания и провалы дневной поверхности и др.). Поэтому выводы, которые мы получили, сопоставляя плановое положение эпицентров динамических событий с расположением структурно-тектонических элементов строения месторождения, следует считать объективными. Эта объективность основывается также на большом количестве динамических событий, за последние десятилетия на месторождении их произошло около трех десятков.

Каковы же основные закономерности пространственного распределения эпицентров динамических событий на Верхнекамском месторождении?

1. Между динамическими событиями и разломной тектоникой существует тесная пространственная и генетическая связь. Эпицентры 24 из 25 динамических событий, произошедших на месторождении, находятся в пределах зон тектонических нарушений (см. рис.1).

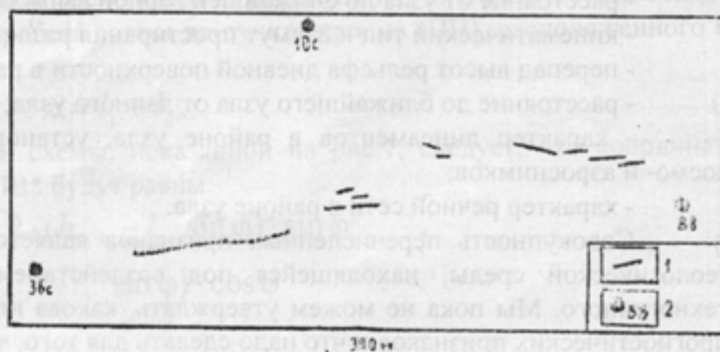
2. Эпицентры более половины динамических событий (14 и 25) расположены в узлах пересечений двух и более разломов, в местах сближения нескольких разломов или в местах резкого изменения простираения разломных зон (см. рис.1). Явление концентрации динамических событий в узловых тектонических структурах отмечалось и ранее [4]. Оно объясняется тем, что геологическая среда здесь характеризуется повышенной деструкцией, проницаемостью, обводненностью и активностью тектонических процессов. Поэтому некоторые исследователи [4] рассматривают эти структуры как самостоятельные объекты сейсмического районирования при прогнозировании землетрясений и других динамических событий. Участки резкого изменения в простираении разломов также являются местами концентрации напряжений, что было отмечено еще М.В. Гзовским [5].

3. Большинство эпицентров динамических событий находится в западной части месторождения, соседствующей с крупным Верхнекамским водохранилищем. Повышенная динамическая активность здесь обусловлена, по нашему мнению, тремя факторами: влиянием водохранилища, уровень воды в котором имеет сезонный характер, близостью активного Красноуфимского глубинного разлома, оказавшего большое влияние на структурные перестройки всех горизонтов земной коры, а также аномально высокими скоростями опускания дневной поверхности, достигающими 6 мм и более в год.

4. Первоочередной интерес при прогнозировании динамических событий представляет выявление и изучение активных разломов на современном этапе тектогенеза. В пределах месторождения нами по различным признакам выделено три таких структуры: уже упоминавшийся Красноуфимский, Дуринский и Зырянский разломы. Особенно активным в настоящее время является Зырянский разлом, в зоне которого зарегистрировано десять динамических событий (см. рис.2). Последнее событие, свидетельствующее об обоснованности выполненного нами геодинамического районирования, произошло в мае 1999 г., когда в течение нескольких дней вдоль этого разлома в земной поверхности образовалась цепочка провалов глубиной 2-4 метра и шириной около одного метра. Провалы соединяются между собой относительно неглубокими понижениями в рельефе, образуя в плане две субширотные зоны. Наиболее выражена из них южная, протяженностью 1800 м (рис.3). Положение некоторых провалов в плане совпадает с участками проявления газодинамических явлений в горных выработках. По нашему мнению, разделяемому рядом исследователей, провальные образования имеют тектоническую природу и возникли в результате подвижек в зоне Зырянского разлома, который в кинематическом отношении относится нами к левостороннему сдвигу.

Рис. 3. Схема расположения провальных образований в районе поселка Н. Зырянка:

1 — линии провалов и оседаний; 2 — скважины



Таким образом, важнейшими объектами геодинамического районирования территории Верхнекамского месторождения являются активные разломы, участки повышенной трещиноватости геологической среды и их сочетание в виде узловых структур.

Активный характер разлома устанавливается непосредственно по сейсмологическим данным и по фактам проявления в его зоне различных динамических событий. Опосредованно картирование активного разлома осуществляется по результатам дешифрирования космо- и аэроснимков, геохимических, геоморфологических и геофизических исследований различных масштабов. Из геохимических методов в условиях Приуралья и Урала наиболее уверенно эта задача решается с помощью водно-гелиевой съемки: в пределах складчатого Урала интенсивными гелиевыми аномалиями отмечаются глубинные разломы [3]; в платформенной части Приуралья гелиевыми аномалиями картируются разломы, разнопостроенные блоки земной коры, микрограбены девонского возраста [2]; в зоне Зырянского разлома концентрация гелия в подземных водах в 10-15 раз превышает фоновое значение. Среди морфоструктурных схем и карт территории месторождения наиболее информативной является карта Н.В. Введенской масштаба 1:100000, на которой отчетливо выражена иерархия морфоструктурных элементов. Геофизическими признаками активного разлома служат локальные линейные аномалии в гравитационном и магнитном полях, источниками которых являются приповерхностные петрофизические неоднородности в надсоляной толще, образовавшиеся в послеврхнепермское время, и участки резкого увеличения мощности четвертичных образований.

Генезис участков повышенной трещиноватости геологической среды разнообразен. Они могут формироваться в зонах разломов как элементы их структурного парагенезиса, в результате роста соляных куполов, при экзогенных и техногенных процессах и т.д. В геодинамическом отношении наибольший интерес среди них представляют те, которые образовались в зонах разломов, особенно активных. На территории Верхнекамского месторождения, например, положение эпицентров 12 динамических событий пространственно совпадает с участками повышенной трещиноватости, расположенными именно в зонах разломов.

Из трех отмеченных выше объектов геодинамического районирования наибольшее влияние на перераспределение естественного и техногенного полей напряжений, их концентрацию и разрядку оказывают узловы́е структуры или просто узлы как пересечение нескольких разломов.

Анализ свойств узлов, выделенных на месторождении, показал, что вероятность предсказания в них динамических событий зависит от большого количества факторов, названных нами прогностическими признаками. По значимости для прогнозирования мы их расположили в виде следующего ранжированного ряда:

- число и вид динамических событий, произошедших в узле;
- наличие в узле активного разлома;
- число всех разломов, образующих узел;
- ранг разломов, образующих узел;
- наличие в узле участков повышенной трещиноватости среды;
- наличие в узле локальной аномалии силы тяжести и ее знак;
- расстояние до ближайшего эпицентра динамического события;
- наличие в узле гелиевой аномалии;
- наличие структурных осложнений глубинных горизонтов земной коры;
- расстояние от узла до бортовых частей растущих соляных куполов;
- расстояние от узла до водохранилища;
- расстояние от узла до ближайшей горной выработки;
- кинематический тип и азимут простира́ния разломов, образующих узел;
- перепад высот рельефа дневной поверхности в районе узла;
- расстояние до ближайшего узла от данного узла;
- характер линеаментов в районе узла, установленных по результатам дешифрирования космо- и аэроснимков;
- характер речной сети в районе узла.

Совокупность перечисленных признаков является не случайной. Она отражает состояние геологической среды, находящейся под воздействием двух силовых полей: естественного и техногенного. Мы пока не можем утверждать, какова информационная полнота этой совокупности прогностических признаков и что надо сделать для того, чтобы она переросла в свое новое качество —

систему прогностических признаков. Мы надеемся, что наш опыт геодинамического районирования послужит первым шагом к разработке сначала методологии, а затем, на ее основе, теории и методики прогнозирования динамических событий на территории Верхнекамского месторождения калийных и калийно-магниевого солей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батугина И.М., Петухов И.М. Геодинамическое районирование месторождений при проектировании и эксплуатации рудников. – М.: Недра, 1988. – 165 с.
2. Башорин В.В., Кассин Г.Г. Результаты гелиевой съемки применительно к изучению тектонического строения юго-восточной части Русской платформы // Методика поисков и разведки глубокозалегающих рудных месторождений. – Свердловск, 1975. – Вып. 128. – С. 127-134.
3. Булашевич Ю.П., Карташев Н.П., Башорин В.Н. Коэффициенты диффузии радона и гелия в естественном залегании пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1970. - № 1. – С. 70-73.
4. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 536 с.
5. Гвишиани А.Д. и др. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. – М.: Наука, 1988. – 176 с.

УДК 550.834

В.И. Бондарев, С.М. Крылатков

ТЕОРИЯ ГОДОГРАФОВ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН В МЕТОДЕ МНОГОКРАТНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ

Метод многократных перекрытий (ММП) с использованием отраженных волн (ОВ) в настоящее время является основным видом сейсморазведочных работ на нефть и газ. Один из вариантов ММП, широко применяемый на практике в России, известен у нас как метод общей глубинной точки (МОГТ). Теория годографов ОВ в МОГТ достаточно подробно изложена как в зарубежной, так и отечественной литературе [1]. Однако эта теория, на наш взгляд, незаслуженно оставляет вне поля зрения некоторые важные аспекты, анализ которых может открыть новые интересные возможности в сейсморазведке.

Рассмотрим простейшую лучевую схему распространения отраженной волны для профильных наблюдений для случая, когда линия наблюдения ориентирована строго вкост простирания отражающей границы. Начало координат совместим с некоторой текущей точкой на линии наблюдений, которую по традиции в широком смысле слова будем называть **общей средней точкой – точкой ОСТ** (рис. 1). Именно для этой точки профиля всегда будем формировать сейсмограмму ММП, на основе которой последующим суммированием будем получать итоговую трассу временного разреза. Положение плоской отражающей границы относительно начала координат будем определять двумя параметрами – глубиной по нормали до границы $h_{ост}$ и углом наклона границы к линии профиля φ . При этом угол φ будем, как обычно, считать положительным, если линия профиля ориентирована по падению границы.

Пункт возбуждения (ПВ) упругих волн расположен на расстоянии l_1 от ОСТ. Поставим задачу определения траектории луча и времени пробега волны до пункта приема (ПП), расположенного по другую сторону от ОСТ на расстоянии l_2 :

$$x = l_1 + l_2. \quad (1)$$

Из рассмотренной кинематической схемы, показанной на рис.1, следует, что координаты положения мнимого пункта возбуждения ПВ* будут равны:

$$\begin{aligned} x^* &= -l_1 - 2 \cdot (h_{ост} - l_1 \cdot \sin \varphi) \cdot \sin \varphi, \\ z^* &= 2 \cdot (h_{ост} - l_1 \cdot \sin \varphi) \cdot \cos \varphi. \end{aligned} \quad (2)$$