

ОБ УСЛОВИЯХ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТДЕЛЬНО ВЗЯТОГО РАЗЛОМА В СВЯЗИ С ВЫЯВЛЕНИЕМ АНОМАЛЬНЫХ СКОПЛЕНИЙ МЕТАНА

Л.А. Иванов

*Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт
горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ)
Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики (Донецк)*

Аннотация: Для заблаговременного выявления опасных скоплений метана на угольных шахтах методами пассивной сейсморазведки априори решается вопрос локализации разнотипных микросейсм в отдельно взятом разломе. Обобщая литературные данные об условиях формирования тектонических напряжений при активизации разлома, установлено, что места образования и тип микросейсм определяются, главным образом, двумя видами изгибов разлома. Показано, что на свободных изгибах формируются микросейсм с механизмом растяжения, а на ограничивающих изгибах – микросейсм с механизмом сжатия. О благоприятном условии образования аномального скопления метана вблизи глубинного разлома свидетельствует комбинация из двух типов участков – вверху с микросейсм типа сжатия и внизу с микросейсм типа растяжения.

Ключевые слова: тектонические напряжения, разломы, микросейсм, аномальные скопления метана.

Введение

Под аномальным скоплением метана (АСМ) на угольном месторождении понимается сравнительно небольшое по размерам скопление свободного метана, находящееся при сверхгидростатическом давлении. Небольшие размеры, не превышающие расстояния между геологоразведочными скважинами (около 200 м), не позволяют их закартировать при разведке месторождения. Случайное вскрытие АСМ сопровождается газопроявлениями в скважине в виде выбросов флюида и длительного (от нескольких дней до нескольких месяцев) дегазирования. Неожиданное вскрытие таких образований горными выработками создает аварийную ситуацию на шахте, приводит к гибели шахтеров. Поэтому выявления АСМ до начала ведения добычи угля является актуальным вопросом.

К прогрессивным способам решения данного вопроса относятся геофизические методы, базирующиеся на использовании микросейсм. Данные методы позволяют поиски АСМ на угольных месторождениях вести на новой физической основе. При этом АСМ выявляются не по их физическим свойствам, на чем базируются традиционные геофизические методы, а по микросейсмическому излучению, обусловленному трещинообразованием и содержанием газа. Существующие варианты микросейсмического зондирования позволяют определить координаты роя микросейсмических событий, обусловленных трещинообразованием, установить механизм их формирования (сбросовый, сдвиговый, взбросовый), а также оценить тип флюида (вода, нефть, газ) [1-4]. Перечисленные задачи успешно решаются на месторождениях нефти и газа. Их решение представляется весьма перспективным при обнаружении АСМ.

Подход к исследованию

Ранее нами рассматривался вопрос поиска мест, благоприятных для образования АСМ, по данным априорной геологической информации. В наиболее общем виде этот вопрос нашел решение, как выявление разломов, способных содержать АСМ. В основу его решения было положено представление о генетической связи АСМ с подтоком газа по глубинному разлому. Данный подток имеет принципиальное значение, поскольку он

компенсирует вековую дегазацию, создает аномально высокое давление газа и тем самым формирует и сохраняет АСМ. Кроме пространственной связи с глубинным разломом в качестве прямых признаков АСМ использовались газопроявления в разведочных скважинах, положительные аномалии газоносности угольных пластов, изотопный состав углерода метана углей, проявления ацетилена, положительные аномалии плотности теплового потока [5].

Основными косвенными признаками АСМ являются структурный и геодинамический показатели. К структурному признаку относится цепочка разрывных структур, начинающаяся с глубинного разлома и заканчивающаяся зоной трещиноватости на уровне угольного месторождения. Геодинамическим признаком является определенное условие залегания разрыва в современном поле тектонических напряжений. При образовании АСМ первый признак отвечает за наличие трещиноватого «коридора», второй признак – за раскрытость трещин и проницаемость данного «коридора».

Детализация мест АСМ в пределах отдельно взятого разлома сводится к решению двух вопросов: латеральному изменению раскрытости трещин и определению типа флюидонасыщения в зоне динамического влияния разлома. В данной статье рассматривается вопрос о латеральном изменении раскрытости трещин, благоприятной для формирования АСМ.

С тектонодинамических позиций рассматриваемый вопрос является родственной задачей нахождения места в массиве кристаллических пород для создания длительно (многие тысячи лет) герметичного хранилища радиоактивных отходов. Данная задача обращает на себя внимание потому, что для ее решения разработаны соответствующие методические основы. Суть их сводится к выделению в каркасе разрывно-трещинной структуры гидравлически активных и пассивных элементов, а также к определению динамики их изменения в неоднородном поле напряжений в течение многих тысяч лет [6].

Цель исследования настоящей статьи заключается в определении мест локализации разнотипного микросейсмического излучения в отдельно взятом разломе в связи с поисками АСМ.

Результаты исследований

Типы тектонических напряжений и режимов выделяются по пространственному положению трех главных осей нормальных напряжений при условии, что сжимающие напряжения положительные. Они имеют следующее соотношение:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3, \quad (1)$$

где σ_1 – ось максимального нормального напряжения; σ_2 – ось промежуточного нормального напряжения; σ_3 – ось минимального нормального напряжения.

Основные типы тектонических напряжений представлены сжатием, сдвигом и растяжением (рис. 1). Данные типы напряжений, согласно [6], образуют два тектонических режима напряжений: режим сжатия и расширения. В режиме сжатия ось σ_1 соответствует оси основного горизонтального напряжения (S_H). В этом режиме формируются типы напряжений сжатия и сдвига. Режим растяжения выделяется по вертикальному положению оси σ_1 . В этом режиме образуется тип напряжений сброса.

Тектонические режимы определяют условия образования и активизации разрыво-трещинных структур. Их образование обычно происходит в течение длительного геологического времени и со сменой тектонических режимов. Активизация раз-

лома в настоящее время происходит в условиях современного тектонического режима.

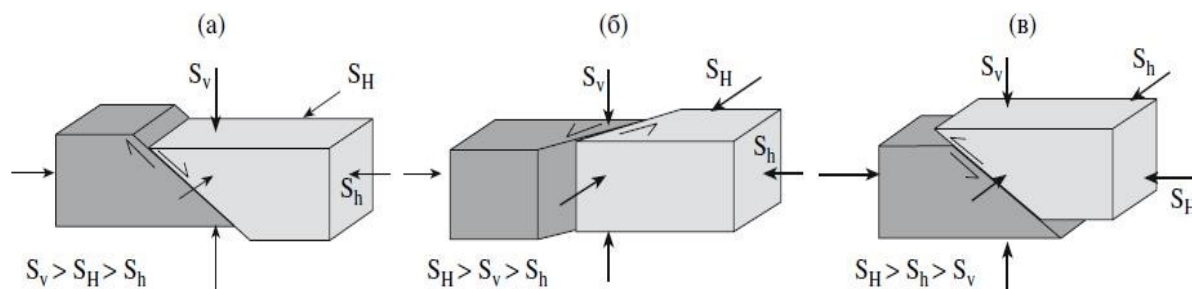


Рис. 1. Основные типы тектонических напряжений в верхней части земной коры по Reinecker *et al.*, 2005 из [6]: а – сброс; б – сдвиг, включая сбросовую и сдвиговую компоненты; в - взброс;
 S_H – основное горизонтальное напряжение; S_h – второстепенное горизонтальное напряжение;
 S_v – вертикальное напряжение

Условие раскрытия разрыва определяется, прежде всего, параллельностью его сместителя и оси σ_1 , а также эффективным давлением. При параллельности сместителя и оси σ_1 раскрытие и проницаемость разрыва достигают максимального значения, а отклонение от данного условия сопровождается их уменьшением.

Рисунок 2 показывает изменение проницаемости разрыва в зависимости от условий его залегания в различном тектоническом режиме.

В тектоническом режиме сжатия проницаемыми являются две группы разрывов:

- а) субгоризонтальные;
- б) наклонные разрывы с простиранием субпараллельным оси σ_1 .

Увеличение угла падения (α) разлома и угла между осью σ_1 и линией простирания (β) приводит к постепенному уменьшению проницаемости. При достижении углов α и β величины, равной 90° , разрыв становится непроницаемым.

В тектоническом режиме растяжения проницаемость разрыва зависит лишь от угла падения разрыва, поскольку только угол α определяет величину отклонения поверхности разрыва от вертикального положения оси σ_1 .

Эффективное давление представляет собой разницу между геостатическим и гидростатическим давлением. Эффективное давление закономерно уменьшается с глубиной за счет большего вертикального градиента гидростатического давления по сравнению с геостатическим давлением. Начиная с определенной глубины и ниже эффективное давление способно приобрести отрицательное значение. При положительной величине эффективное давление препятствует разрушительной силе геостатического давления, при отрицательном значении – способствует гидроразрыву пласта. Согласно [7] в режиме растяжения ($S_v = \sigma_1$) образуются вертикальные трещины отрыва в условиях гидростатического флюидного давления до глубины 1 км и в условиях надгидростатического давления на более глубоких горизонтах (до 12 км и более). В режиме сжатия ($S_H = \sigma_1$) и гидростатического давления, превышающего геостатическое давление, субгоризонтальные разрывы могут формироваться на всем интервале отмеченных глубин.

Гидравлически активные и пассивные элементы представляют собой, соответственно, пути фильтрации и непроницаемые барьеры в каркасе разрыво-трещинной системы массива горных пород.

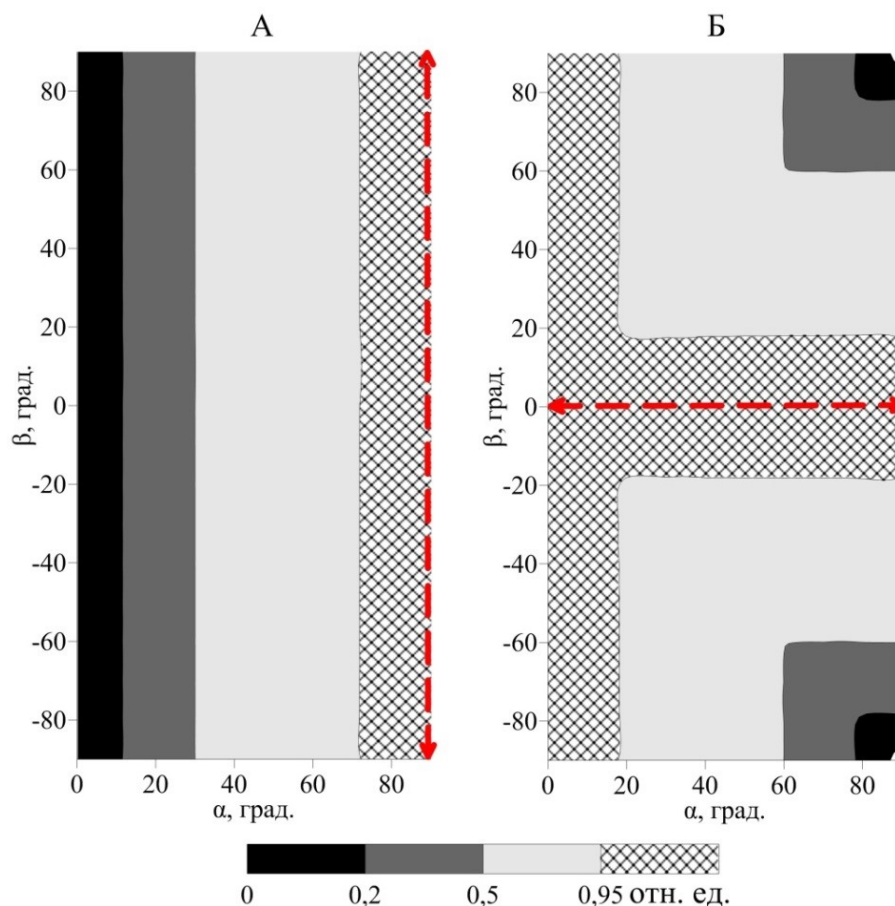


Рис. 2. Изменение относительной проницаемости разрывов в зависимости от их угла падения (α) и направления простирания (β) относительно оси максимальных нормальных напряжений в тектоническом режиме растяжения (А) и сжатия (Б): пунктирная линия – ось максимального нормального напряжения (σ_1)

Д.П. Хиллом (1977) для оценки механизмов образования разрыво-трещинной системы предложена модель поведения трещин скола и отрыва в поле напряжений, возникающих в результате землетрясения (рис. 3). Данная модель применима и для других случаев образования трещиноватости. Главным достоинством модели является ее инвариантность, заключающаяся в графическом постоянстве сети разрывов по отношению к осям σ_1 и σ_3 , независимо от их пространственного положения. При этом по отношению к оси σ_1 трещины скола занимают диагональное, а трещины отрыва субпараллельное положение. Как следствие инвариантности, тектонические режимы растяжения и сжатия характеризуются, соответственно, субвертикальным и субгоризонтальным расположением трещин отрыва.

Ценность данной модели заключается в том, что она позволяет понять изменение условий миграции потока флюида, движущегося по разлому и прилегающим трещинам, в зависимости от расположения оси σ_1 относительно сместителя. При этом выделяются две основные обстановки: первая с ортогональным и вторая с субпараллельным расположением сместителя относительно оси σ_1 .

В первой обстановке сместитель превращается в непроницаемый барьер, препятствующий миграции флюида через него, а прилегающая к сместителю система открытых трещин максимально глубоко отводит флюид вглубь крыльев разлома. Во второй обстановке проницаемыми становятся сместитель и параллельная ему система трещиноватости. Поэтому поток флюида мигрирует вдоль сместителя.

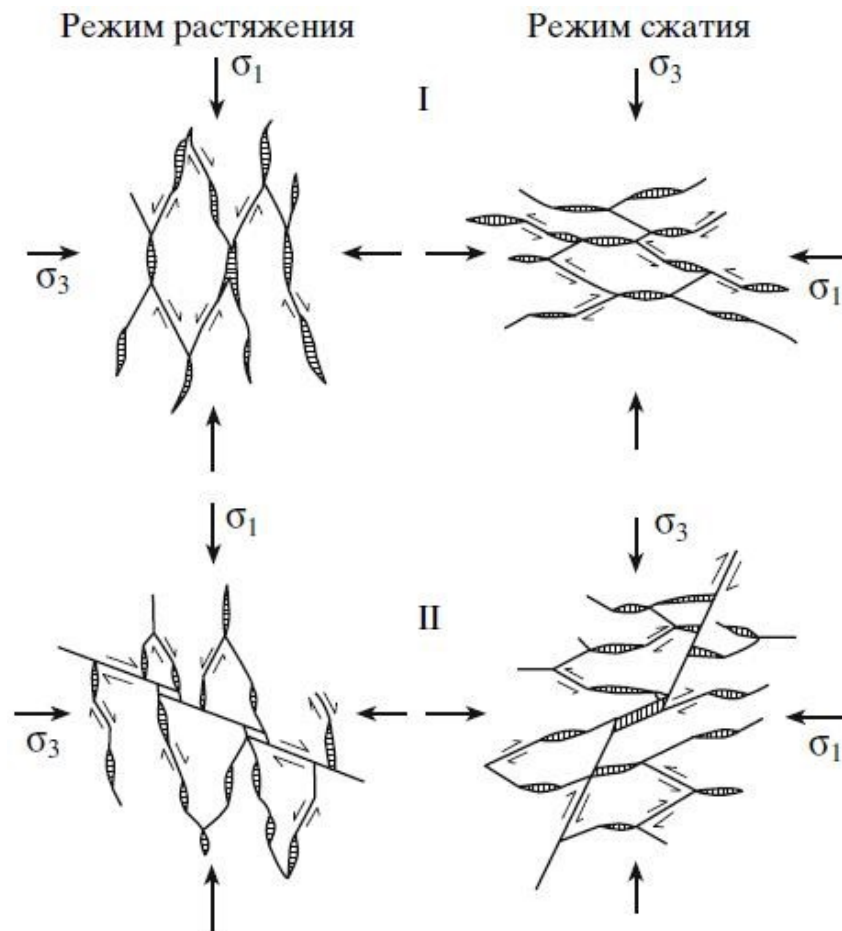


Рис. 3. Развитие сети трещин в режиме растяжения и сжатия без секущего разлома (I) и при наличии его (II) по данным [7]: отрезки линии – закрытые трещины; заштрихованные фигуры – открытые трещины; стрелки – направление осей главных нормальных напряжений; σ_1 – ось максимального сжатия; σ_3 – ось минимального сжатия

Особые условия фильтрации возникают в местах пересечения открытых разломов и трещин растяжения (отрыва). В этом случае образуются трубообразные (тубулярные) каналы и дополнительная компонента трещинной проницаемости [6]. По этим каналам происходит наиболее интенсивная миграция флюида в плоскости сместителя.

Следовательно, субпараллельное расположение оси σ_1 и сместителя определяет условие его открытия, при котором поток флюида сходится к сместителю и мигрирует по нему и прилегающей трещиноватости. Ортогональное расположение оси σ_1 и сместителя приводит к его закрытию и препятствию фильтрации флюида по нему, однако способствует проникновению потока вглубь крыльев разлома. При косом расположении сместителя относительно оси σ_1 формируется обстановка фильтрации, промежуточная между двумя основными. По тубулярным каналам узкие потоки флюида мигрируют в плоскости сместителя в вертикальном и латеральном направлениях.

Таким образом, гидродинамическая активность разрыва в каркасе разрыво-трещинной системы является результатом проявления двух основных факторов: взаимного расположения оси σ_1 и плоскости разрыва, а также величины эффективного давления. Тектонический режим фиксирует пространственное расположение оси σ_1 (вертикальное или горизонтальное), что позволяет активность разрыва связы-

вать с элементами залегания его сместителя. Эффективное давление с глубиной уменьшается и до определенной глубины препятствует, а затем способствует трещинообразованию.

Локальная раскрытость и проницаемость отдельно взятого разлома представляет собой наибольший интерес с точки зрения формирования АСМ и одновременно является весьма сложной задачей в ее определении. В работе [8] указывается, что вопрос факторов и закономерностей развития отдельно взятых разломов относится к числу малоизученных. Особенно данное замечание относится к изучению разломов в условиях их естественного залегания.

Для описания физических свойств и напряжений пород детали разлома удобно объединить и представить в виде трех зон: ядра, области динамического влияния и вмещающих пород (рис. 4).

Ядро является наиболее деформированной частью разлома, состоящей из обломочного материала, хемогенного цемента и пустотного пространства. Обломочный материал представлен глиной трения, миллонитом, катаклазитом и тектонической брекчией. Глинка трения, будинирование и цементация являются факторами экранирования разлома. Степень заполнения обломочным материалом ядра в значительной мере определяет его открытость и фильтрационно-емкостные свойства.

Данный материал образуется за счет разрушения крыльев, поэтому степень заполнения им ядра находится в зависимости от физико-механических свойств пород и амплитуды смещения разрыва. Объем пустотного пространства с увеличением амплитуды смещения сначала увеличивается, затем достигает максимума и уменьшается. Максимум пустотного пространства и проницаемости появляется при амплитуде в несколько десятков метров [10]. При разрушении глинистых пород крыльев ядро приобретает экранирующие свойства.

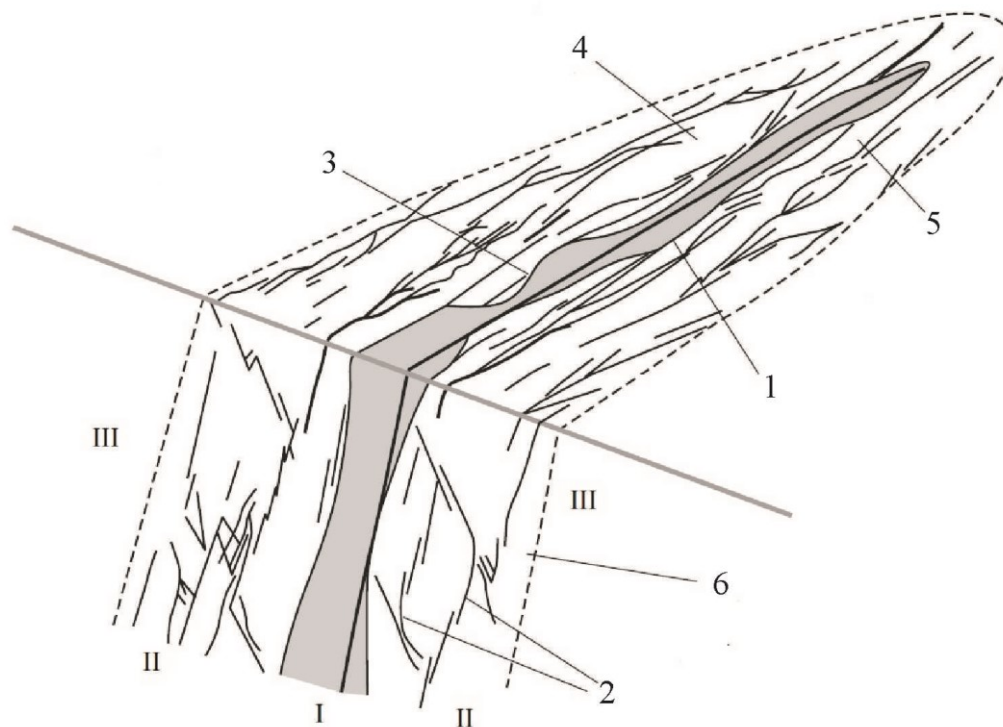


Рис. 4. Элементы внутреннего строения разлома по данным [9]: 1 – основной сместитель и граница ядра разлома; 2 – трещины скола и отрыва; 3 – глинка трения, миллониты, катаклазиты, тектонические брекчии; 4 – жилы, прожилки, просечки; 5 – перемещение пород в зоне разрушения; 6 – граница зоны разрушения пород; I – ядро разлома; II – зона динамического влияния; III – вмещающие породы

Следовательно, проницаемость ядра, связанная с сохранением в нем пустотного пространства, зависит, главным образом, от амплитуды смещения разлома и содержания глинистых пород в геологическом разрезе. Максимум проницаемости достигается при оптимальной величине смещения, способной создать зияние разлома и не допустить большого поступления продуктов разрушения крыльев в ядро разлома. Образованию максимальной проницаемости также способствует минимальное содержание глинистых пород.

Пустотное пространство ядра состоит преимущественно из полостей и пор. Они в значительно меньшей мере, по сравнению с трещинами, подвержены изменению под влиянием вариаций напряженного состояния пород. Поэтому современной динамикой раскрытия ядра при активизации разлома можно пренебречь.

Зона динамического влияния разлома разбита трещинами скола и отрыва. Их раскрытость, в отличие от пустотного пространства ядра, в значительной мере зависит от формирования областей локального уменьшения (рассредоточения) и возрастания напряжений. Распределение этих областей в зоне динамического влияния определяется многими факторами, основными из которых являются самоорганизация трещин, сегментация разлома по активности, тектонический режим активизации разлома, морфология поверхности смесителя, физико-механические свойства пород.

Самоорганизация трещин или отдельных сегментов разлома происходит под влиянием внешнего тектонического поля напряжений. Самоорганизация трещин заключается в их последовательном прохождении периодов аккумуляции напряжений, прерывающихся моментами разрядки. На участках накопления напряжений происходит слияние субпараллельных разрывов в одну плоскость. Слияние обусловлено интерференцией и увеличением напряжений на окончаниях сближенных разрывов. На участках разрядки напряжений разрывы до определенного момента времени находятся в области «нулевых» напряжений или «деформационной тени» и не перемещаются. Участки разрядки напряжений располагаются по обе стороны от участков аккумуляции напряжений. С течением времени происходит мозаичная смена участков аккумуляции и разрядки напряжений. В результате формируется пространственно-временное изменение локальных напряжений [11].

Данное изменение не поддается прогнозированию во времени и пространстве и поэтому рассматривается как фон или помеха, затушевывающая регулярное изменение напряженного состояния разлома.

Сегментация является базовым свойством динамики разрыва. Она заключается в изменении амплитуды смещения и деформации крыльев по простиранию разрыва с течением времени. Данная особенность отчетливо проявляется в однородном материале при физическом моделировании сдвига [8]. При этом по признаку приращения амплитуды смещения выделяются активные и пассивные сегменты. Активные сегменты подразделяются на два типа. Первый тип характеризуется положительным приращением амплитуды, второй – отрицательным (т.е. обратным) приращением. В одном типе активных сегментов может проявляться левостороннее смещение, в другом – правостороннее. Пассивный сегмент выделяется по отсутствию в нем подвижек.

Сущность сегментации разлома заключается в чередовании участков растяжения и сжатия в каждом крыле в направлении простирания сместителя. При этом сегменты, контактирующие между собой по плоскости разрыва, чаще всего отличаются по абсолютным значениям и типу деформаций.

По данным [8] смена типов сегментов разрыва отражает возвратно-поступательный характер смещений, который является закономерной особенностью деформационной

динамики всех разрывов. Поэтому реальной активностью обладает не целый разлом, а лишь его отдельные сегменты.

Следовательно, в соответствии с принципом сегментации с течением времени в теле активного разлома всегда происходит мозаичное перераспределение сегментов локального сжатия и растяжения. Подразделение разлома на данные сегменты означает выделение блоков пород с открытой и закрытой трещиноватостью.

Кинематика разрыва с ровным сместителем определяет направление простирания локальных зон напряжений. В условиях сдвиговой деформации локальные зоны напряжений простираются диагонально по отношению к сместителю и одновременно области уменьшения напряжений простираются почти ортогонально относительно областей увеличения напряжений. При деформациях типа сброса и взброса с углом падения сместителя не менее 60° области уменьшения напряжений ориентируются ортогонально по отношению к сместителю. Области возрастания напряжений концентрируются на окончаниях разрывов [11].

Изгибы сместителя свойственны всем типам разрывных нарушений и придают им ступенчатую траекторию. Ее образование связано с чередованием в разрезе компетентных и некомпетентных пород. К некомпетентным породам приурочены субпластовые участки сместителя, к компетентным – более короткие секущие пласт (рамповые) участки [12].

В угленосных формациях компетентными являются литологические пачки, состоящие преимущественно из слоев песчаника, некомпетентными – пачки, представленные слоями аргиллитов. Поэтому при пересечении аргиллитовой пачки траектория сместителя стремится к субпараллельному с ней залеганию и отклоняется от общего направления смещения. При пересечении песчаниковых пачек сместитель в меньшей мере отклоняется от общего направления смещения (рис. 5А).

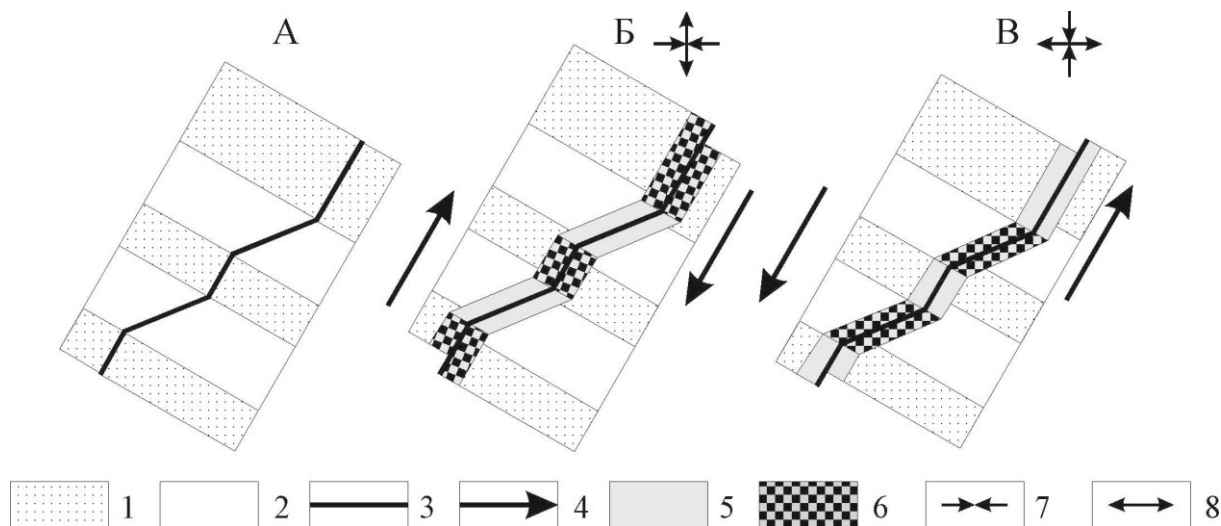


Рис. 5. Образование локальных зон сжатия и растяжения при активации смещения по изогнутому сместителю разрыва:

А – разрыв до смещения крыльев; Б – режим тектонического сжатия и образования взброса;

В – режим тектонического растяжения и образования сброса;

1 – компетентные слои; 2 – некомпетентные слои; 3 – сместитель; 4 – направление смещения блоков; 5 – зона локального растяжения на свободном изгибе сместителя; 6 – зона локального сжатия на ограничивающем изгибе сместителя; 7 – ось максимального нормального напряжения; 8 – ось минимального нормального напряжения

Выделяется два вида изгибов: свободные и ограничивающие. В изгибах свободного типа в ходе смещения происходит расхождение крыльев, в изгибах ограничивающего

типа – их столкновение. Свободные изгибы, в отличие от ограничивающих, не препятствуют перемещению крыла.

Главное свойство изгибов заключается в формировании участков локального растяжения на изгибах свободного типа и участков локального сжатия на ограничивающих изгибах при активизации разлома.

Виды изгибов определенным образом связаны с компетентностью пород и тектоническим режимом. В режиме тектонического сжатия свободные изгибы приурочены к участкам некомпетентных пород (рис. 5Б). На этих участках происходит расхождение крыльев по нормали к сместителю. На ограничивающих изгибах, приуроченных к компетентным породам, крылья сближаются. Поэтому при активизации разлома в режиме тектонического сжатия на компетентных породах образуется область локального сжатия, а на некомпетентных породах – область локального растяжения.

В режиме тектонического растяжения данная картина сменяется противоположной (рис. 5В). Свободными изгибами являются участки компетентных пород, ограничивающими изгибами – участки некомпетентных пород. В соответствии с данным распределением типов изгибов локальные области сжатия и растяжения образуются, соответственно, на некомпетентных и компетентных породах.

Таким образом, на свободных и ограничивающих изгибах сместителя возникают, соответственно, области локального растяжения и сжатия. В режиме тектонического сжатия области локального сжатия и растяжения связаны, соответственно, с компетентными и некомпетентными породами. В случае тектонического растяжения, наоборот, области локального сжатия и растяжения приурочены, соответственно, к некомпетентным и компетентным породам.

Данный вывод относится к деформациям сбросового и взбросового типа, а также к деформациям сдвигового типа. В последнем случае на свободном изгибе образуются дополнительные сбросо-сдвиги (дуплекс растяжения), а на ограничивающих изгибах – взбросо-сдвиги (дуплекс сжатия) [12].

Глубина вносит дополнительную лепту в изменение напряженного состояния и раскрытости разрыва, обусловленную сменой тектонического режима сжатия в верхней зоне режимом растяжения в нижней зоне. При этом горизонтальное направление оси σ_1 сменяется вертикальным. В зависимости от условий залегания разрыва на фоне изменения общего тектонического режима образуются зоны локального увеличения и уменьшения напряжений. Им соответствуют участки уменьшения и увеличения раскрытости и проницаемости разрыва.

Выделяются несколько типичных вариантов изменения проницаемости сместителя с глубиной. В первом варианте (рис. 6А) субгоризонтальное залегание сместителя в верхней зоне сменяется субвертикальным в нижней зоне. В верхней зоне сместитель простирается параллельно оси σ_1 . В нижней зоне поверхность сместителя также субпараллельна оси σ_1 . В этом случае сместитель везде субпараллелен оси σ_1 и поэтому является открытым и способным дренировать флюид на всю глубину.

Во втором варианте (рис. 6Б) по сравнению с первым простираение сместителя и осей σ_1 не изменяется, тогда как падение сместителя становится диаметрально противоположным: субвертикальным в верхней зоне и субгоризонтальным внизу. В верхней зоне поверхность сместителя и ось σ_1 являются субпараллельными. В нижней зоне угол между осью σ_1 и поверхностью сместителя увеличивается от 0° до 90° , что сопровождается потерей проницаемости сместителя. Поэтому проницаемость сместителя с глубиной уменьшается и он становится непроницаемым в нижней зоне.

Третий вариант (рис. 6В) характеризуется таким же падением сместителя, как первый, однако простирание сместителя при этом повернуто на 90° . Из-за смены простирания сместитель в верхней зоне не является субпараллельным оси σ_1 . В нижней зоне поверхность сместителя и ось σ_1 остаются субпараллельными. Поэтому сместитель сохраняет проницаемость в нижней зоне и становится непроницаемым в верхней части разреза.

Четвертый вариант (рис. 6Г) аналогичен третьему, за исключением дополнительного усложнения нижней части сместителя, где он приобретает субгоризонтальное залегание. Из-за этого усложнения в нижней части сместитель теряет субпараллельность с осью σ_1 и свою проницаемость.

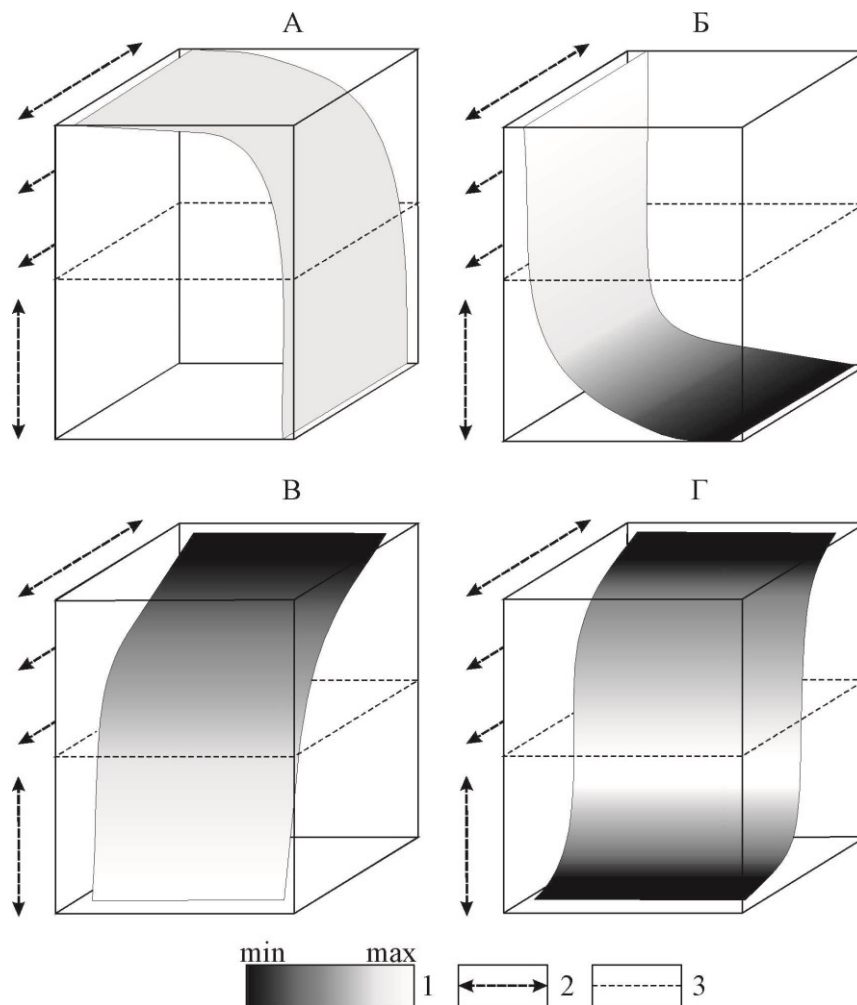


Рис. 6. Проницаемость изогнутого сместителя разлома:

- А – раскрытие всего сместителя; Б – раскрытие верхней части сместителя;
 В – раскрытие нижней части сместителя; Г – раскрытие средней части сместителя;
 1 – условный показатель проницаемости; 2 – направление оси максимального нормального напряжения;
 3 – граница зон режимов тектонического сжатия (вверху) и растяжения (внизу)

Анализ рассмотренных вариантов показывает, что с ростом глубины на фоне смены тектонического режима сжатия режимом растяжения как в верхней, так и в нижней части разреза образуются зоны локального сжатия и растяжения. Зоны локального растяжения формируются в верхней части разреза (в режиме тектонического сжатия) только при условии субпараллельности оси σ_1 и линии простирания сместителя, а также в нижней части разреза (в режиме тектонического растяжения) при условии субверти-

кального залегания разрыва. Нарушение указанных условий приводит к формированию локальных зон сжатия.

Места локации и механизм образования микросейсм обусловлены распределением областей локального сжатия и растяжения. При этом выделяется две группы факторов, определяющие микросейсмичность отдельно взятого разлома: группа статических факторов и динамическая группа. Статическая группа, в отличие от динамической, не изменяется с течением текущего времени. Кроме этого, данные группы отличаются своей функцией в формировании микросейсм.

Статическая группа факторов определяет места локации микросейсм различного типа. Главным фактором является изгиб сместителя. При активизации смещения крыльев разлома на свободных изгибах сместителя формируются микросейсм типа растяжения, а на ограничивающих изгибах – микросейсм типа сжатия.

Недостаточная плотность скважин, вскрывающих сместитель, затрудняет детальное описание его геометрии и выделение изгибов. В таких случаях они могут быть выделены по распределению в разрезе компетентных и некомпетентных пород и общему тектоническому режиму. Как показано выше, к некомпетентным породам приурочены субпластовые участки сместителя, к компетентным породам – более короткие секущие пласт участки.

Динамическая группа факторов, в отличие от статической, определяет не место, а механизм образования микросейсм, соответствующий условиям локального сжатия и растяжения. Главными факторами этой группы являются тектонический режим активизации и сегментация разлома.

Следует учесть, что активизация разлома в виде движения его крыльев характеризуется набором периодов различной продолжительности. Условно выделяются длительные и короткопериодные движения разломов. К первым относятся периоды, исчисляемые сутками, месяцами, годами и миллионами лет. Короткопериодная активизация характеризуется широким спектром колебаний. Наиболее четко выделяются гармоники с продолжительностью периодов от 20 до 120 минут [13].

Причины тектонической активизации по отношению угольному бассейну подразделяются на внешние и внутренние. Большое значение придается внешним факторам, главными из которых считаются тектоническая активность соседних геологических структур, ротационное изменение напряженного состояния пород, лунно-солнечные приливы.

Неотектоническая активизация, экстраполируемая на настоящее время в Донецком бассейне, объясняется развитием внешних по отношению к бассейну тектонических процессов. Наиболее вероятной причиной по [14] является «резонансный отклик» глубинных структур Донбасса на тектонические события, активно развивающиеся в соседнем Среднеземноморском геосинклинальном поясе. В качестве возможного механизма передачи усилий вдоль литосферной плиты могут быть низкоскоростные деформационные волны. Их скорость распространения оценивается от 20 до 40 км/год [15]. Прохождение фаз сжатия и растяжения такой волны через разлом способно в течение полугода-года изменить его напряженное состояние и тип тектонического режима.

Ротационное изменение напряженного состояния пород обусловлено небольшим изменением скорости вращения Земли вокруг оси в течение года, которое по высвобождаемой энергии соизмеримо с сейсмичностью планеты за тот же период. Минимумы скорости вращения припадают на III и IX месяцы, максимум – на VI месяц [16]. Поэтому изменение скорости вращения Земли способно периодически (четыре раза в год) изменить общее напряженное состояние разлома.

Лунно-солнечные приливы повторяются с периодичностью около 12 часов. В течение суток земная поверхность дважды испытывает поднятие и опускание, что изменяет общее напряженное состояние разлома, повторяющееся дважды в сутки. Периодичность лунно-солнечных приливов тесно коррелируется с динамикой геофизических полей, в том числе, и с микросейсмичностью [17].

Активизация разлома является результатом суммирования за определенный период наблюдения периодик различной продолжительности. Результирующая активность определяет общий текущий тектонический режим разлома, представленный сжатием или растяжением. На локальных участках разлома, или сегментах, общий режим испытывает трансформацию: усиливается, ослабляется, сменяется противоположным.

По механизму образования выделяются два основных типа микросейсм: первый тип – микросейсм сжатия и второй тип – микросейсм растяжения. Их локализация обусловлена образованием изгибов сместителя. Микросейсм типа сжатия приурочены к ограничивающим изгибам сместителя. Микросейсм типа растяжений локализуются на изгибах свободного типа.

Общий тектонический режим и форма сместителя определяют свободный или ограничивающий тип изгиба и, как следствие, механизм образования микросейсм, соответственно, типа растяжения или сжатия. Один и тот же сегмент разлома в зависимости от общего тектонического режима может быть местом формирования микросейсм типа сжатия или растяжения.

Например (см. рис. 5), при активизации разлома в режиме тектонического сжатия микросейсм типа сжатия локализуются на крутых коротких фрагментах сместителя, а микросейсм типа растяжения – на длинных пологих участках. Смена общего режима активизации разлома приводит к смене знака локальных напряжений: на коротких крутых фрагментах формируются микросейсм типа растяжения, на длинных пологих фрагментах – микросейсм типа сжатия.

Таким образом, места локализации микросейсм соответствуют участкам локального изменения напряжений, приуроченным, главным образом, к изгибам сместителя разрыва. Механизм образования микросейсм на этих участках определяется видом изгиба, который зависит от направления изгиба и тектонического режима активизации разлома. Направление изгиба определенным образом связано с компетентностью пород крыльев разлома.

Обсуждение результатов

Исследование микросейсмического излучения зоны динамического влияния разлома остается одной из больших научных проблем, в решении которой заинтересованы ученые из различных отраслей: от сейсмологии и геодинамики до рудной, нефтегазовой и инженерной геофизики. При этом выделяются вопросы, связанные как с причинами, порождающими микросейсм, так и с реакцией разлома на эти причины в виде разнотипных микросейсм. В основе исследования микросейсм лежат геодинамические, тектонофизические и петрофизические представления о разломообразовании.

Трудности исследования в первую очередь заключается в сложности самого объекта исследования. Область динамического влияния имеет большие размеры по площади и глубине. Ее полный охват возможен лишь на основе картирования, складывающегося в единое целое сведения о разрозненных фрагментах разлома, полученных в результате документации обнажений горных пород, бурения разведочных скважин и выполнения геофизических работ. При этом нет полной уверенности, что обнаружены и учтены все особенности строения разлома, генерирующие микросейсм.

Отдельные фрагменты разлома исследуются при помощи физического моделирования. Данный метод позволяет, упростив строение разлома, установить причинно-следственные связи параметров процесса разломообразования. Однако эти связи применимы лишь для отдельного элемента разлома, вычлененного из его общего строения. Тем не менее, результаты физического моделирования в ряде случаев позволяют правильно истолковать данные геофизических исследований.

Вся зона динамического влияния разлома в условиях естественного залегания пород может быть исследована при помощи геофизических методов на основе мониторинга микросейсмического излучения. При этом использование микросейсм имеет свои трудности, связанные с однозначностью решения таких задач, как разделение спектра микросейсм по источникам образования, выделение мест локации микросейсмических событий, установление механизма их образования и характера насыщения пород. Поэтому при исследовании микросейсмического излучения важно оттолкнуться от известных особенностей разлома, определяющих характер микросейсмического излучения.

В данной работе решается первоочередной вопрос микросейсмических исследований – определение мест локализации и типа микросейсмического излучения в отдельно взятом разломе по априорным данным. Рассматривается простейший вариант разлома, в зоне динамического влияния которого не распространены другие сопутствующие разломы и складки.

Внимание акцентируется на особенностях строения разлома, определяемых по данным ранее проведенной разведки угольного месторождения. К таким особенностям прежде всего относятся свободные и ограничивающие изгибы сместителя. С ними связаны места локации микросейсм. Вид изгиба устанавливается по форме сместителя и общему тектоническому режиму. Форма сместителя определяется по трехмерным координатам точек его пересечения разведочными скважинами, либо реконструируется по распределению компетентных и некомпетентных пород в крыльях разлома. Общий тектонический режим устанавливается по данным линейamentного анализа космических снимков, натурных измерений напряженного состояния пород и геофизических исследований. В зависимости от тектонического режима компетентные породы могут быть местами локализации областей сжатия или расширения.

Определение участков локализации микросейсмического излучения разного типа имеет непосредственное отношение к поиску АСМ вблизи разломов, дренирующих глубинный газ. Микросейсмическое излучение типа растяжения указывает на развитие в зоне динамического влияния разлома локальных участков пород с открытым типом трещиноватости. Прослеживание таких участков по простиранию и падению разлома позволяет проследить трещинные «коридоры» или каналы для миграции глубинных газов. Микросейсмическое излучение типа сжатия свидетельствует о закрытом типе трещиноватости и барьере на пути миграции газа. Комбинация, состоящая из проницаемого коридора и блокирующего его непроницаемого барьера, представляет собой АСМ с подводным каналом.

Следует отметить, что в работе проанализированы условия микросейсмического излучения разлома и возможности формирования АСМ, определяемые по априорным данным. Экспериментальные данные микросейсмического мониторинга позволяют детализировать картину распределения раскрытости трещиноватости в области динамического влияния разлома. Пластовые карты латерального изменения раскрытости трещин дают возможность спрогнозировать АСМ до начала добычи угля.

Выводы

В результате исследований установлено следующее.

1. Места локации микросейсм, связанные с аномальными скоплениями метана, располагаются на участках локального изменения напряженного состояния разлома, главным фактором образования которых при активизации разлома является наличие изгиба сместителя.

2. Механизм образования микросейсм обусловлен видом изгиба: микросейсм с механизмом растяжения формируются на свободных изгибах; с механизмом сжатия – на ограничивающих изгибах. Вид изгиба сместителя в свою очередь определяется его формой и тектоническим режимом активизации разлома.

3. Форма сместителя определяется по трехмерным координатам точек его вскрытия разведочными скважинами. При дефиците таких данных форма сместителя реконструируется по распределению ассоциаций компетентных и некомпетентных пород в крыльях разлома.

4. Тектонический режим активизации разлома характеризуется периодическим изменением, обусловленным, прежде всего, тектонической активностью соседних геологических структур, ротационным изменением напряженного состояния пород, лунно-солнечными приливами. Тектонический режим также изменяется с увеличением глубины залегания пород. О современном тектоническом режиме свидетельствуют данные линеamentного анализа космических снимков и натурные измерения напряженного состояния пород.

5. Комбинация участков микросейсм типа сжатия вверху и микросейсм типа растяжения внизу в поле микросейсм отражает наиболее благоприятное условие образования аномального скопления метана.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Добрынина А.А., Саньков А.В., Саньков В.А. Анизотропия микросейсм в зонах активных разломов // Современная тектонофизика. Методы и результаты: материалы шестой молодежной тектонофизич. шк.-семинара / ИФЗ РАН. – М., 2019. – С. 96-98.
2. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Арутюнов С.И., Ризанов Е.Г., Дыбленко В.П., Дрягин В.В. Сейсмические исследования неравномерности открытой трещиноватости и неоднородности флюидонасыщения геологической среды для оптимального освоения месторождений нефти и газа // Георесурсы. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 206-215. – DOI: 10.18599/grs.2018.3.206-215.
3. Кушнир А.Ф., Варыпаев А.В., Рожков М.В., Епифанский А.Г., Дрикер И. Определение параметров очагов микросейсмических событий по данным поверхностных сейсмических групп при сильных коррелированных помехах и сложных механизмах источников излучения // Физика Земли. – 2014. – № 3. – С. 28-50. – DOI: 10.7868/S000233371403003X.
4. Чиркин И.А., Ризанов Е.Г., Каляшин С.В., Колигаев С.О., Радван А.А. Мониторинг микросейсмической эмиссии для обеспечения экологической безопасности разведки и разработки нефтяных месторождений на акватории // Вестн. РАН. – 2014. – № 4. – С. 8-14.
5. Иванов Л.А., Туманов В.В., Савченко А.В. Структурно-геодинамические предпосылки использования микросейсм для поиска аномальных скоплений метана // Труды РАНИМИ. – 2022. – № 16-17 (31-32). – С. 46-59.
6. Петров В.А., Леспинас М., Хаммер Й. Тектонодинамика флюидопроводящих структур и миграция радионуклидов в массивах кристаллических пород // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50, № 2. – С. 99-126.
7. Sibson R.H., Scott J. Stress/fault controls on the containment and release of overpressured fluids: examples from gold-quartz vein systems in Juneau, Alaska; Victoria, Australia and Otago, New Zeland // Ore Geology Reviews. – 1998. – V. 13, № 1-5. – P. 293-306. – DOI: 10.1016/S0169-1368(97)00023-1.
8. Тарасова А.А. Сегментная активизация разломов (по результатам физического моделирования) // Современная тектонофизика. Методы и результаты: материалы третьей молодежной шк.-семинара / ИФЗ РАН. – М., 2013. – Т. 1. – С. 310-320.

9. Shipton Z.K., Cowie P.A. A conceptual model for the origin of fault damage zone structures in high-porosity sandstone // *Journal of Structural Geology*. – 2003. – V. 25, № 3. – P. 333-344. – DOI: 10.1016/S0191-8141(02)00037-8.
10. Тугарина М.А., Семинский К.Ж. Отражение пространственно-временных закономерностей разрывообразования в характере обводненности разломной зоны // *Внутренняя структура континентальных разломных зон: прикладной аспект* / [К.Ж. Семинский и др.]. – Новосибирск, 2005. – С. 94-112.
11. Cowie P.A. A healing-reloading feedback control on the growth rate of seismogenic faults // *Journal of Structural Geology*. – 1998. – V. 20, № 8. – P. 1075-1087. – DOI: 10.1016/S0191-8141(98)00034-0.
12. Прокопьев А.В., Фридовский В.Ю., Гайдук В.В. Разломы: (Морфология, геометрия и кинематика): учеб. пособие. – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2004. – 148 с.: ил.
13. Панжин А. А. Исследование короткопериодных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением спутниковой геодезии // *Маркшейдерия и недропользование*. – 2003. – № 2. – С. 43-54.
14. Корчемагин В.А. Геологическая структура и поля напряжений в связи с эволюцией эндогенных режимов Донбасса: дис. ... д.г.-м. н.: 04.00.04 / Корчемагин Виктор Александрович. – Москва, 1984. – 380 с.
15. Шерман С.И. Деформационные волны как триггерный механизм сейсмической активности в сейсмических зонах континентальной литосферы // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2013. – Т. 4., № 2. – С. 83-117.
16. Акуленко Л.Д., Марков Ю.Г., Перепелкин В.В. Неравномерности вращения Земли // *Докл. Акад. наук*. – 2007. – Т. 417, № 4. – С. 483-488.
17. Адушкин В.В., Спивак А.А., Харламов В.А. Влияние лунно-солнечного прилива на вариации геофизических полей на границе земная кора-атмосфера // *Физика Земли*. – 2012. – № 2 – С. 14-16.

УДК 550.8.052

DOI:10.7242/echo.2023.1.15

МНОГОЭТАПНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ

П.Н. Новикова

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Обсуждаются стратегии многоэтапного прогнозирования при анализе магнитных вариаций на базе гибридной модели машинного обучения. Для реализации краткосрочных прогнозов применительно к циклической компоненте модели хорошо зарекомендовали себя прямая и рекурсивные стратегии. Оценена возможность множественного прогнозирования нерегулярной компоненты. Показаны результаты одношагового и многоэтапного прогнозирования на примере среднечасовых магнитных вариаций геомагнитной обсерватории г. Новосибирск.

Ключевые слова: многоэтапное прогнозирование, магнитные вариации, временные ряды, машинное обучение, гибридный алгоритм, одношаговый прогноз.

Анализ и прогнозирование магнитной активности в высоких широтах, а также в прибрежных зонах, где поведение магнитных вариаций показывает наиболее нерегулярный, изменчивый характер [1, 3, 5], является важной задачей как собственно всестороннего исследования природы магнитных вариаций и геомагнитных бурь, так и производственных задач, связанных с оценкой магнитного поля в краткосрочной и среднесрочной перспективах (например, бурение скважин по навигации по магнитному полю, работы железнодорожного транспорта и т.д. [5]).

В данной статье для построения краткосрочных прогнозных значений магнитных вариаций, представляющих собой временной ряд [2], используется базовая гибри-