

DOI: [https://doi.org/10.17353/2070-5379/20\\_2015](https://doi.org/10.17353/2070-5379/20_2015)

УДК 551.243:550.834:553.98(571.16)

**Москаленко А.Н., Худoley А.К.**Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, [artemmn@gmail.com](mailto:artemmn@gmail.com), [a.khudoley@spbu.ru](mailto:a.khudoley@spbu.ru)**Жуков В.В.**ООО «Газпромнефть НТЦ», Санкт-Петербург, Россия, [Zhukov.VV@gazpromneft-ntc.ru](mailto:Zhukov.VV@gazpromneft-ntc.ru)**Демин В.Ю.**ООО «Газпромнефть-Ангара», Санкт-Петербург, Россия, [Demin.VY@gazprom-neft.ru](mailto:Demin.VY@gazprom-neft.ru)**Верин А.В.**ООО «Газпромнефть-Восток», Томск, Россия, [Verin.AV@tomsk.gazprom-neft.ru](mailto:Verin.AV@tomsk.gazprom-neft.ru)

## РЕКОНСТРУКЦИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ И ПОЛЯ ПАЛЕОНАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ УРМАНО-АРЧИНСКОЙ ПЛОЩАДИ (НЮРОЛЬСКАЯ ВПАДИНА)

*Предложен метод реконструкции полей напряжений по данным анализа структурных карт сейсмических горизонтов, основанный на определении векторов перемещений по разломам и последующей их обработке по аналогии с зеркалами и бороздами скольжения. Расчет ориентировки главных осей тензора напряжений производился двумя программами (FaultKin и StressGeol), использующими разные постулаты на свойства геосреды и взаимосвязь хрупких трещин с напряженным состоянием. Установлено, что в мезозойское время на Урмано-Арчинской площади доминировало сжатие север-северо-западного простирания. Пологая до субгоризонтальной ориентировка осей напряжений максимального сжатия и девиаторного растяжения указывает на доминирующую роль сдвиговой тектоники на этом этапе эволюции Урмано-Арчинской площади. Во время формирования поверхности раздела между карбонатным палеозоем и терригенным мезозоем (сейсмический горизонт M<sub>1</sub>), существенное значение имели также сбросовые перемещения, что указывает на наличие нескольких этапов в мезозойской эволюции разрывных нарушений рассматриваемого региона.*

**Ключевые слова:** сейсмические горизонты, поле напряжений, сдвиги, Урмано-Арчинская площадь.

### Введение

Реконструкция стресс-состояний по площади исследуемого региона, определяющая параметры поля напряжений, является важной составляющей в изучении его тектонической эволюции и необходима, прежде всего, для прогноза зон открытой трещиноватости. Поиск методов решения этой задачи особенно актуален для закрытых территорий, где нет возможности производить исследование природных обнажений. В настоящей работе рассматривается применение нового подхода для реконструкции параметров поля напряжений на примере Урмано-Арчинской площади, расположенной в центральной части Нюрольской впадины Западно-Сибирской плиты.

В геологии традиционно оценка напряжённого состояния проводится по бороздам (или зеркалам) скольжения в естественных обнажениях [Гзовский, 1975; Шерман, Днепровский,

1989; Ребецкий, 2007 и др.], тогда как реконструкции напряженного состояния по смещениям, фиксируемым на поверхностях сейсмических горизонтов весьма редки [Gartrell, 2005]. Наиболее близкий к рассматриваемому авторами подходу по получению данных для реконструкции напряжений разрабатывается Аланом Моррисом (Alan Morris) из Юго-Западного Исследовательского Института (Сан-Антонио, США) [Morris, Ferrill, 2009; Morris, McGinnis, Ferrill, 2014]. Основной идеей предлагаемого им подхода является определение ориентировки поверхностей разрывных нарушений по отношению к направлению действия главных напряжений с учетом их интенсивности, но при интерпретации основное внимание уделяется изучению деформаций (strain analysis) по амплитудам перемещений по разломам. В предлагаемом авторами подходе основное внимание уделяется реконструкции и анализу стресс-состояний.

### Методика расчета локального стресс-состояния при анализе структурных карт сейсмических горизонтов

Важным источником информации о структуре Урмано-Арчинского месторождения являются сейсмические данные, представленные в виде профилей и структурных карт сейсмических горизонтов. На структурных картах отчетливо выделяются разрывные нарушения, по которым крылья разломов перемещены относительно друг друга. Идея методики, предлагаемой авторами, изображена на рис. 1 и состоит в том, что выделяемые по сейсмическим данным разлом и вектор перемещения рассматриваются как аналог трещины скалывания и борозды скольжения с определенным направлением перемещения, т.е. те структуры, ориентировка которых используется для расчета ориентации главных напряжений [Гзовский, 1975; Шерман, Днепровский, 1989 и др.].

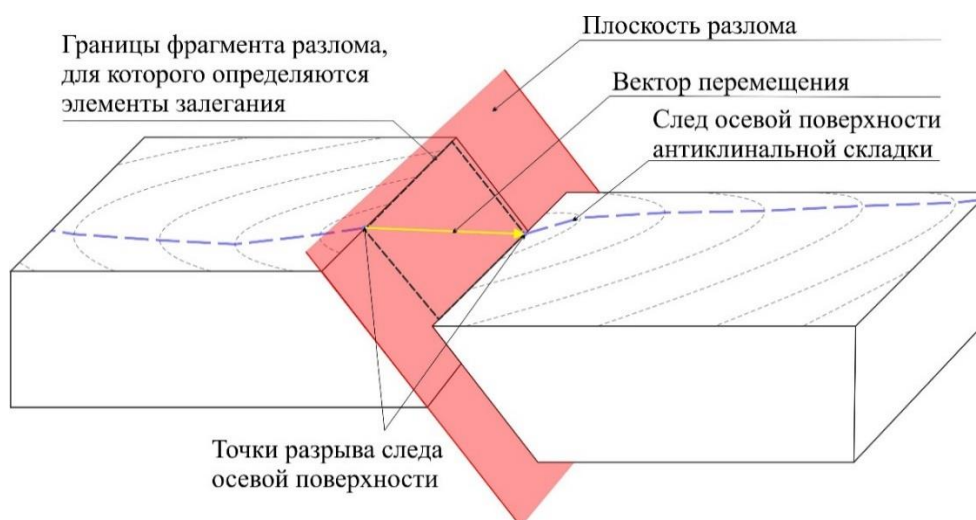


Рис. 1. Схема определения вектора перемещения по разрывному нарушению

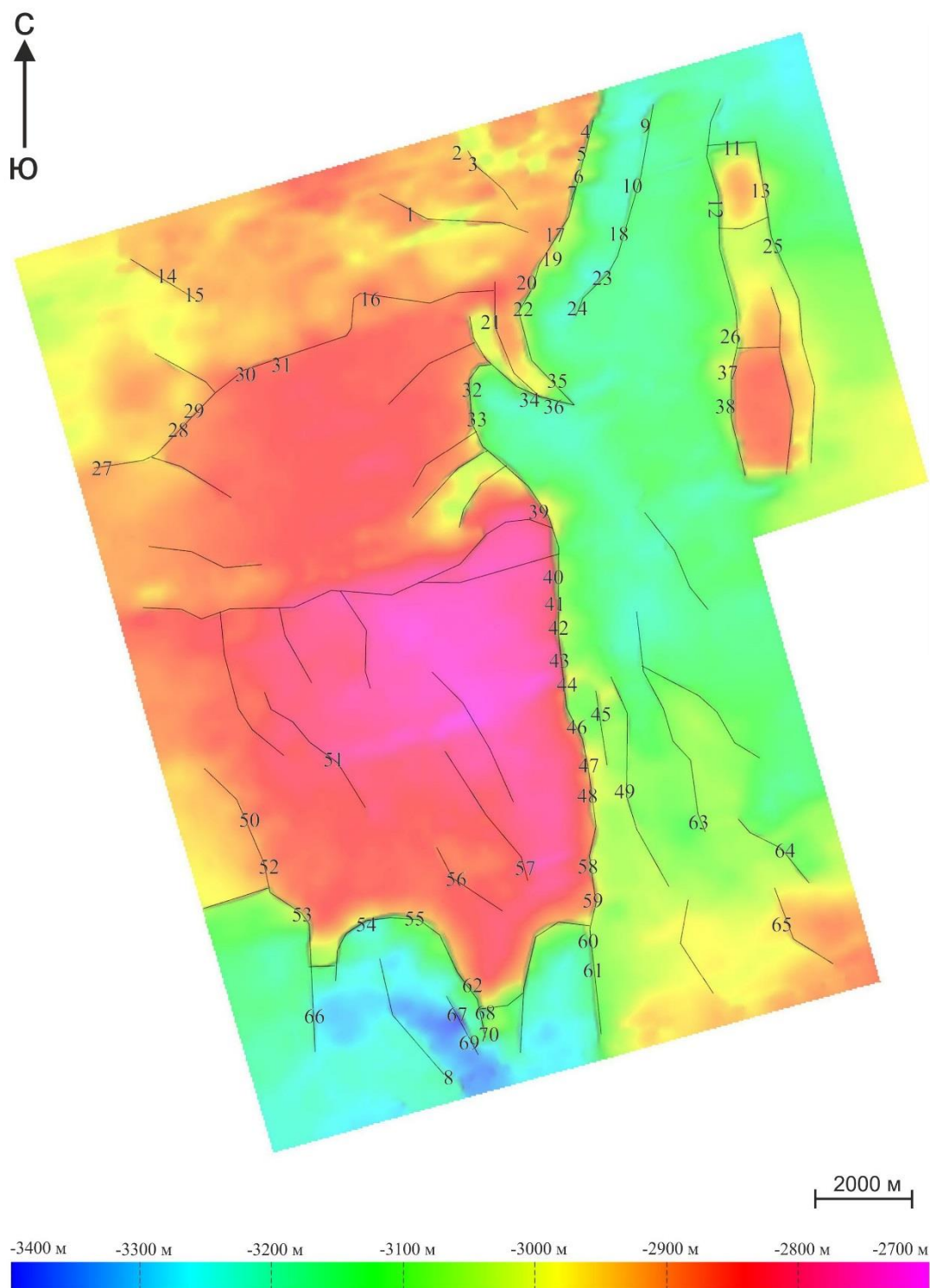
Согласно предлагаемой методике, на структурной карте сейсмического горизонта выбирается характерная структурная форма (антиклинальная или синклиналиная), распознаваемая как в висячем, так и лежащем крыле выделенного по сейсмическим данным разлома. Для выбранной структуры на карте отрисовывается след ее осевой поверхности, который прерывается при пересечении этой структуры разломом. Для точек разрыва следа осевой поверхности определяются координаты, а вектор, соединяющий разорванные фрагменты структуры, и будет являться вектором перемещения, определяющим кинематику разлома. Так как выделение коррелируемых в висячем и лежащем крыле разлома структурных форм нередко оказывается неоднозначным, для расчета направления осей главных напряжений учитывались только те вектора перемещения, которые (1) в пределах одного разлома, пересекающего поверхности нескольких сейсмических горизонтов, характеризовались сходной ориентировкой на разных сейсмических горизонтах, (2) в пределах одного разлома характеризовались сходной ориентировкой для нескольких соседних структурных форм, выделенных по одному и тому же сейсмическому горизонту. После отбраковки недостаточно надежно определенных векторов перемещений, для оставшихся были определены элементы залегания поверхности разлома и самого вектора перемещения.

Карты, по которым производилась идентификация разрывных нарушений и векторов перемещений, приведены на рис. 2-5, а примеры определения векторов перемещения - на рис. 6.

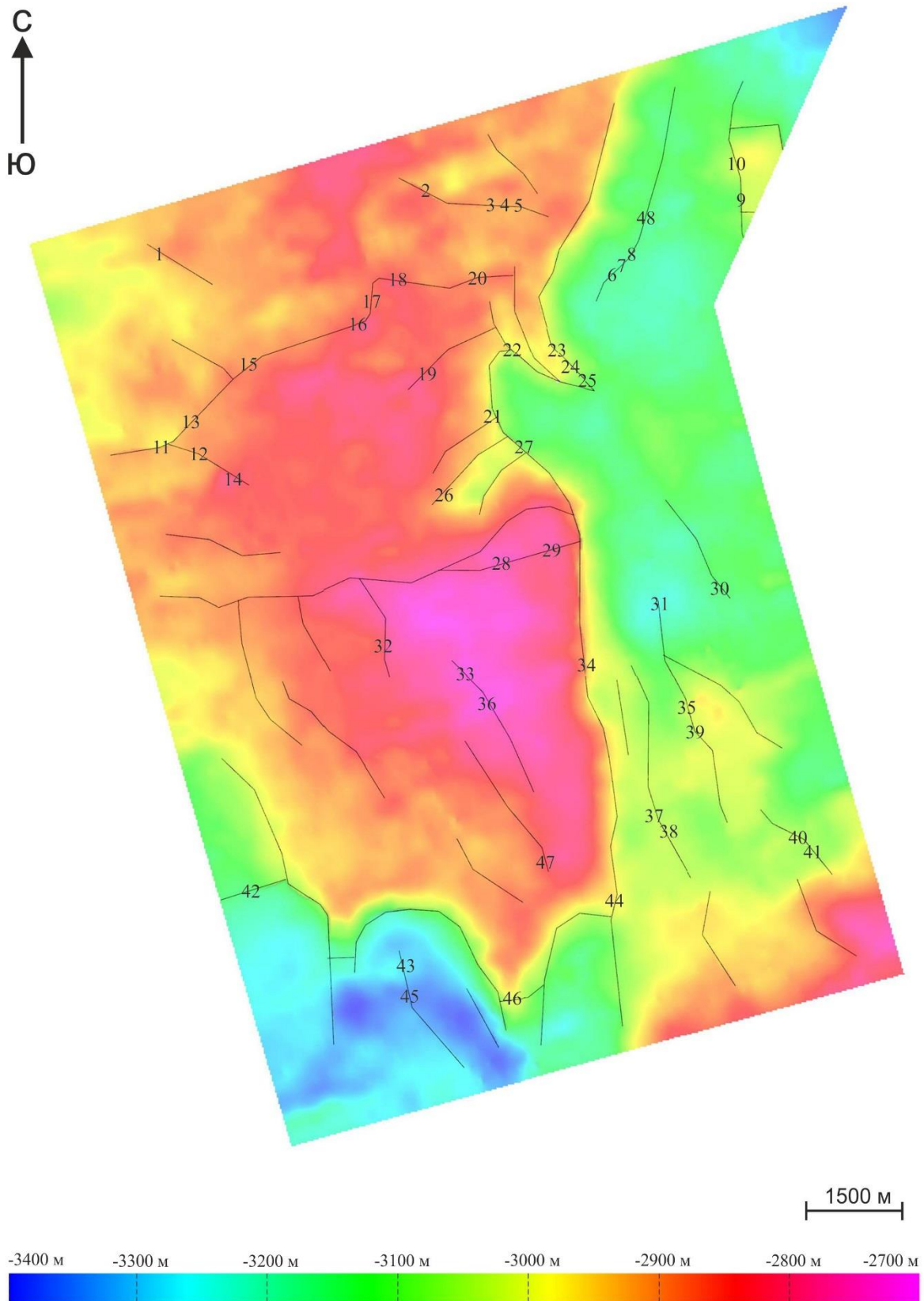
На рис. 6 показан фрагмент одного и того же разлома, пересекающего сейсмические горизонты  $M_1$  и  $U_{10}$ . Очевидно, что для этого фрагмента выполняются указанные выше два критерия – в пределах одного и того же разлома его кинематические характеристики (правый сдвиг), определенные по соседним структурам не изменяются, сохраняются они и при рассмотрении этого разлома на структурных картах разных сейсмических горизонтов (рис. 6а, в). Для большей наглядности перемещения показаны как в плане (рис. 6а, в), так и под углом к поверхности сейсмического горизонта (рис. 6б, г). Уменьшение амплитуды перемещения от  $M_1$  к  $U_{10}$  отражает затухание разрывного нарушения вверх по разрезу.

В более сложных случаях, для определения вектора перемещения довольно часто приходится рассматривать изучаемые объекты при разных соотношениях вертикального и горизонтального масштабов и под разными углами, выбирая наиболее подходящую точку обзора. Учитывая, что поверхность разлома обычно неровная, элемент залегания разлома определяется только для фрагмента, в пределах которого находится сам вектор перемещения. Типичный пример рассмотрен на рис. 7, где показан фрагмент структурной карты поверхности сейсмического горизонта  $M_1$ . Здесь за разрывное нарушение принимается резкий уступ рельефа поверхности сейсмического горизонта. Этот уступ неровный, и искривленная

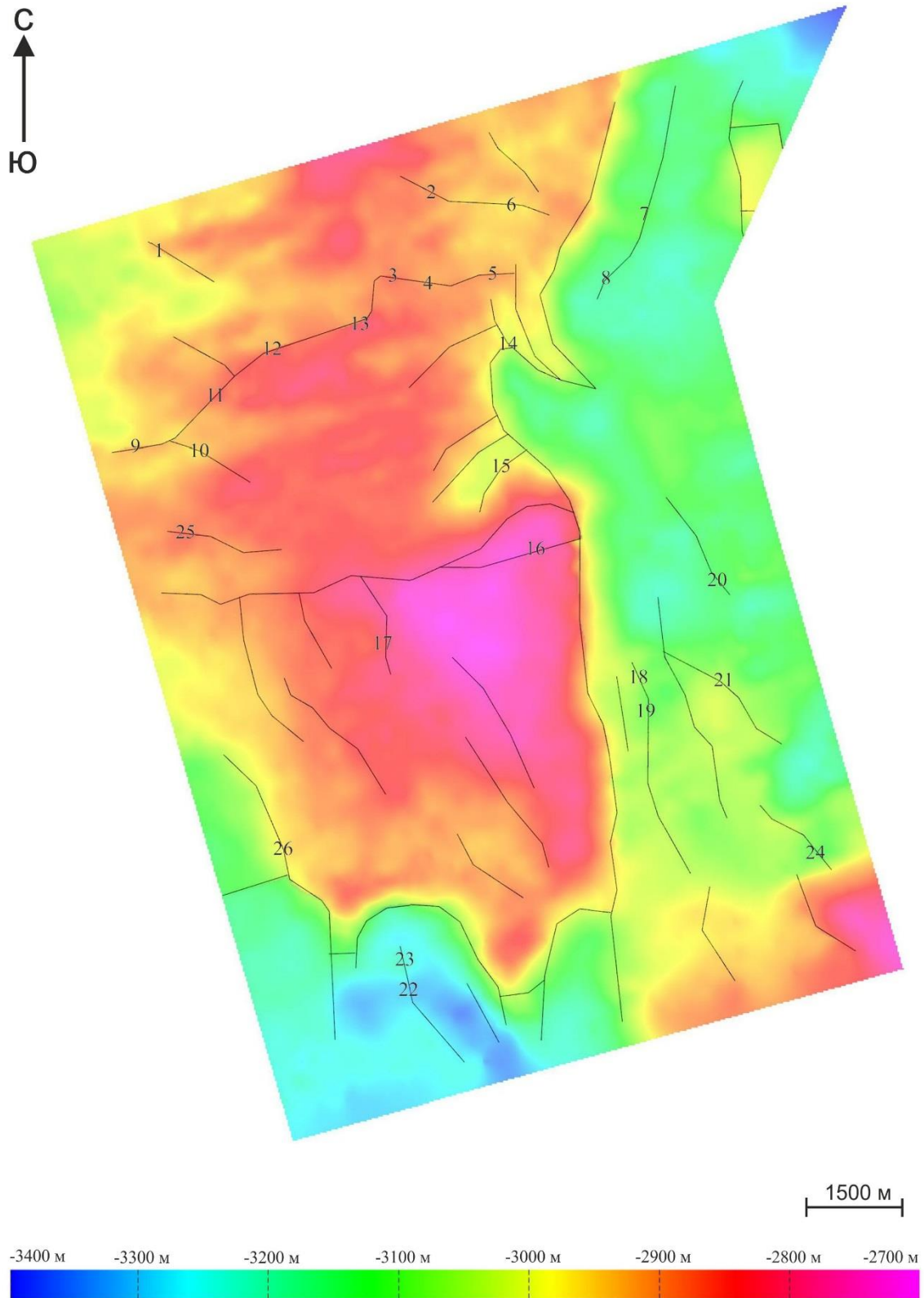
поверхность разлома аппроксимируется плоскостью на небольшом участке, где предполагается определение вектора перемещения по этому разлому. Вектор перемещения определяется по перемещению следа осевой поверхности поперечной антиклинали, прослеживаемой по обе стороны от разлома.



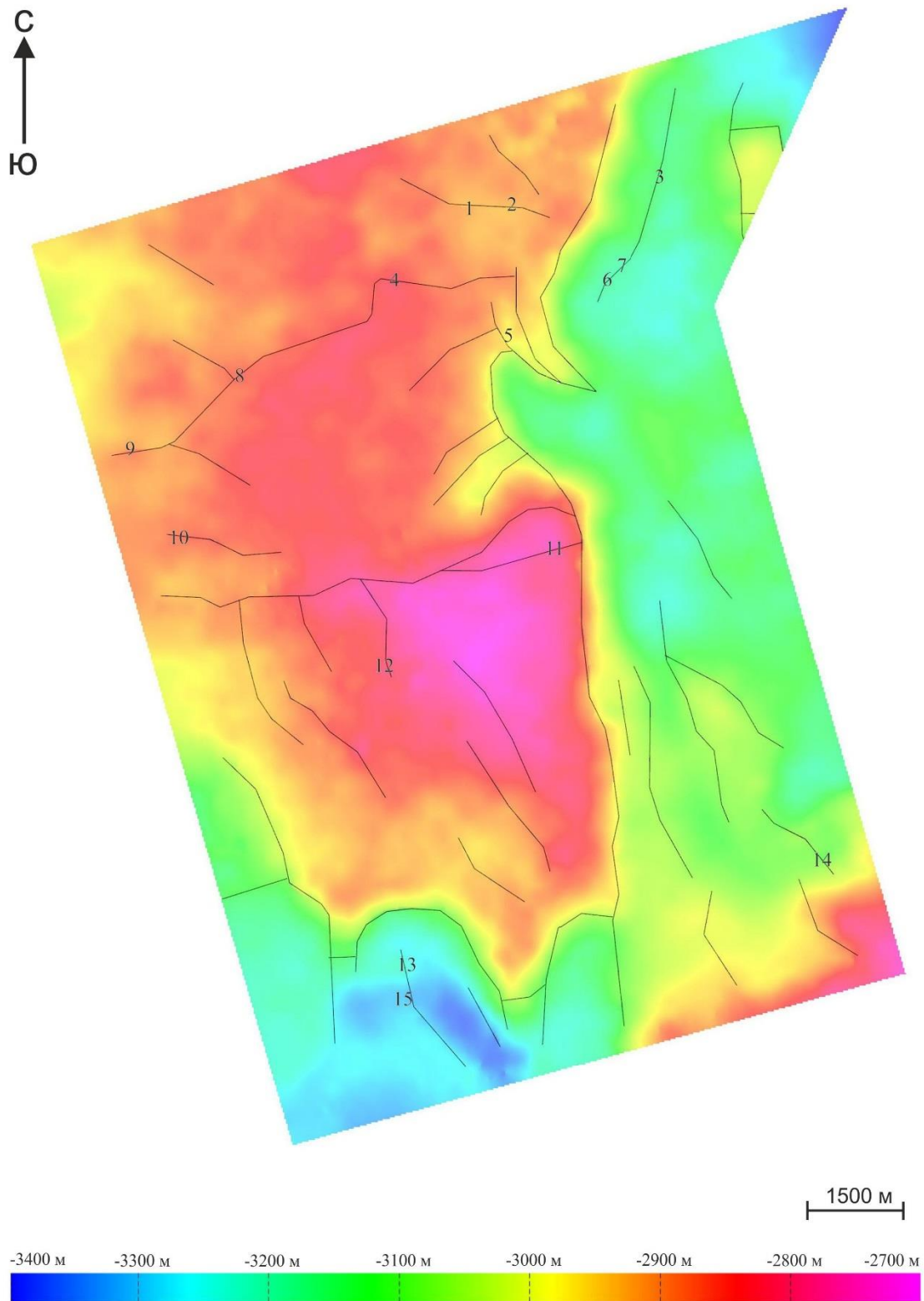
**Рис. 2. Карта поверхности горизонта  $M_1$  с указанием местоположения замера и номера вектора перемещения**



**Рис. 3. Карта поверхности горизонта J<sub>15</sub> с указанием местоположения замера и номера вектора перемещения**



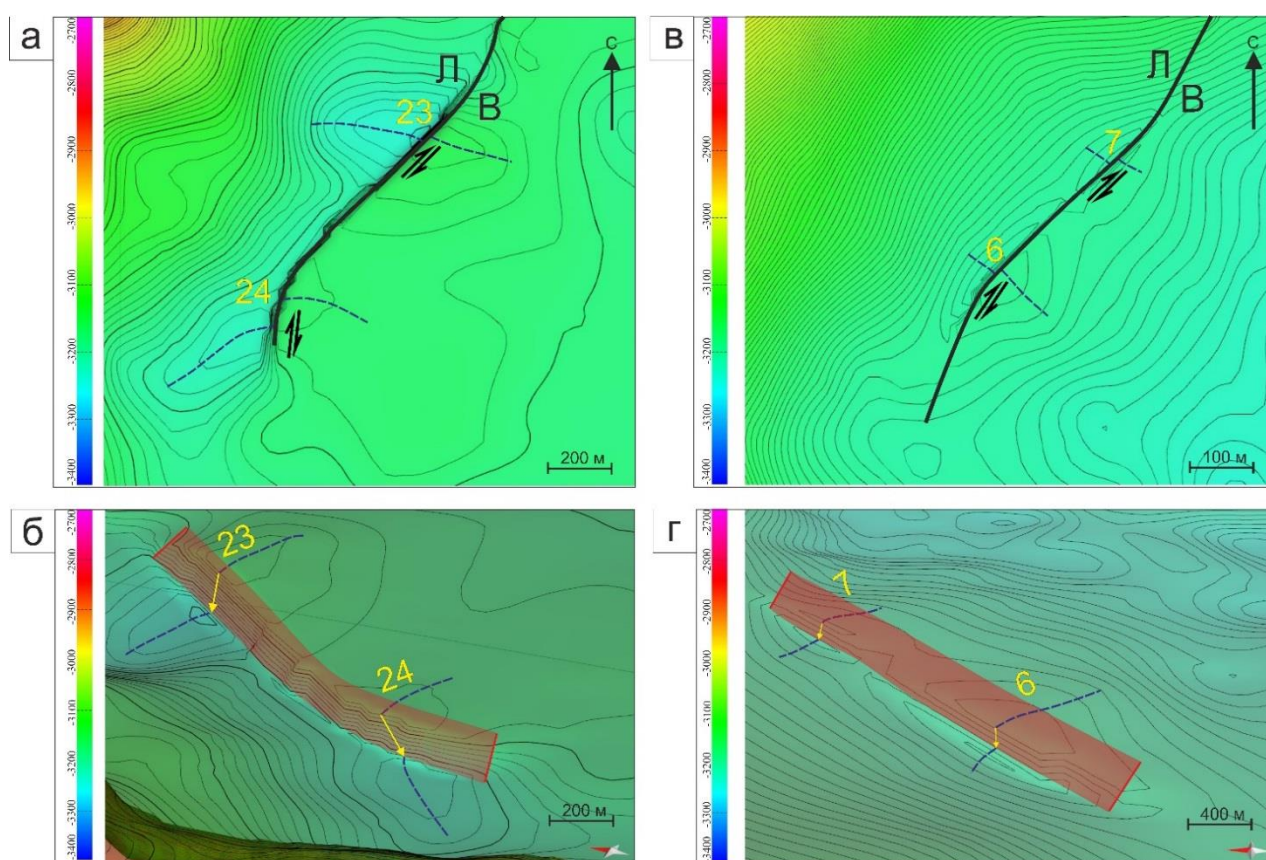
**Рис. 4. Карта поверхности горизонта J<sub>14</sub> с указанием местоположения замера и номера вектора перемещения**



**Рис. 5. Карта поверхности горизонта  $U_{10}$  с указанием местоположения замера и номера вектора перемещения**

Для расчета параметров тензора напряжений по данным о пространственной ориентировке разломов и векторов перемещений использовались две программы – FaultKin версии для Windows (FaultKinWin) и StressGeol. Программа FaultKin была разработана в

Корнельском университете (США) в группе Р. Альмендингера и ее идеология изложена в работах [Allmendinger et al., 2012; Marrett, Allmendinger, 1990]. Основная идея расчетов в данной программе заключается в том, что каждому вектору перемещения, будь то борозда скольжения на трещине или задокументированное перемещение по крупному разлому, отвечает локальное стресс-состояние, в котором оси максимального сжатия и девиаторного растяжения (минимального сжатия) лежат в плоскости, проходящей через вектор перемещения перпендикулярно плоскости разлома, и ориентированы под углом  $45^\circ$  к вектору перемещения. После того, как эта информация собрана по всем доступным векторам перемещений, она обрабатывается методами статистики с получением усредненных значений ориентировки осей сжатия и растяжения.



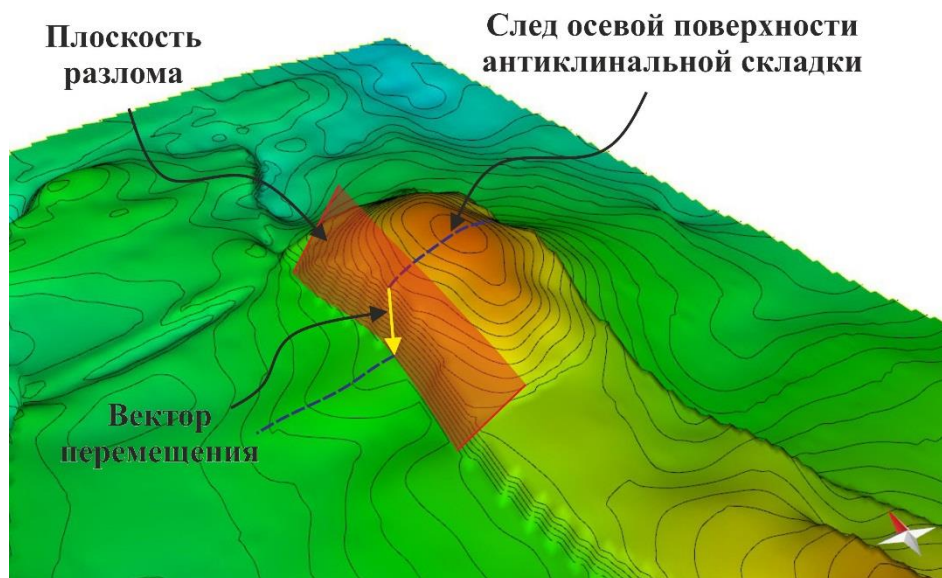
**Рис. 6. Фрагменты сейсмических горизонтов  $M_1$  и  $U_{10}$  с указанием поверхности разлома**

$M_1$ : а – в плане; б – под углом к поверхности сейсмического горизонта, вертикальный масштаб равен горизонтальному;  $U_{10}$ : в – в плане; г – под углом к поверхности сейсмического горизонта, вертикальный масштаб превышен в 5 раз; желтая стрелка - вектор перемещения; желтая цифра - номер замера, соответствующий номеру замера на рис. 2 и 5; В – висячее и Л – лежащее крылья разлома.

Используемая гипотеза об ориентировке главных напряжений отвечает представлению о совпадении плоскости трещины с площадкой действия максимальных касательных напряжений и направления сдвигового смещения на этой площадке с направлением касательных напряжений. Данный подход также предполагает отсутствие взаимного влияния



разрывов. Впервые такой метод был применен в работе [Балакина и др., 1972] при реконструкции природных напряжений по данным о механизмах очагов землетрясений. По отношению к геологическим данным подобная методика применялась в работах В.Д. Парфеновым [Парфенов, 1981, 1984], при этом положение осей главных напряжений определялось на основе данных о совокупности трещин скалывания – метод квазиглавных напряжений. В результате дискуссии, развернувшейся у сейсмологов в 70-х годах прошлого века, было показано, что подобный подход в общем случае не верен [Костров, 1975].



**Рис. 7. Определение вектора перемещения по разлому на примере антиклинальной структуры на сейсмическом горизонте  $M_1$  (вертикальный масштаб превышен в 2 раза)**  
*Вид под углом к поверхности сейсмического горизонта.*

Другим слабым местом программы FaultKin является отсутствие ограничений на объединение близлежащих сколов в выборку, по данным которой производится расчет ориентации оси квазиглавного главного напряжения (в терминах В.Д. Парфенова). При таком объединении фактически высказывается предположение о квазиоднородности напряженного состояния, в пределах которого возникли хрупкие сколы. Наличие такого предположения само по себе говорит о том, что объединение сколов в выборку не может быть произвольным.

Программа StressGeol создана в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН Ю.Л. Ребецким и также ориентирована на реконструкцию палеонапряжений по данным об ориентировке векторов перемещений вдоль плоскостей разрывов и трещин. Алгоритм этой программы основан на методе катакластического анализа совокупности разрывных смещений (МКА), учитывающим наличие дефектов прочности в геологической среде и взаимное влияние разрывов [Ребецкий, 1997, 2003, 2007]. В рамках МКА подыскивается такое стресс-состояние, для которого каждый скол из выборки приводит к уменьшению упругой энергии (вектор

смещений и направление касательного напряжения на плоскости скола должны составлять острый угол), а на совокупности сколов из выборки достигается максимальный сброс упругой энергии. На основе этих положений механики программа сама осуществляет разбивку имеющейся базы данных на однородные выборки трещин сдвига, позволяя, в принципе, выделить несколько стресс-состояний из одной исходной популяции данных (формирование двух и более однородных выборок трещин).

Для выделенных с помощью программы StressGeol однородных выборок расчет ориентировки осей главных напряжений с применением программы FaulKin представляется вполне возможным, и совместное применение двух программ, основанных на разных теоретических моделях, служит контролем корректности предложенной интерпретации. В рассматриваемых примерах определение осей главных напряжений программами FaultKin и StressGeol дало очень близкие результаты, свидетельствующие, что составленная база данных ориентировок разрывных нарушений и векторов перемещения по ним не содержит внутренних противоречий.

### Основные результаты

Как следует из анализа структурных карт сейсмических горизонтов, расположенных между поверхностью контакта карбонатного палеозоя и терригенного мезозоя ( $M_1$ ) и верхней частью верхней юры (В), выделенные на Урманно-Арчинской площади разрывные нарушения характеризуются крутопадающими плоскостями с углами падения  $78^\circ$ - $89^\circ$  и имеют отчетливые сдвиговую и сбросовую компоненты перемещений. Прослеживается несколько систем разрывных нарушений, преимущественно ССВ-ЮЮЗ и субширотного простираний. Наибольшие вертикальные перемещения фиксируются по сейсмическому горизонту  $M_1$ , после чего их величина резко убывает на всех вышележащих сейсмических горизонтах, фиксируя, что после формирования поверхности  $M_1$  (поверхность раздела между карбонатным палеозоем и терригенным мезозоем) кинематические характеристики перемещений по разломам существенно изменились. Сдвиговые перемещения убывают вверх по разрезу постепенно. Уменьшение амплитуды перемещений по разломам вверх по разрезу отчетливо видно на рис. 6 и отражает постепенное затухание разломов, которые уже в средней юре (сейсмический горизонт  $J_6$  и выше по разрезу) практически не распознаются. По этой причине реконструкция параметров напряженного состояния производилась только по структурным картам имеющих региональное распространение сейсмических горизонтов  $M_1$ ,  $J_{14}$ ,  $J_{15}$  и  $U_{10}$ , в пределах которых удастся определить достаточное для дальнейшей обработки число векторов перемещения (см. рис. 2-5). Всего была замерена ориентировка 70 векторов перемещений и связанных с ними разломов на сейсмическом горизонте  $M_1$ , 48 – на  $J_{15}$ , 26 – на  $J_{14}$  и 15 – на  $U_{10}$ .

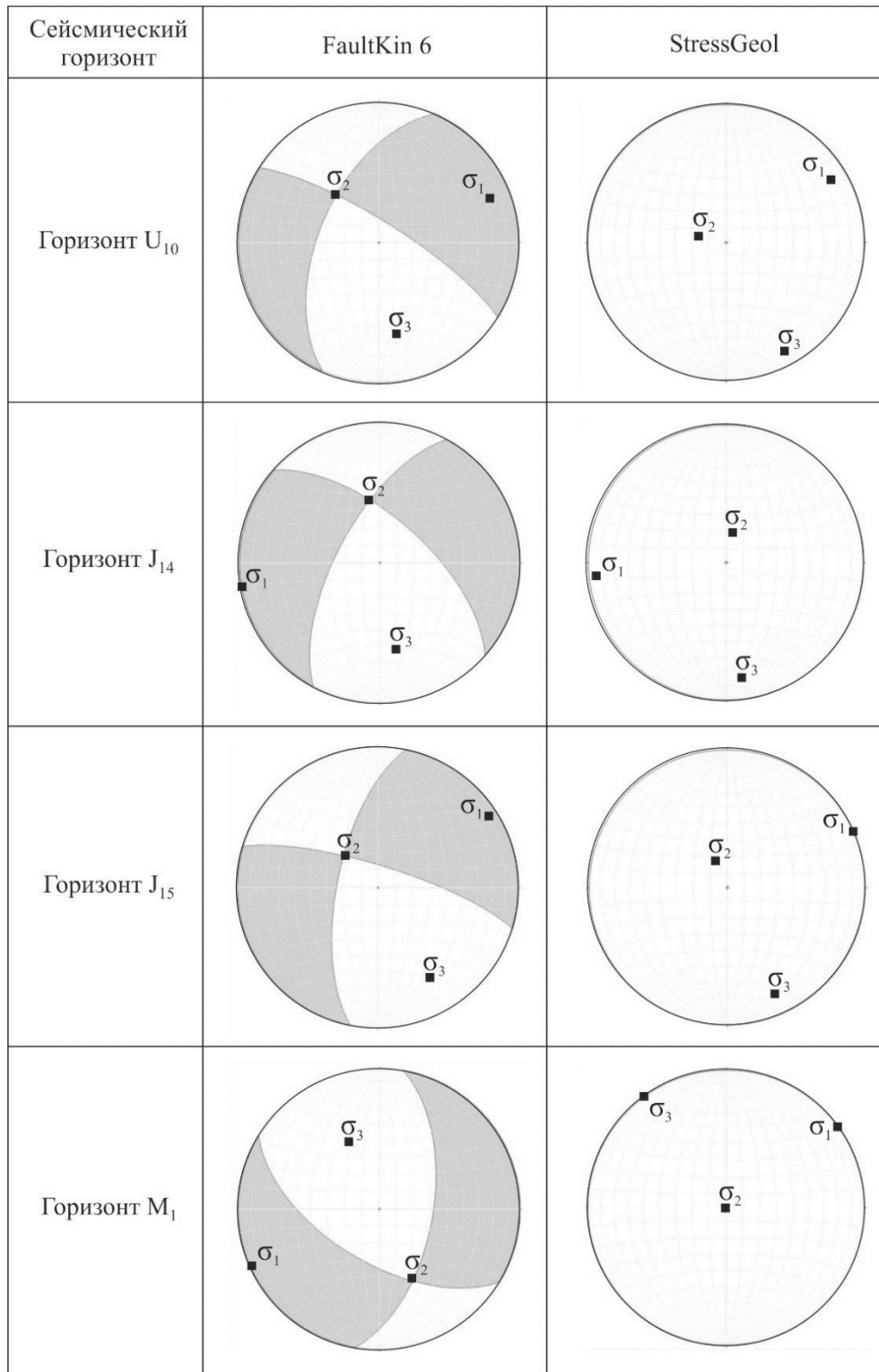
Полученные данные о локальных стресс-состояниях представлялись в виде серии сферических диаграмм, выполненных в стереографических проекциях с указанием ориентировки главных осей напряжений ( $\sigma_1$  – ось максимального девиаторного растяжения,  $\sigma_2$  – промежуточная ось и  $\sigma_3$  – ось максимального сжатия) и выделением квадрантов сжатия и растяжения. Так представляются сейсмологические данные о механизмах очагов землетрясений. Центру квадранта сжатия отвечает положению оси  $\sigma_3$ , а центру квадранта растяжения положение оси  $\sigma_1$ . Одна из нодальных плоскостей в сейсмологии отождествляется с плоскостью разрыва. В данном случае обе нодальные плоскости отвечают ориентации в пространстве плоскости действия максимального касательного напряжения.

Анализ совокупности стресс-состояний показал, что хотя получаемое поле напряжений довольно неоднородно, на поверхностях всех сейсмических горизонтов усредненные для горизонта оси главных напряжений  $\sigma_3$  и  $\sigma_1$  имеют стабильную ориентировку, причем ось девиаторного растяжения субгоризонтальна, а ось максимального сжатия наклонена под небольшим углом (рис. 8.). Согласно модели, предложенной Андерсенем, такое поле напряжений характеризует преобладание сдвиговых перемещений при наличии и сбросовой составляющей (рис. 9). Ось максимального сжатия характеризуется ССЗ-ЮЮВ простиранием, а ось девиаторного растяжения – ВСВ-ЗЮЗ простиранием. Интересно отметить, что при расчете параметров стресс-состояний в программе StressGeol относительная величина сбросовой составляющей вдоль плоскостей максимальных касательных напряжений на сферических диаграммах оказывается меньше, чем при расчете в программе FaultKin (рис. 8). На сферических диаграммах нигде не получено напряженного состояния, характерного для взбросов с крутым погружением оси девиаторного растяжения, хотя это и не исключает возможности появления единичных площадок действия максимальных касательных напряжений со взбросовой компонентой перемещений [Гзовский, 1975].

### Выводы

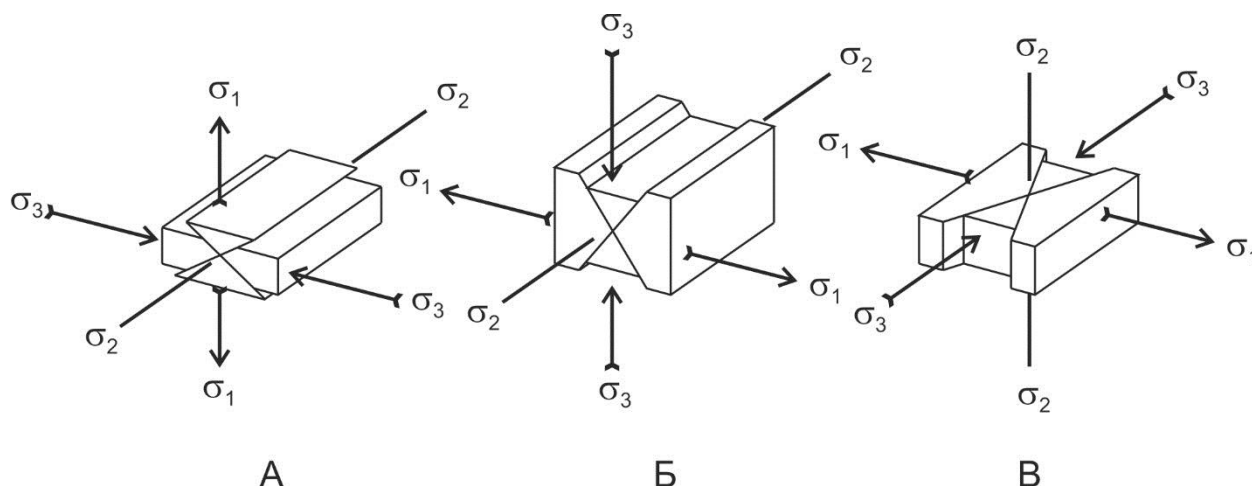
Отсутствие отчетливо выделяемых разрывных нарушений выше сейсмического горизонта  $U_{10}$  позволяет предполагать, что после его формирования поле напряжений не претерпело принципиальных изменений. Поле напряжений, фиксируемое на всех сейсмических горизонтах ( $M_1$ ,  $J_{15}$ ,  $J_{14}$  и  $U_{10}$ ), характеризуется доминирующей ролью сдвиговой обстановки, на что указывает пологая до субгоризонтальной ориентировка главных осей максимального сжатия и растяжения, имеющих стабильную ориентировку для всех сейсмических горизонтов. В то же время, наличие сбросовой компоненты для наблюдаемых разрывов свидетельствует, что сдвиговая обстановка сопровождалась растяжением, что, в целом, является благоприятным фактором для формирования открытых трещин. ССЗ-ЮЮВ ориентировка оси сжатия свидетельствует, что трещины именно этого направления должны

быть открытыми. Если учесть, что доминирующая ориентировка разломов ССВ-ЮЮЗ, то в указанном поле напряжений они все будут характеризоваться сдвиговыми перемещениями и открытые трещины будут, скорее всего, по отношению к ним оперяющимися.



**Рис. 8. Усредненные ориентировки главных осей напряжений, рассчитанных для разных сейсмических горизонтов методами FaultKin и StressGeol**

Главные оси напряжений:  $\sigma_1$  – ось девиаторного растяжения,  $\sigma_2$  – промежуточная ось и  $\sigma_3$  – ось максимального сжатия. Данные приведены на сетке Шмидта, проекция нижней полусферы.



**Рис. 9. Ориентировка разломов в зависимости от ориентировки осей главных напряжений («критерий Андерсена» по [Уемура, Мицутани, 1990], с изменениями)**

*A – надвиги (взбросы), B – сбросы, B – сдвиги. Главные оси напряжений:  $\sigma_1$  – девиаторного растяжения,  $\sigma_2$  – промежуточная,  $\sigma_3$  – максимального сжатия.*

Предложенный метод позволяет получать информацию о поле напряжений на основании изучения только поверхностей сейсмических горизонтов и является важным независимым инструментом для прогноза систем открытых трещин на закрытых от наблюдения слабо изученных территориях. Его важным достоинством является то, что он позволяет делать прогноз на весь разрез, доступный изучению сейсмическими методами, в том числе и на глубины, на которых проведение значительных объемов буровых работ оказывается невозможным.

*Приведенные в статье материалы публикуются с разрешения ООО «Газпромнефть НТЦ». Исследования были частично поддержаны проектом СПбГУ 3.39.139.2014*

### Литература

*Балакина Л.М., Введенская А.В., Голубева И.В., Мишарина Л.А., Широкова Е.И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. - М.: Наука. 1972. - 192 с.*

*Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975 – 536 с.*

*Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. - М.: Наука. 1975. - 176 с.*

*Парфенов В.Д. Анализ напряженного состояния в ангидридовых тектонитах // ДАН СССР. - 1981. - Т. 260. - № 3. - С. 695-698.*

*Парфенов В.Д. К методике тектонофизического анализа геологических структур // Геотектоника. - 1984. - № 1. - С. 60–72.*

*Ребецкий Ю.Л. Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // Доклады РАН. - 2003. – Т. 388. - № 2. - С. 237-241.*

*Ребецкий Ю.Л.* Реконструкция тектонических напряжений и сеймотектонических деформаций: методические основы, поле современных напряжений Юго-Восточной Азии и Океании // Доклады РАН. - 1997. – Т. 354. - № 1. - С. 101–104.

*Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность природных массивов. – М.: Академкнига, 2007. – 406 с.

*Уемура Т., Мицутани Ш.* Геологические структуры. – М.: Недра, 1990. – 292 с.

*Шерман С.И., Днепровский Ю.И.* Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. – Новосибирск: Наука, 1989. – 158 с.

*Allmendinger R.W., Cardozo N.C., Fisher D.* Structural geology algorithms: Vectors & Tensors. – Cambridge, Cambridge University Press, 2012. – 302 p.

*Gartrell A.P.* Potential new method for paleostress estimation by combining three-dimensional fault restoration and fault slip inversion techniques: First test on the Skua Field, Timor Sea // AAPG Hedberg Series. – 2005. – № 2. – p. 23– 36.

*Marrett R., Allmendinger R.* Kinematic analysis of fault-slip data // Journal of Structural Geology. – 1990. – v. 12 – p. 973-986.

*Morris A.P., Ferrill D.A.* The importance of the effective intermediate principal stress ( $\sigma_2$ ) to fault slip patterns // Journal of Structural Geology. – 2009. – v. 31. – p. 960-959.

*Morris A.P., McGinnis R.N., Ferrill D.A.* Fault displacement gradients on normal faults and associated deformation // AAPG Bulletin. – 2014. – v. 98. – p. 1161–1184.

**Moskalenko A.N., Khudoley A.K.**

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia, artemmn@gmail.com, a.khudoley@spbu.ru

**Zhukov V.V.**

Ltd Gazpromneft NTC, Saint-Petersburg, Russia, Zhukov.VV@gazpromneft-ntc.ru

**Demin V.Yu.**

Ltd Gazpromneft-Angara, Saint-Petersburg, Russia, Demin.VY@gazprom-neft.ru

**Verin A.V.**

Ltd Gazpromneft-Vostok, Tomsk, Russia, Verin.AV@tomsk.gazprom-neft.ru

## RECONSTRUCTION OF KINEMATIC CHARACTERISTICS OF FAULTS AND PALEOSTRESS FIELD OF THE URMAN-ARCHINSK AREA (NYUROLSK DEPRESSION)

*Paleostress field reconstruction methods based on study of structural maps of seismic horizons with the following interpretation of displacement vector on the fault surface as slickenline and slickenside is also suggested. Estimation of the main axes of the stress field was done using two softwares (FaultKin and StressGeol), which are based on different theoretical assumptions on the media properties and relationship between brittle fractures and stress field. In Mesozoic compression, the north-northwest trend axis had predominated. Shallow to moderate dipping of the main compression and extension axes points to predominance of strike-slip tectonics at that stage of the Uрман-Archinsk area evolution. During formation of the surface that separate Paleozoic carbonates and Mesozoic clastic rocks (seismic horizon  $M_1$ ) normal fault displacements were significant showing that during Mesozoic there were several stages of the fault activity.*

**Keywords:** seismic horizons, stress field, strike-slip faults, Uрман-Archinsk area.

### References

Allmendinger R.W., Cardozo N.C., Fisher D., Structural geology algorithms: Vectors & Tensors. Cambridge, Cambridge University Press, 2012, 302 p.

Balakina L.M., Vvedenskaya A.V., Golubeva I.V., Misharina L.A., Shirokova E.I. *Pole uprugikh napryazheniy Zemli i mechanism ochagov zemletryasenyi* [Elastic stress field of the Earth and mechanics of earthquakes]. Moscow, Nauka, 1972, 192 p.

Gartrell A.P. Potential new method for paleostress estimation by combining three-dimensional fault restoration and fault slip inversion techniques: First test on the Skua Field, Timor Sea. AAPG Hedberg Series, 2005, no. 2, p. 23–36.

Gzovskiy M.V. *Osnovy tektonofiziki* [Basics of tectonophysics]. Moscow, Nauka, 1975, 536 p.

Kostrov B.V. *Mekhanika ochaga tektonicheskogo zemletryaseniya* [Mechanics of the tectonic earthquakes]. Moscow, Nauka, 1975, 176 p.

Marrett R., Allmendinger R. Kinematic analysis of fault-slip data. Journal of Structural Geology. 1990. vol. 12, p. 973-986.

Morris A.P., Ferrill D.A. The importance of the effective intermediate principal stress ( $\sigma_2$ ) to fault slip patterns. Journal of Structural Geology, 2009, vol. 31, p. 960-959.

Morris A.P., McGinnis R.N., Ferrill D.A. Fault displacement gradients on normal faults and associated deformation. AAPG Bulletin, 2014, v. 98, p. 1161–1184.

Parfenov V.D. *Analiz napryazhennogo sostoyaniya v anhidridovykh tectonitakh* [Stress state analysis of the anhydrite tectonites]. DAN SSSR, 1981, vol. 260, no. 3, p. 695-698.

Parfenov V.D. *K metodike tektonofizicheskogo analiza geologicheskikh struktur* [On the method of tectonophysics analysis of geological structures]. Geotektonika, 1984, no. 1, p. 60-72.

Rebetsky Yu.L. *Razvitie metoda kataklasticheskogo analiza skolov dlya otsenki velichin tektonicheskikh napryazheniy* [Development of the method of cataclastic analysis of shear fractures for tectonic stress estimation]. Doklady RAN, 2003, vol. 388, no. 2, p. 237-241.

Rebetsky Yu.L. *Rekonstruktsiya tectonicheskikh napryazheniy i seismotektonicheskikh deformatsiy: metodicheskie osnovy, pole sovremennykh napryazheniy Yugo-Vostochnoi Azii i Okeanii* [Reconstruction of tectonic stress and seismotectonic deformation: methods, modern stress field in the South-East Asia and Oceania]. Doklady RAN, 1997, vol. 354, no. 1, p. 101-104.

Rebetsky Yu.L. *Tectonicheskie napryazheniya i prochnost prirodnykh massivov* [Tectonic Stresses and Strength of Rock Massifs]. Moscow, Akademkniga, 2007, 406 p.

Sherman S.I., Dneprovskiy Yu.I. *Polya napryazheniy zemnoi cory i geologo-strukturnye metody ikh issledovaniya* [Stress fields in the Earth's crust and structural methods of their study]. Novosibirsk, Nauka, 1989, 158 p.

Uemura T., Mitsutani Sh. *Geologicheskie struktury* [Geological structures]. Moscow, Nedra, 1990, 292 s.

© Москаленко А.Н., Худoley А.К., Жуков В.В., Демин В.Ю., Верин А.В., 2015