



РЕКОНСТРУКЦИОННЫЙ ПОДХОД К ИНТЕРПРЕТАЦИИ СДВИГОВЫХ СТРУКТУР ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Статья посвящена одному аспекту изучения сдвиговых структур по данным потенциальных геофизических полей, в частности, гравиразведки, связанному с визуальной оценкой видимых смещений разорванных осей вытянутых аномалий. Изучение особенностей структуры геофизических полей, взаимного расположения аномалий, является важной задачей, имеющей прикладное значение. Множество работ посвящено трассированию разрывных нарушений по геологическим и сейсмическим данным, но работ, описывающих особенности проявления сдвигов в потенциальных полях, достаточно мало, хотя признаки сдвиговых нарушений разнообразны, иногда неочевидны и интересны. В статье описан реконструкционный подход к изучению сдвиговых структур, оценены его возможности и преимущества, а также выявлены ограничения этого подхода, которые могут повлиять на достоверность получаемых выводов. В работе рассмотрены как синтезированные данные, так и реальные гравиметрические данные по фрагменту листа N-39 (Казань, Самара). В зоне сочленения Пугачевского свода и Бузулукской впадины предположительно выделен сдвиг протяженностью более 300 км СВ простирания. Предложенный подход представляется перспективным и позволяет предположить действие сдвиговой тектоники в исследуемом регионе в геологическом прошлом и попытаться восстановить целостную картину строения территории на ранних этапах её формирования.

Ключевые слова: потенциальные поля, сдвиг, гравиразведка, интерпретация, реконструкция, геофизика.



Сенчина Н.П.
канд. геол.-минерал. наук
СПГУ, доцент кафедры
геофизики
n_senchina@inbox.ru



Асосков А.Е.
ФГБУ «ВСЕГЕИ»
геофизик
arta221@mail.ru

Тектонические нарушения сдвиговой кинематики являются интереснейшими геологическими объектами, изучение которых имеет практическую и фундаментальную значимость. Сдвиги определяются как разрывные нарушения, при которых крылья смещены горизонтально в противоположные стороны относительно друг друга. Сдвиги проявляются в нескольких ярких признаках, например, в формировании структур, в зарубежной литературе называемых структурами цветка (flower-like), а на периферии сдвига – структурами конский хвост (horse tail). В плане такие структуры проявляются, в наиболее простом варианте, как дуплексы – пары

сигмовидных разломов, образующих либо горст, либо грабен, для них приняты специфические названия – «pop-up» и «pull-apart». С приведенными системами разломов связаны открытия и разработка крупных месторождений полезных ископаемых – как рудных, так и нефтегазовых, что объясняется отчасти формированием ловушек и пространства для рудоотложения, а отчасти наличием глубинной флюидопроницаемой зоны. Разломы – сбросы, взбросы, сдвиги и другие, могут формировать рудоконтролирующие зоны, ограничивать фрагменты пластов с гидродинамической связью, разрывать и смещать перспективные зоны относительно друг друга. Поэтому изучение разрывных нарушений различных типов, в том числе сдвигов, и их особенностей чрезвычайно важно при интерпретации геолого-геофизических данных в ходе решения геологоразведочных задач.

В мировом опыте известно много примеров изучения региональных сдвиговых структур, а также локальных деформированных участков в зонах влияния сдвиговых зон. Крупные региональные трансформные границы изучаются уже на протяжении многих лет, к ним можно отнести систему разломов Денали на Аляске, продольный разлом Медиана в Японии, зона разломов Филиппин, Великая Суматранская зона разломов на о. Суматра, Альпийский разлом в Новой Зеландии, разлом Атакама в Чили, Таласо-Ферганский разлом в Киргизско-Казахстанском регионе, крупнейший трансформный разлом Сан-Андреас в Америке. В России известными являются такие региональные сдвиговые зоны, как Байкало-Становая [1, 2], Охотско-Чукотская [5]; в недавнее время также был выделен региональный сдвиг, секущий Западно-Сибирскую геосинеклизу [9].

Нужно отметить, что изучение таких структур, являющихся признаками сдвиговой тектоники в регионе, в мировом опыте получило широкое применение; с таковыми связаны многочисленные открытия месторождений полезных ископаемых. В частности, к месторождениям, связанным со структурой «pull-apart» можно отнести: скарноидное шеелитовое месторождение Фельберталь (Австрия), стратиформное вольфраммолибденовое месторождение Тырнауэз (Кавказ), стратиформное пирротин-касситеритовое месторождение Кливленд (Западная Тасмания) и другие. В нашей стране с проявлением сдвиговых разломов связывают золоторудные зоны [11], области наличия месторождений полиметаллических руд [6], группы нефтегазовых месторождений [4, 9].

Трассированию разрывных нарушений по данным геологических и геофизических исследований посвящено множество работ, большая

часть которых позволяет однозначно подтвердить наличие таких типов разломов на разных стадиях формирования [7, 10]. Однако, достаточно мало работ посвящено однозначному определению расположения и параметров сдвига по данным потенциальных полей [6]. Соответственно, представляет интерес рассмотрение и анализ моделей сдвигов, где наличие такой структуры достоверно известно (задано при формировании модели).

Мощные, амплитудные смещения пород вдоль магистрального разлома сдвига являются наиболее очевидным признаком, но, как ни странно, иногда сложнее картируются. В том числе, затруднительно может быть их трассировать по геофизическим данным – так как сложное поле аномалий зачастую затруднительно увязать с таким проявлением тектонических процессов. В настоящей работе предпринята попытка найти подход к картированию наиболее очевидных признаков сдвигов – амплитудных смещений – путем визуального их выделения и реконструкции, с целью в дальнейшем автоматизировать процесс выявления и восстановления таких структур.

Рассмотрим пример компьютерной симуляции формирования аномального поля (предполагаются гравитационное либо магнитное поле). Поэтапно процесс формирования структур, определяющих поле, показан на **рисунке 1а-1д**.

Ниже рассмотрен пример динамической модели, имитирующей формирование систем деформаций, в том числе, сдвиговых.

а. Рассмотрим область наличия меридиональной границы горных пород различных свойств (**рис. а** – штриховая линия). Через границу таких пород закладывается сдвиговое нарушение (сплошная линия с отметкой направлений движения блоков) широтного простирания.

б. Развился сдвиг – смещение одних блоков горных пород относительно других в горизонтальном направлении по разлому. На карте (**рис. 1, б**) «верхнее» (северное) крыло сдвига смещено влево, соответственно сдвиг является левосторонним. При этом граница пород (штриховая линия) разорвалась и сместилась в соответствии с амплитудой сдвига.

в. На территории, испытавшей воздействие сдвига, заложилась система субпараллельных даек, ориентированных по азимуту СЗ 245 градусов (**рис. 1, в**). Будем предполагать, что дайки имеют повышенные эффективные свойства и будут проявляться в синтезированном поле как положительная аномалия.

г. Через сформированную систему заложено два левосторонних сдвига, направленных по азимуту 65 градусов (**рис. 1, г**).

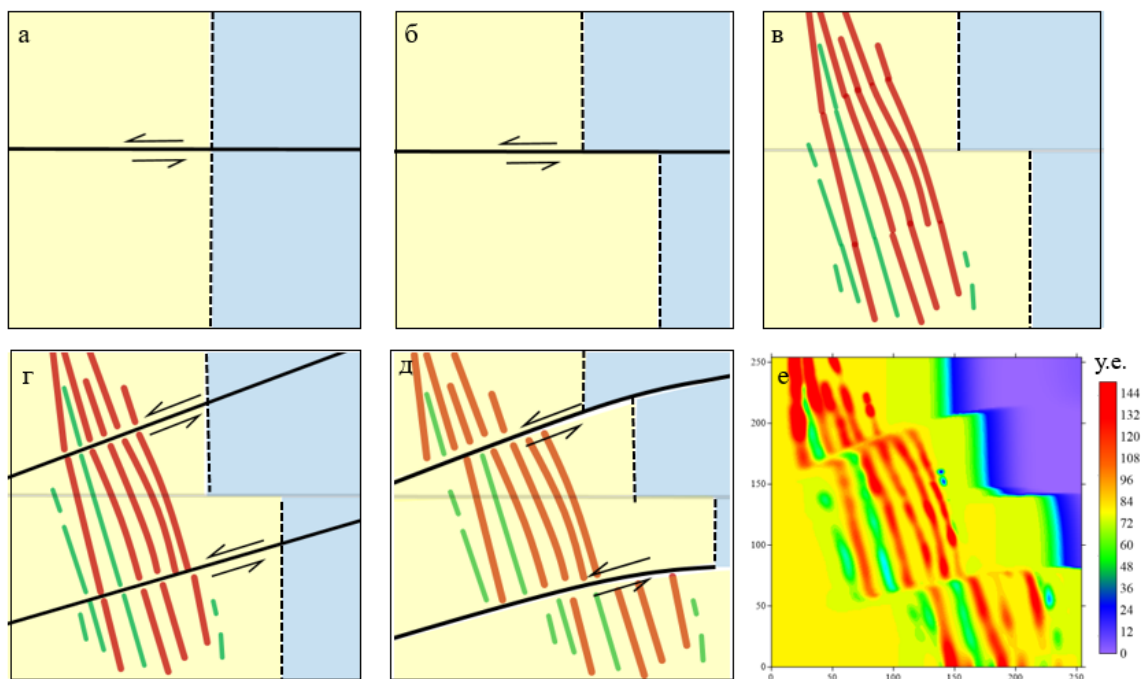


Рис. 1. Этапы развития синтетической модели – имитация формирования разрывных нарушений: а – заложение сдвига вкрест простирания границы геологических структур, б – развитие сдвига, в – заложение системы субпараллельных даек, г – заложение секущих дайки сдвигов, д – развитие секущих дайки сдвигов, е – модельное поле, имитирующее отклик в гравитационном поле от геологических разностей отличающейся плотности.

д. Сдвиги развились со значимым смещением в осях даек (**рис. 1, д**) – получена итоговая схема строения территории.

е. Если изображенным моделям геологических тел присвоить некоторые свойства, можно решить прямую задачу, и получить поле, подобное **рис. 1е**. Покажем результирующее модельное поле в условных единицах.

Анализ трансформаций для указанного примера не дает возможности более ярко выделить сдвиг по признаку «смещение осей аномалий», чем это проявляется в исходном поле, что делает их для решения такой задачи малополезными [3]. Теперь можно опробовать реконструкционный подход. Предлагается выполнять смещение блоков по предположительным направлениям магистральных разломов сдвигов. Подтверждением целесообразности подхода будет восстановление контуров разорванных аномалий. Результатом является установление амплитуд смещения, выделения зоны влияния разлома, объединение разбитых сдвигом структур с возможностью более целостного их геологического восприятия.

На **рисунке 2** показаны исходное и реконструированное поля. При этом стало возможным проследить практически непрерывно оси аномалий от смоделированных даек. Как подтверждение достоверности результата, частично «спрямилась» меридиональная граница, задан-

ная на рисунках **1а-1б**. Практическая польза от решения подобной задачи очевидна, если для одного тела (например, погребенной дайки) установлена рудоносность, проследить простирание этого тела после разрывного нарушения можно с помощью такого подхода. Кроме того, представляет интерес собственно изучение тектонических процессов, происходивших в прошлом.

Анализ полученного поля (**рис. 3**) говорит о том, что одно из смещений – первичное, описанное на этапе 1б, не восстановилось и сделать это затруднительно из-за наличия последующих после этого сдвига смещений, существенно повлиявших на формирование аномалий. Эта зона показана на **рисунке 3** штриховой черной линией. Кроме того, из-за того, что сдвиговые деформации затрагивают широкую полосу из-за наличия опережающих дислокаций, некоторой нелинейности сдвига, а также из-за размытости аномалий по отношению к границам аномалеобразующих тел, непосредственно вблизи магистрального разлома наблюдается плохая корреляция аномалий. Эти особенности необходимо учитывать при интерпретации подобных структур в реальных условиях. Некоторую неоднозначность составляет ограниченность имеющихся данных по площади – не ясно, прослеживается ли такое нарушение за пределами полигона, однако эта проблема разрешается при наличии более полных исходных данных.

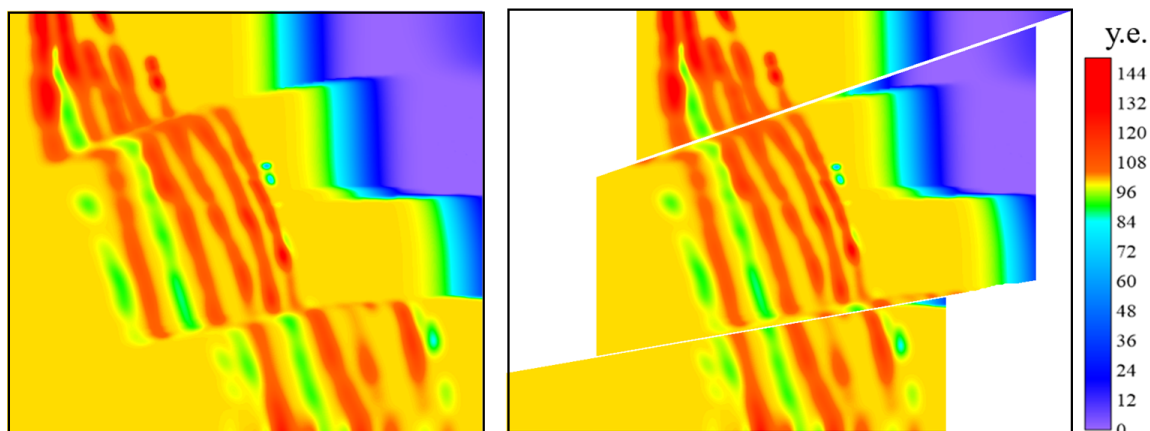


Рис. 2. Демонстрация реконструкционного подхода. Слева – исходное поле, справа –реконструированное.

Зоны прямого влияния разломов

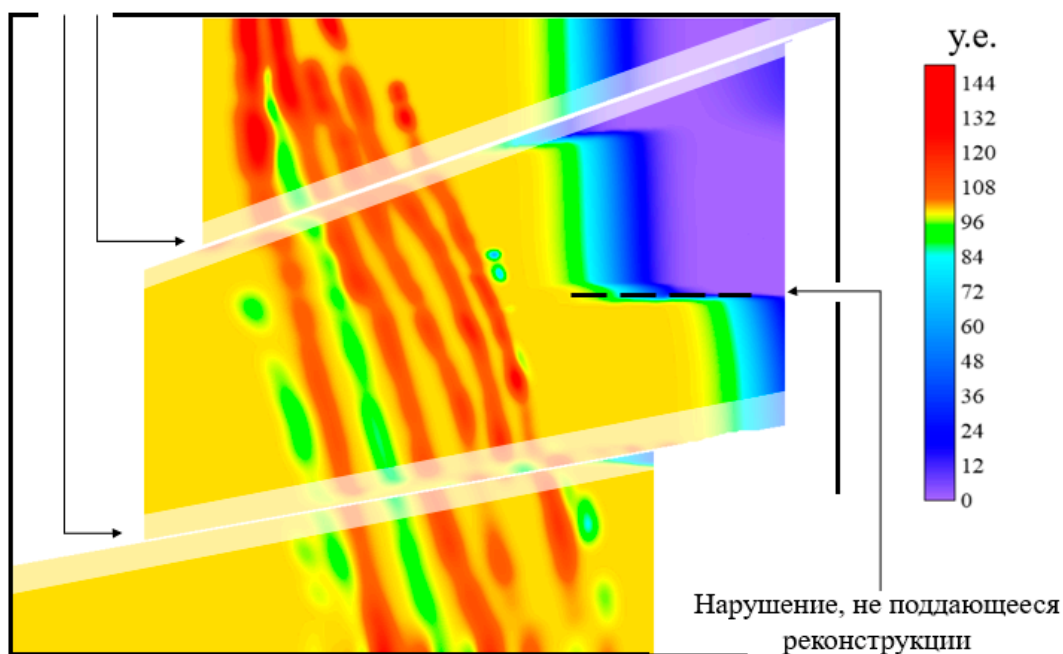


Рис. 3. Анализ результата реконструкционного подхода для синтетической модели.

Рассмотрим пример реальных данных, где можно предположить наличие подобной структуры. В качестве такого примера выбрана южная часть территории листа N-39. Площадь расположена в центральной части Русской платформы, в пределах Волго-Уральской мегазоны, сочленения Бузулуксукой впадины, Пугачёвского свода, Орляноско-Ивановского выступа и Серновско-Абдулинского авлакогена (рис. 4а). Фундамент образован складчато-метаморфическими породами архейского, ранне-, среднепротерозойского возрастов и разделен разломами на крупные и мелкие блоки. Согласно ряду представлений о тектонике платформенных областей, утвердилось мнение, что фундамент земной коры

тектонически здесь расслоен и характеризуется чешуйчато-надвиговым строением. Приподнятые блоки фундамента стали ядрами, над которыми в последующем образовались своды, над опущенными элементами фундамента формировались прогибы и впадины.

В геологическом строении территории участвуют архейские и нижнепротерозойские, метаморфические и магматические образования кристаллического фундамента, палеозойские (девонские, каменноугольные, пермские) и кайнозойские (неогеновые и почти повсеместно распространенные четвертичные) отложения осадочного чехла. Мощность чехла возрастает в западном и северо-западном направлениях

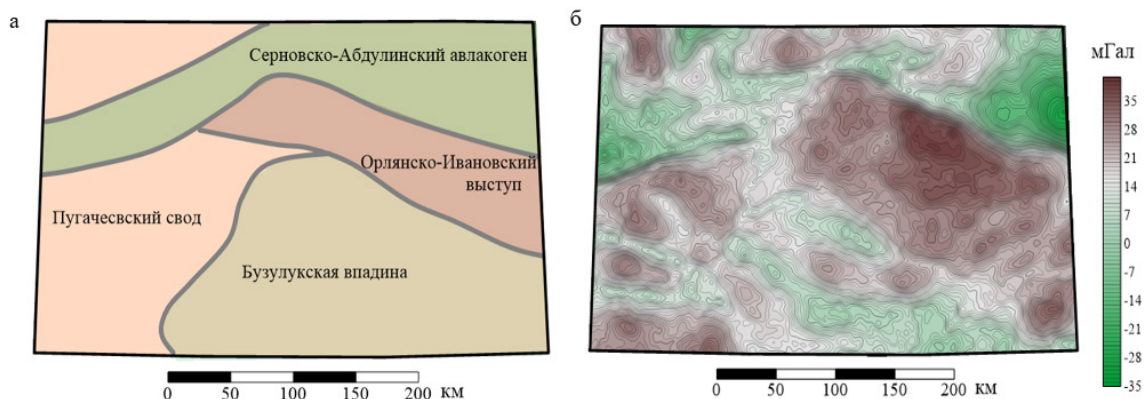


Рис. 4. Схема тектонического строения участка (а) и аномального гравитационного поля в редукции Буге (б).

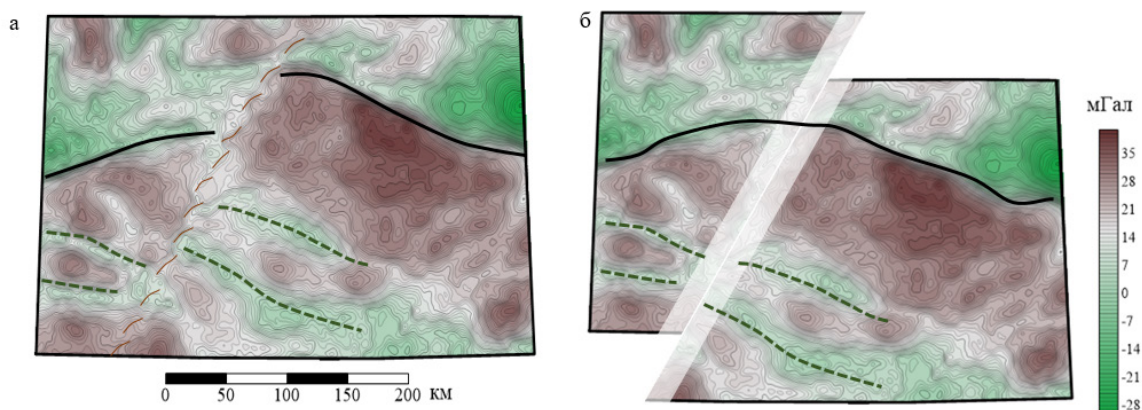


Рис. 5. Схема интерпретации исходного гравитационного поля с указанием предполагаемых смещенных границ и элементов сдвигового нарушения (а); и то же для гравитационного поля после «реконструкции» (б).

примерно от 1600 м на своде до 2100 м в прогибе. Отложения верхней перми и кайнозоя участками обнажены [8].

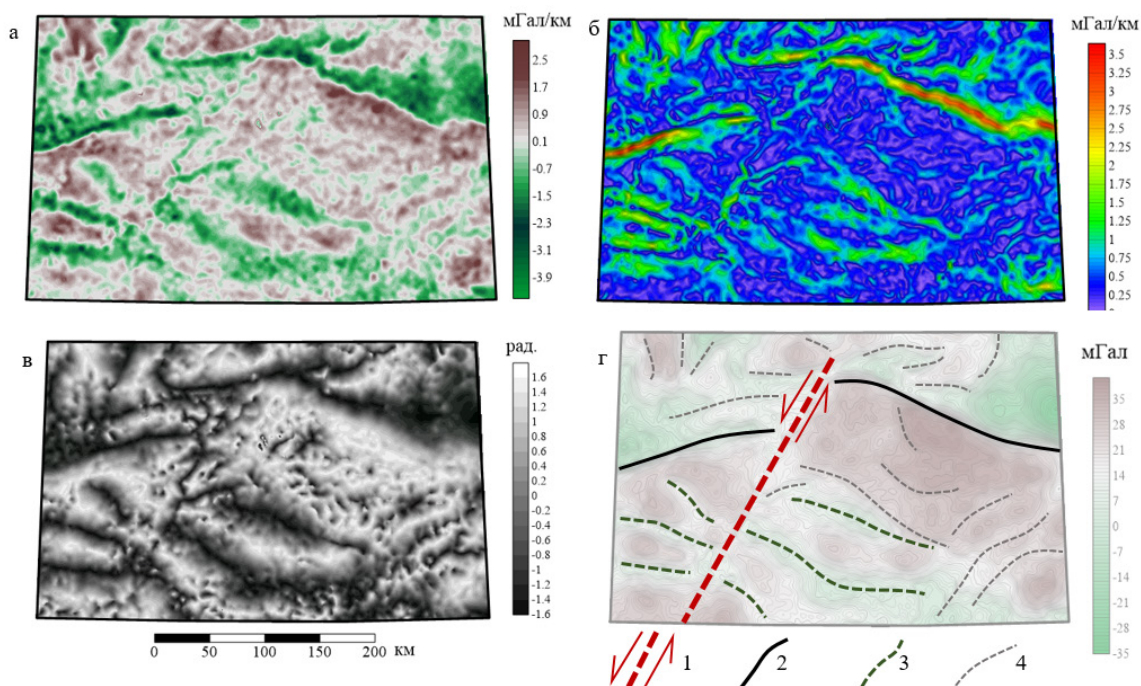
Гравитационное поле, в целом, соответствует изменчивости поверхности фундамента, выступы и своды отличаются повышенными значениями гравитационного поля, прогибы, впадины, авлакогены – понижениями. Общий перепад значений поля составляет от -35 до +40 мГал (рис. 4б).

В аномальном поле можно выделить ряд границ и линейных аномалий, по которым можно предположить наличие разрывного нарушения. Судя по связи структур поля с геометрией фундамента, разрывное нарушение должно быть заложено на большой глубине – преимущественно ниже осадочного чехла, в фундаменте. При этом вдоль магистрального разлома предполагаемого сдвигового нарушения протягивается цепочка малоамплитудных нарушений (рис. 5а). Применение реконструкционного подхода со смещением блоков относительно друг друга позволяет сопоставить оси синфазности аномалий, или,

иначе выражаясь, скоррелировать их по разные стороны разрывного нарушения. Положительным фактором в оценке достоверности такого подхода можно считать то, что сопоставить можно несколько границ, показанных на рис. 5б черной сплошной линией и зеленой штриховой.

Наличие разрывного нарушения, протягивающегося по предполагаемой линии (рис. 5а, 5б и рис. 6г), подтверждается расчетом трансформаций гравитационного поля - вертикальной производной (рис. 6а), модуль горизонтального градиента (рис. 6б), (угол наклона градиента (tilt derivative – TDR) (рис. 6в). Указанные трансформации не противоречат представлениям о классических проявлениях сдвиговой тектоники в трансформациях потенциальных полей.

На рисунке 6а чётко прослеживаются зоны смены знака вертикальной производной поля силы тяжести, которые складываются в аномалии линейного характера преимущественно субширотного простирания и маркируют блоки различного геологического строения. Также на рисунке выделяется цепочка максимумов и


Рис. 6.

Вспомогательные трансформации поля: вертикальная производная (а), модуль горизонтального градиента (б), (угол наклона градиента (TDR) (в), и схема интерпретации (г), где 1 – сдвиговое нарушение с указанием его кинематики, 2 – граница, вероятно испытывавшая смещение по сдвигу, 3 – оси аномалий, вероятно испытывавшие смещение по сдвигу, 4 – вспомогательные оси синфазности аномалий.

минимумов различной интенсивности, которая линейно простирается в северо-восточном направлении и рассекает линейные аномалии, что подчёркивает зону предполагаемого разрывного нарушения.

На карте модуля горизонтального градиента (рис. 6б) чётко и контрастно прослеживаются положительные аномалии субширотного простирания и картируют границы блоков, а вот зона предполагаемого разрывного нарушения характеризуется кусочно-прерывистыми аномалиями средней интенсивности, вытягивающимися в северо-восточном направлении.

В поле угла наклона градиента (TDR) (рис. 6в) интересующая нас зона предполагаемого разрывного нарушения отличается вдоль указанной линии (рис. 5а, 5б, 6г) собственным характером поля (связанные раздробленные участки, складывающиеся в линейный объект), отличным от структуры поля угла наклона градиента (TDR) в прилегающих зонах.

На рисунке 6г изображена схема интерпретации аномального поля силы тяжести в редукции Буге, с учётом выполненной реконструкции. Отмечено разрывное нарушение сдвигового характера с грубо оцененной кинематикой (левосторонний сдвиг амплитудой около 50 км), отмечены оси аномалий, которые испытали смещение по сдвигу. Благодаря реконструкции

онному подходу можно выделить синфазные оси аномалий по разные стороны разрывного нарушения, тем самым подтверждая наличие сдвиговой тектоники. Оценка возраста предполагаемого сдвига затруднительна и, предположительно, соответствует времени завершения формирования фундамента и начала периода осадконакопления, но должна уточняться с учетом результатов иных исследований.

Отдельным вопросом является оценка влияния указанного сдвига на формирование осадочных бассейнов и нефтегазоносность региона. По предположению авторов, такое влияние есть, как на мелкие и средние месторождения нефти и газа рассматриваемого полигона, так и, возможно, на уникальное Ромашкинское, расположенное на северо-восточном продолжении магистрали сдвига. Рассмотрим схему расположения нефтегазовых месторождений в пределах полигона исследования (рис. 7) – здесь известны Мухановское, Покровское, Ольховское, Кулешовское месторождения и др. Видно, что простирание групп месторождений коррелирует с простиранием осей аномалий трансформант гравитационного поля, что связано вероятно с общей причиной – глубинной (на уровне нижних горизонтов осадочного чехла и поверхности фундамента) геологической структурой территории. Сказать что-то большее о связи месторождений

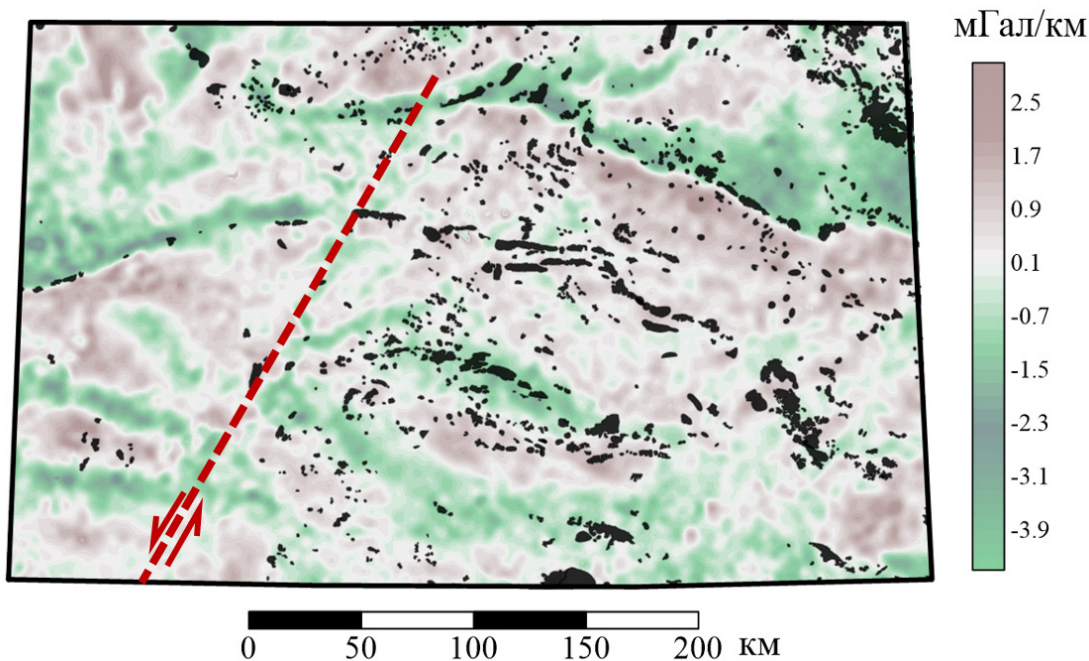


Рис. 7.
Схема расположения месторождений углеводородов на фоне вертикальной производной гравитационного поля в редукции Буге.

между собой с учетом сдвига на данном этапе не представляется возможным по причине недостатка данных об отдельных месторождениях в пределах полигона. Возможно, этот вопрос заинтересует специалистов в области поисков месторождений нефти и газа и сейсмиков-интерпретаторов, которые могли бы на локальном уровне увидеть проявления сдвиговых деформаций и подтвердить либо опровергнуть выдвинутую гипотезу.

Выполнение подобных реконструкций предполагает ряд допущений – например, небольшая роль более молодых геологических процессов в формировании аномалий полей после реализации смещения. Так, осадконакопление слабо влияет на аномальное поле, чаще лишь несколько сглаживает его, что позволяет выделять сдвиговые нарушения фундамента под осадочным чехлом. Визуально относительно легко определяются прямолинейные нарушения. Предполагается, что роль оперяющих разломов меньше роли основного сместителя. Чтобы выделить таким образом сдвиговое нарушение, необходимо, что-

бы оно было относительно протяженным – пересекало несколько аномалеобразующих структур. Желательно, чтобы ширина измененной вторичными процессами в зоне главного разлома нарушений была существенно меньше протяженности сдвига в его видимом проявлении.

Основными положительными чертами реконструкционного подхода является: подтверждение наличия и установление особенностей сдвиговой тектоники в изучаемом районе с возможностью оценки её кинематических параметров; восстановление целостной картины строения региона на ранних этапах его формирования; разделение геологических процессов, протекавших в зоне сдвига, по относительно времени на более ранние и более поздние. Предположение присутствия сдвиговой тектоники в регионе даёт интерпретатору возможность рассматривать картину аномалий потенциальных полей и их трансформант с относительно нового ракурса и выдвигать гипотезы формирования территории, способные при подтверждении помочь решить прогнозно-поисковые задачи. ^(XXI)

Литература

1. Агеев А.С., Егоров А.С. Основные черты глубинной морфологии Байкало-Становой тектонической зоны по результатам интерпретации геолого-геофизических материалов // Региональная геология и металлогения. – 2018. – № 73. – С. 19-23.
2. Агеев А.С., Егоров А.С. Морфология сдвиговых дислокаций неоген-антропогенного возраста Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны // Естественные и технические науки. – 2017. – № 4(106). – С. 47-51.
3. Асосков А.Е., Сенчина Н.П. Интерпретация геофизических данных в присутствии сдвиговых деформаций (на примере синтетической модели) // Интерактивная наука. – 2022. – № 10(75). – С. 8-11. – DOI: 10.21661/r-557897.
4. Гончаров М.А., Фролова Н.С. Парадокс ориентировки некоторых новейших нефтегазоносных брахиантиклиналей сдвиговых зон вдоль оси максимального сжатия: тектонофизическое истолкование // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы XI Тектонического совещания, М.: ГЕОС, том 1. – С. 218-222.
5. Егоров А.С., Большакова Н.В., Калинин Д.Ф., Агеев А.С. Глубинное строение, тектоника и геодинамика Охотоморского региона и структура его складчатого обрамления // Записки Горного института. – 2022. – 257. – С. 703-719. – DOI: 10.31897/PMI.2022.63
6. Макеев С. М. Два примера деформационно-сдвигового анализа геофизических полей // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: Сборник научных трудов. Том Выпуск 2 (7). – Пермь. – 2019. – С. 176-181.
7. Мушин И.А., Корольков Ю.С., Чернов А.А. Выявление и картирование дизъюнктивных дислокаций методами разведочной геофизики. М.: Научный мир, 2001, 120 с.
8. Объяснительная записка к карте тектонического районирования России. Масштаб 1:5000000. Краткая объяснительная записка. М., 2000, редактор: Морозов А.Ф.
9. Тимурзиев А.И., Гогоненков Г.Н. Новейшая сдвиговая тектоника осадочных бассейнов: от нефтегазогеологического районирования недр до технологии поисков и разведки глубокозалегающих месторождений углеводородов // Вести газовой науки. – 2012. – №1 (9).
10. Уткин В.П. Сдвиговые дислокации и методика их изучения. М.: Наука, 1980, 144 с.
11. Читалин А.Ф., Агапитов Д.Д., Штенгелов А.Р., Николаев Ю.Н., Бакшеев И.А. Оценка минерагенического потенциала Чукотки и перспективы выявления новых площадей для поисков месторождений золота и серебра — рекомендации для Majors и Juniors // Золото и технологии. – 2017. – №2(36). – С.158-165.

UDC: 550.83

N.P. Senchina, Ph.D., Docent Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, Associate Professor of the Department of Geophysics, n_senchina@inbox.ru

A.E. Asoskov, A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, geophysicist, arto221@mail.ru

RECONSTRUCTION APPROACH TO THE INTERPRETATION OF STRIKE-SLIP STRUCTURES FROM GEOPHYSICAL DATA

Abstract: The article is dedicated to one aspect of studying displacement structures based on potential geophysical fields data, in particular, gravity exploration, related to the visual assessment of apparent displacements of fractured axes of elongated anomalies. Exploring the characteristics of the structure of geophysical fields, the mutual arrangement of anomalies, is an important task with practical significance. Many works are devoted to tracing discontinuous disturbances using geological and seismic data, but there are relatively few studies describing the features of displacements in potential fields, even though the signs of displacement-related disturbances are diverse, sometimes non-obvious, and intriguing. The article describes a reconstructive approach to studying displacement structures, evaluates its capabilities and strengths, as well as identifies limitations of this approach that may impact the reliability of the obtained conclusions. The study considers both synthesized data and real gravimetric data for a fragment of sheet N-39 (Kazan, Samara). In the area of the junction between the Pugachev Uplift and the Buzuluk Depression, a presumed displacement with a length of over 300 km in the northeast direction has been identified. The proposed approach appears promising and allows for speculating about the action of displacement tectonics in the investigated region in the geological past, attempting to reconstruct a comprehensive picture of the territory's structure during its early stages of formation.

Keywords: potential fields, strike-slip, gravity survey, interpretation, reconstruction, geophysics.