



## Гравитационные и магнитные аномалии, порождаемые сдвиговыми структурами в верхней части земной коры

Н. П. Сенчина<sup>1</sup>, А. Е. Асосков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург; *Senchina\_NP@pers.spmi.ru, arto221@mail.ru*

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ), Санкт-Петербург

В работе рассмотрена задача компьютерного моделирования геофизических аномалий от структур, полученных путем аналогового физического моделирования сдвиговых деформаций. На основе результатов физического моделирования сдвигов (выполненного другими авторами) построена обобщенная петрофизическая модель, а затем решены прямые задачи гравитационной и магниторазведки. Представлены особенности результирующих полей, которые могут помочь в интерпретации геофизических данных над структурами, где развиты сдвиговые нарушения, — это цепочки разнознаковых, вытянутых вдоль генерального разлома аномалий. Подтверждена применимость результатов экспериментальной геотектоники для цифрового моделирования геофизических аномалий и опробован соответствующий методический подход.

**Ключевые слова:** геофизика, тектоника, сдвиг, гравитационная разведка, магнитная разведка, моделирование.

## Gravitational and magnetic anomalies generated by strike-slip structures in the upper part of the earth's crust

N. P. Senchina<sup>1</sup>, A. E. Asoskov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg Mining University, Saint Petersburg,

<sup>2</sup>A. P. Karpinsky All-Russian Research Geological Institute (VSEGEI), St. Petersburg

The paper considers the geophysical anomalies computer modeling from the structures obtained by analog physical modeling of shear deformations. Based on the results of physical modeling of slip-strikes (performed by other authors), a generalized petrophysical model was built, and then direct tasks of gravity and magnetic surveys were solved. The features of the resulting fields are presented, which can help in the interpretation of geophysical data over structures where shear faults are developed — these are chains of anomalies of different signs extended along the general fault. The applicability of experimental geotectonics results for digital modeling of geophysical anomalies is confirmed and the corresponding methodological approach is tested.

**Keywords:** geophysics, tectonics, shear, gravity survey, magnetic survey, modeling.

### Введение

Сдвиговые нарушения активно изучаются в России и за рубежом в связи с решением множества прикладных задач. Так, сдвиги интересны при поисках и разведке месторождений углеводородов (Тимурзиев, 2013; Данилова, 2020), так как формируют, кроме прочего, бассейны «пулл-апарт» (pull-apart) — как правило, ромбовидные впадины размерами от малых ложбин до сотен километров. Строение рудных тел месторождений благородных металлов часто контролируется сдвигами (Данилова, 2020; Имаева и др., 2021b), так как возникающие сколы, трещины формируют пустотное пространство для рудоотложения в хорошо проницаемой флюидами зоне. Кроме того, сдвиги несомненно интересны с позиций общей геологии — при уточнении строения и эволюции территорий. При этом развитие сдвигов приводит к формированию и других разнообразных структур, хребтов «поп-ап» (pop-up), кулисных складок, структур типа «конский хвост» и других. Структуры отличаются в зависимости от развитости

сдвига, особенностей состава нарушенных и перекрывающих пород. Такое разнообразие усложняет интерпретацию при использовании как геофизических, так и геологических методов (Имаева и др., 2021a; Koukouvelas, Aydin, 2002). Тем не менее имеется успешный опыт выделения сдвиговых нарушений, в том числе по потенциальным полям.

### Метод построения стартовой модели

На аномалии гравитационного и магнитного полей кроме структур, вызванных сдвиговым нарушением, влияет вещественный состав пород, причем его влияние может быть более значительным и очень разнообразным. В текущей задаче рассмотрим (для выделения чистого эффекта сдвига) развитие такого нарушения в породах постоянного состава и, соответственно, плотностных и магнитных свойств. Но и при этом вариантов сдвигов очень много, остановимся на обобщенной модели, опубликованной в 1985 году

**Для цитирования:** Сенчина Н. П., Асосков А. Е. Гравитационные и магнитные аномалии, порождаемые сдвиговыми структурами в верхней части земной коры // Вестник геонаук. 2023. 2(338). С. 3–9. DOI: 10.19110/geov.2023.2.1

**For citation:** Senchina N. P., Asoskov A. E. Gravitational and magnetic anomalies generated by strike-slip structures in the upper part of the earth's crust. Vestnik of Geosciences, 2023, 2(338), pp. 3–9, doi: 10.19110/geov.2023.2.1

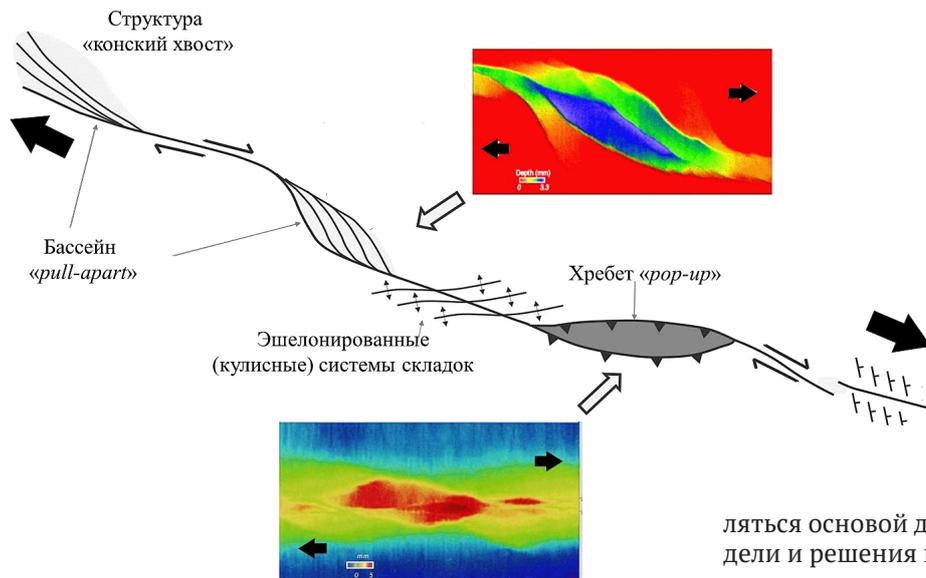


Рис. 1. Обобщенный вид модели и структуры-прототипы (по Christie-Blick и Biddle, 1985; Schellart et al., 2003; Mussofan, 2019)

Fig. 1. A generalized view of the model and prototype structure (according to Christie-Blick and Biddle, 1985; Schellart et al., 2003; Mussofan, 2019)

(Christie-Blick, Biddle, 1985) с некоторыми дополнениями; вид модели в плане представлен на рисунке 1. Типичные формы структур, образующихся при сдвигах, изучены многократно с помощью физического моделирования. На текущем этапе не будем учитывать изменение физических свойств в зоне развития сдвига. Используем примеры результатов лабораторного тектонофизического моделирования для построения петрофизической модели как источника количественных характеристик амплитуды структуры, длины и ширины. Модель бассейна «пулл-апарт» зададим исходя из работы Mussofan (2019). За основу модели хребта «поп-ап» выберем работу Schellart, Nieuwland (2003). Данные работы описывают сдвиг примерно в равных масштабах, со схожими смещениями и материалами. Идеально было бы использовать физическую модель, в которой сформированы все интересные элементы сдвига, однако этому посвятим следующий этап исследования.

Полученная при физическом моделировании «структурная карта» поверхности использована как основа для задания границы раздела для формирования трехмерной плотностной и магнитной моделей. Эта поверхность подвергнута воздействию сдвигового нарушения, в ней проявлены структура и глубина бассейна, форма и высота хребта, но в масштабе физической модели; для расчетной цифровой модели указанные параметры пропорционально увеличены. Общая протяженность сдвига по цифровой модели составляет 25 км. На рисунке 2 показана сформированная «структурная поверхность» в трехмерном виде. Данная поверхность будет яв-

ляться основой для построения петрофизической модели и решения прямой задачи грави- и магниторазведки.

### Петрофизическая модель и методика компьютерного моделирования

При развитии сдвигового нарушения вероятен случай, когда сдвиг закладывается в породах фундамента, формируется в древних осадочных породах и перекрыт молодыми, относительно менее плотными осадочными отложениями. Смоделируем это, предполагая, что уровень съемки находится на 300 метров выше измененной поверхности. Рассмотрим модель со свойствами:

- перекрывающих отложений: плотность 2400 кг/м<sup>3</sup>, магнитная восприимчивость 0.001 ед. СИ;
  - пород, в которых развит сдвиг: плотность 2670 кг/м<sup>3</sup>, магнитная восприимчивость 0.021 ед. СИ.
- Для магнитного поля были заданы склонение (0°), наклонение (75°) вектора намагничивающего поля, модуль вектора магнитной индукции — 51000 нТл; индуктивная намагниченность.

Решение прямой задачи грави- и магниторазведки выполнено в программном обеспечении Oasis Montaj (GM-SYS 3D). Моделирование предполагает создание

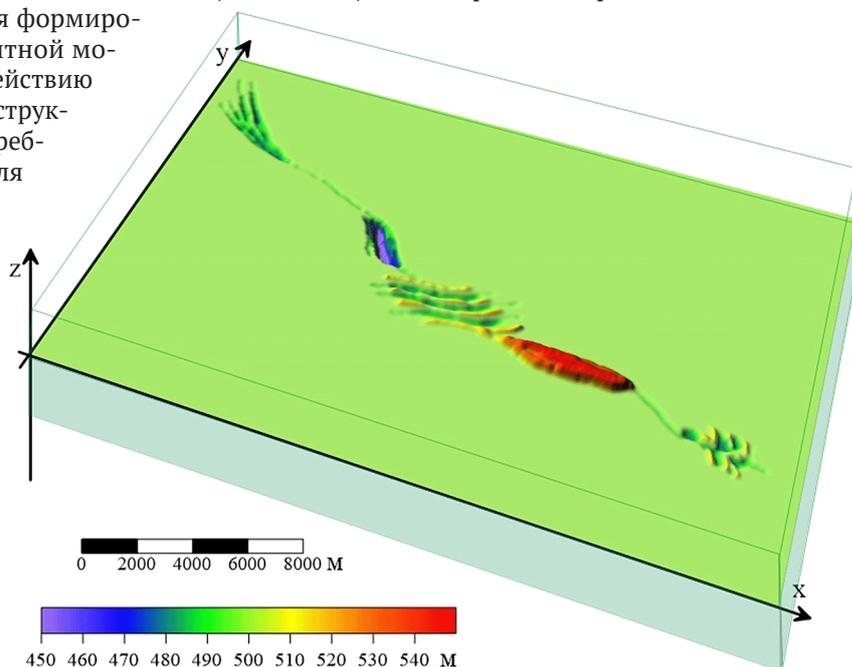


Рис. 2. Модель основной структурной поверхности, вид в объеме

Fig. 2. Primary structural surface model, 3D view



гипотетической геологической модели и решение прямой задачи с оценкой параметров физических полей. Для данных гравиметрии расчетным параметром является вертикальная составляющая напряженности гравитационного поля (ускорения свободного падения) в миллигалах, а для магнитного — приращение модуля вектора магнитной индукции ( $\Delta T$ ) в нанотеслах. Решение основано на быстром преобразовании Фурье и реализуется в короткие сроки даже для больших трехмерных моделей.

### Результаты и обсуждение

В результате получены аномалии, показанные на рисунках 3 и 4. Положительные аномалии модельного гравитационного поля локализованы над хребтом,

отрицательные — над прогибами. Аномалии магнитного поля имеют немного более сложную конфигурацию ввиду биполярности аномалий аномалеобразующих тел. Биполярность магнитных аномалий предполагает двухполюсность источника и возможность получения в различных условиях положительной, отрицательной либо расположенных рядом положительной и отрицательной аномалий для одного и того же объекта. По результатам моделирования видно, что при заданных параметрах намагничивающего поля отрицательный полюс располагается севернее для возвышенностей в рельефе поверхности нижележащих пород и южнее для прогибов.

Рассмотрим полученные структуры в вертикальных сечениях через бассейн и через хребт (рис. 5, 6). Модельные структуры в разрезах представляют собой

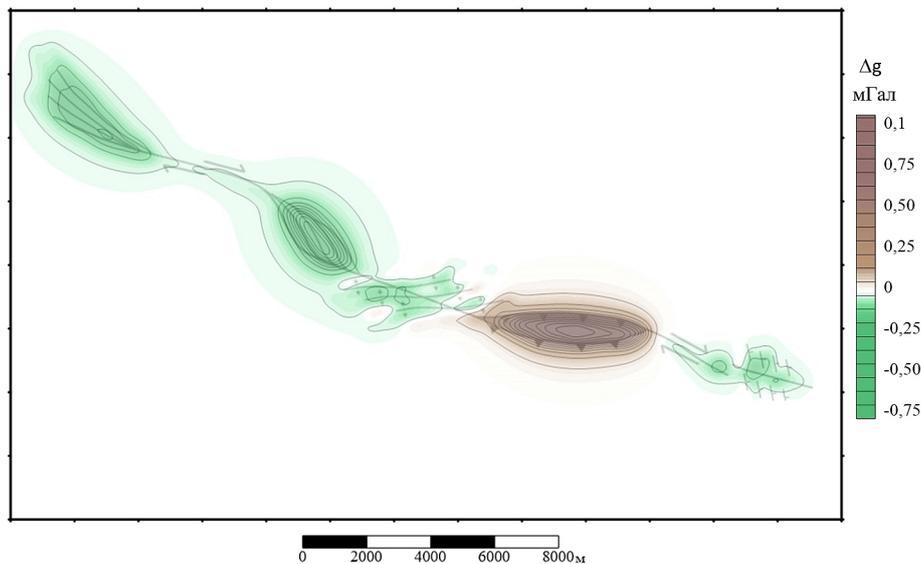


Рис. 3. Модельное гравитационное поле (вертикальная составляющая напряженности гравитационного поля (ускорения свободного падения) в миллигалах)

Fig. 3. Model gravitational field (vertical component of the gravitational field strength (gravitational acceleration) in milligals)

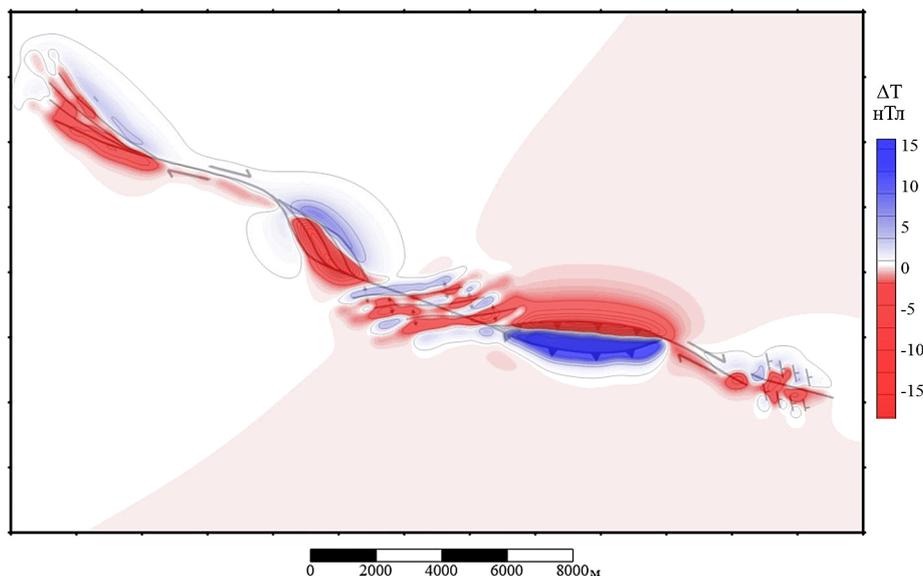
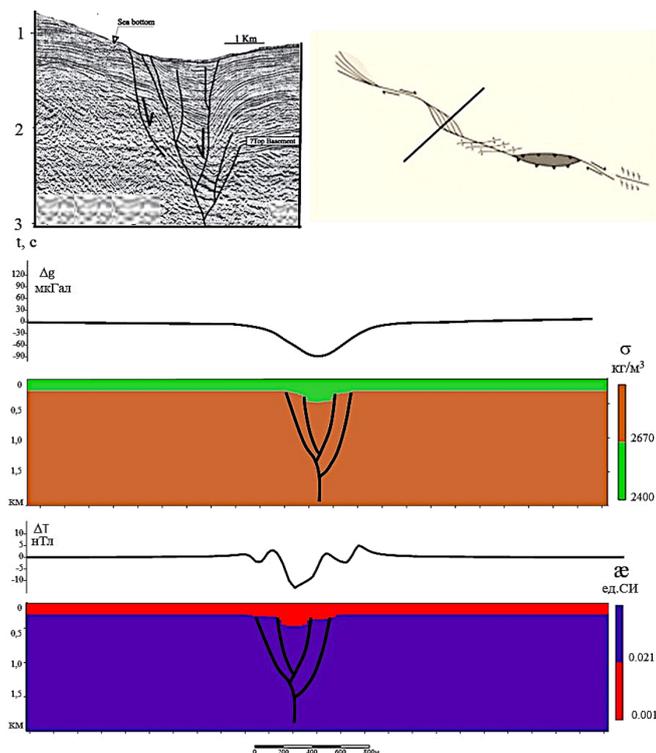


Рис. 4. Модельное магнитное поле (приращение модуля вектора магнитной индукции ( $\Delta T$ ) в нанотеслах)

Fig. 4. Model magnetic field (increment of the modulus of the magnetic induction vector ( $\Delta T$ ) in nanoteslas)

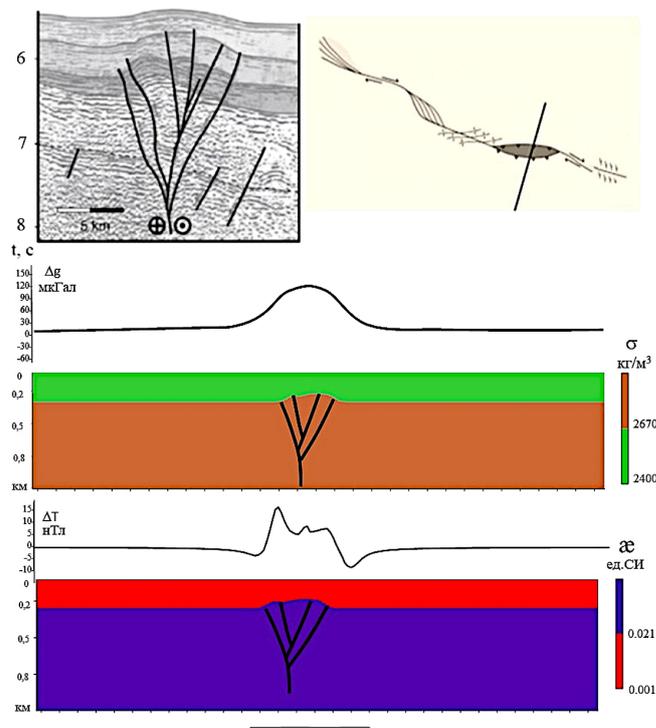


**Рис. 5.** Разрез синтезированной модели сдвига через бассейн «пулл-апарт» и пример реальной отрицательной структуры типа «цветок», зафиксированной на сейсмическом разрезе (Koukouvelas, Aydin, 2002)

**Fig. 5.** Section of the synthesized strike-slip model across the «pool-apart» basin and an example of a real negative flower structure recorded on the seismic section (Koukouvelas, Aydin, 2002)

упрощенную форму отрицательной и положительной цветковых структур — расщепляющихся от нижней к верхней части разреза разломов. Такие структуры выделяются и в разрезе физических моделей сдвигов (Фролова, 2019), и в реальных геофизических данных, в частности сейсмических (Данилова, 2020). Ширина цветковой структуры и ее конфигурация зависят в высокой степени от глубины расположения фундамента или глубины заложения основного шва (разлома), вдоль которого наблюдаются смещения, что показано многочисленными экспериментальными исследованиями (Фролова, Корбутяк, 2019; Каримова, 2021). Ширина полученных в текущей работе аномалий гравитационного и магнитного полей незначительно превышает поперечный размер структур, вызванных сдвиговой деформацией.

Полученные результаты позволяют ожидать проявления сдвиговых деформаций на картах гравитационного поля в форме цепочек аномалий разных знаков и амплитуды как проявления дуплексов сжатия и растяжения. Наиболее выраженные аномалии у амплитудных бассейнов и хребтов; аномалии складок менее проявлены. Для магнитного поля отмечаются разнознаковые аномалии в форме пар вытянутых сигмовидных кривых ( $S$ ). Складки аномалии также имеют меньшую амплитуду, чем для бассейнов и хребтов. Сравнение карт полей друг с другом говорит о лучшей проявленности отдельных складок в магнитном



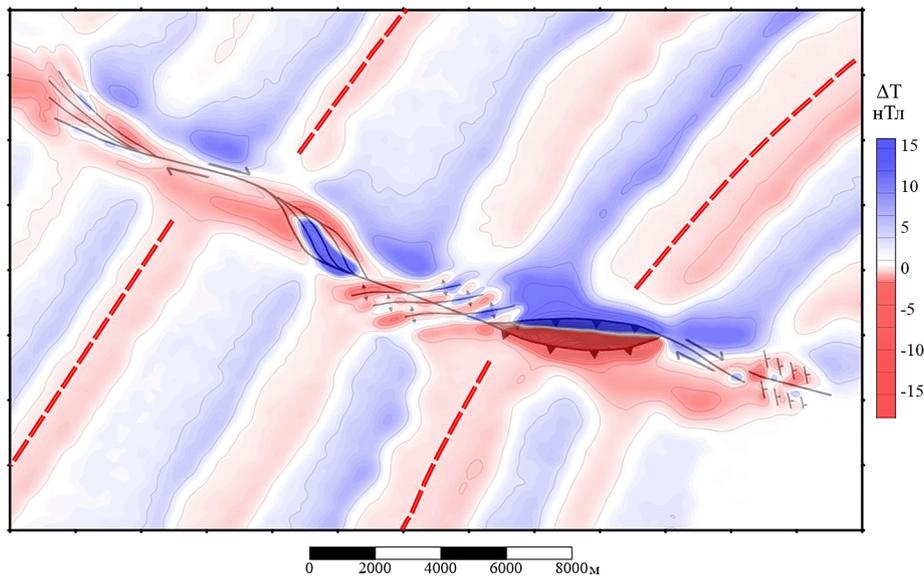
**Рис. 6.** Разрез синтезированной модели сдвига через хребет «поп-ап» и пример реальной положительной структуры типа «цветок», зафиксированной на сейсмическом разрезе (Le Guerroué, Cobbold, 2006)

**Fig. 6.** Section of the synthesized strike-slip model across the «pop-up» ridge and an example of the real positive structure of the «flower» type recorded on the seismic section (Le Guerroué, Cobbold, 2006)

поле, тогда как в гравитационном поле аномалии складки сливаются практически в единую структуру без заметного линейного характера аномалий. Сопоставление карты расчетного магнитного поля и положения заданных разрывных нарушений говорит о том, что делать напрямую линеаментный анализ можно с большой осторожностью из-за существенного смещения осей аномалий и градиентных зон.

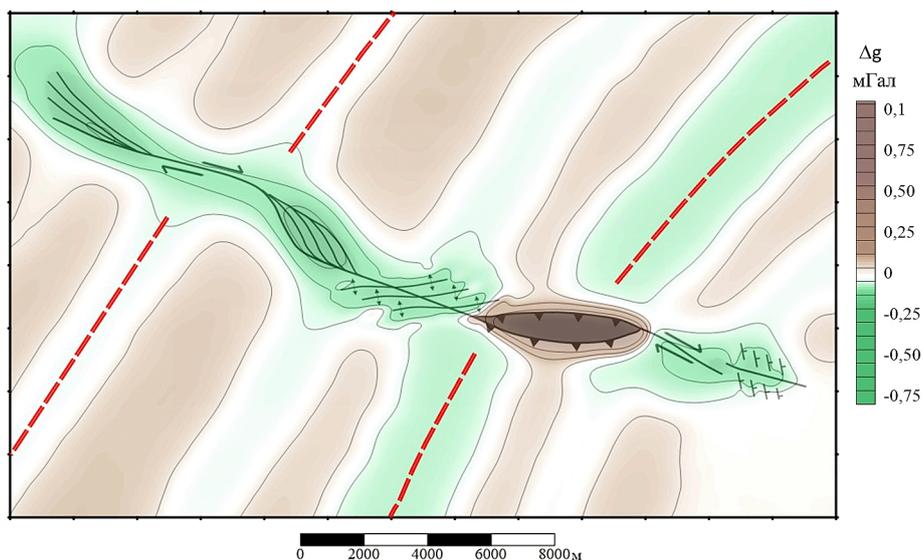
Конечно, сдвиг должен проявляться и в нарушении корреляции аномалий, созданных особенностями вещественного состава и свойств пород, испытавших воздействие сдвигового нарушения. Величина смещения и характер поля индивидуальны — очень разнятся в зависимости от особенностей реальной геологической среды, но для примера покажем один из вариантов такого влияния (рис. 7, 8).

Пусть структуры фундамента до развития сдвига уже были неоднородны, имели линейные аномалии северо-восточного простирания. При развитии сдвига в зоне влияния последнего произошло изменение свойств — ослабление плотностных и магнитных характеристик, а также смещение оси аномалий до и после сдвига. В таком случае конфигурация поля становится более сложной: накладываются эффекты от сдвига и аномалии, вызванные разностью свойств пород, и соотношение аномалий различного происхождения может быть любым в зависимости от характеристики свойств пород, глубины расположения фундамента,



**Рис. 7.** Вариант модели магнитного поля, где аномалии от структур, образованных сдвигом, накладываются на аномалии, вызванные разностью свойств пород

**Fig. 7.** A variant of the magnetic field model where anomalies from strike-slip structures are superimposed on anomalies caused by the difference in rock properties



**Рис. 8.** Вариант модели гравитационного поля, где аномалии от структур, образованных сдвигом, накладываются на аномалии, вызванные разностью свойств пород

**Fig. 8.** A variant of the gravitational field model where anomalies from superimposed structures are superimposed on anomalies caused by the difference in rock properties

интенсивности развития дуплексных структур (хребтов и бассейнов в зоне сдвига), величины смещения по магистральному разлому.

### Выводы

Практическим результатом проведенного «численного эксперимента» считаем возможность наблюдать проявление в потенциальных полях аномалий, связанных с деформациями, вызванными сдвиговыми нарушениями. Полученные карты позволяют выделить в гравитационном поле цепочки разнознаковых аномалий, в магнитном поле — сигмовидные по форме парные («+» и «-») аномалии. Амплитуды ано-

маний говорят о возможности их изучения с помощью современной аппаратуры — в основном это десятки микрогал в гравитационном поле, единицы нанотесел в магнитном поле. Конечно, аномалии, обусловленные влиянием вещественного состава вмещающих пород, осложняют идентификацию таких структур на практике, но по крайней мере теперь понятно, какие именно особенности сдвигов могут проявляться в данных потенциальных полях.

Основным принципиальным результатом работы считаем вывод о применимости результатов физического моделирования развития геологических структур для компьютерного моделирования геофизических полей. Вероятно, это может стать достовер-

ным инструментом для обоснования интерпретационных моделей таких сложных структур, как сдвиговые деформации. Рассмотренная в текущей работе модель является весьма общей, однако показывает адекватность результатов, хотя пока и достаточно грубых, но уже полезных, на взгляд авторов. Для интерпретации данных реально измеренных полей для территорий, где ожидается наличие сдвигов, можно порекомендовать комбинацию физического и компьютерного моделирования. Предполагается, что модель будет отражать гипотетические представления об изучаемой геологической среде (с учетом деформаций, вещественного состава, характеристик нормального поля), а результаты моделирования позволят подтвердить, отвергнуть или потребовать уточнений гипотезы о строении участка на основе сопоставления модельного и наблюдаемого полей. Такой подход не только может позволить подобрать оптимальную модель структур для интерпретации данных потенциальных полей, но и помочь в верификации результатов аналогового тектонофизического моделирования, результаты которого несут собственную высокую прикладную ценность (Чернецкий, Фролова, 2018; Фролова, 2019). Перспективным направлением видится взаимодействие между специалистами разных геологических наук, выполнение комплексных междисциплинарных исследований, в том числе на стыке экспериментальной тектонофизики и геофизики.

## Литература / References

- Данилова Е. А. Присдвиговые цветковые структуры юго-запада Оренбургской области // Региональная геология и металлогения. 2020. № 82. С. 60–68.
- Danilova E. A. *Prisdvigovye cvetkovye struktury yugo-zapada Orenburgskoj oblasti* (Strike flower structures of the southwest of the Orenburg region). Regional geology and metallogeny, 2020, No. 82, pp. 60–68.
- Имаева Л. П., Маккей К. Г., Козьмин Б. М., Макаров А. А. Сейсмостектоническая реактивизация краевых шовных зон Сибирского кратона // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26. № 2. С. 7–26. DOI: 10.31242/2618-9712-2021-26-2-1.
- Imaeva L. P., Makkej K. G., Koz'min B. M., Makarov A. A. *Sejsmotektonicheskaya reaktivizaciya kraevykh shovnykh zon Sibirskogo kratona* (Seismotectonic reactivation of the marginal suture zones of the Siberian Craton) // Regional geology and metallogeny, 2021, V. 26, No. 2. pp. 7–26.
- Имаева Л. П., Имаев В. С., Середкина А. И. Сейсмостектонические деформации активных сегментов зоны сопряжения Кольмо-Омолонского супертеррейна и Южно-Ануйской сутуры, Северо-Восток России // Геотектоника. 2021. № 1. С. 232–240. DOI:10.31857/S0016853X21010069.
- Imaeva L. P., Imaev V. S., Seredkina A. I. *Sejsmotektonicheskie deformacii aktivnykh segmentov zony sopryazheniya Kolyto-Omolonskogo superterrejna i Yuzhno-Anuyjskoj sutury, Severo-Vostok Rossii* (Seismotectonic deformations of active segments of the conjugation zone of the Kolyma-Omolon superterrane and the South Anyui suture, Northeast Russia). Geotectonics, 2021, No. 1, pp. 232–240.
- Каримова А. А., Борняков С. А., Пантелеев И. А. Основные закономерности развития разрывной структуры сдвиговых зон: по результатам физического моделирования // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: Тез. докл. Всерос. совещ., посвящ. пам. проф. С. И. Шермана. 2021. С. 118–119.
- Karimova A. A., Bornyakov S. A., Panteleev I. A. *Osnovnyye zakonornosti razvitiya razryvnoy struktury sdvigovykh zon: po rezul'tatam fizicheskogo modelirovaniya* (The main regularities of the development of the discontinuous structure of shear zones: according to the results of physical modeling). Proc. of conference, 2021, pp. 118–119.
- Каримова А. А., Борняков С. А. Примеры сегментной активизации разломов в природных сдвиговых зонах // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXIX Всерос. молодеж. конф. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. С. 126–127.
- Karimova A. A., Bornyakov S. A. *Primery segmentnoy aktivizatsii razlomov v prirodnykh sdvigovykh zonakh* (Examples of segment activation of faults in natural shear zones). Structure of the Lithosphere and Geodynamics: Proceedings of the XXIX All-Russian Youth Conference. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS, 2021, pp. 126–127.
- Метелкин Д. В., Верниковский В. А., Казанский А. Ю. Тектоническая эволюция Сибирского палеоконтинента от неопротерозоя до позднего мезозоя: палеомагнитная запись и реконструкции // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 7. С. 883–899.
- Metelkin D. V., Vernikovskij V. A., Kazanskij A. Yu. *Tektonicheskaya evolyuciya Sibirskogo paleokontinenta ot neoproterozoya do pozdnego mezozoya: paleomagnitnaya zapis' i rekonstrukcii* (Tectonic Evolution of the Siberian Paleocontinent from the Neoproterozoic to the Late Mesozoic: Paleomagnetic Recording and Reconstructions). Geologiya i geofizika, 2012, V. 53, No. 7, pp. 883–899.
- Тимурзиев А. И. Новейшая сдвиговая тектоника осадочных бассейнов: тектонофизический и флюидодинамический аспекты (в связи с нефтегазоносностью). Часть 1 // Глубинная нефть. 2013. Т. 1. № 4. С. 561–605.
- Timurziev A. I. *Novejshaya sdvigovaya tektonika osadochnykh bassejnov: tektonofizicheskij i Flyuidodinamicheskij aspekty (v svyazi s neftegazonosnost'yu) chast' 1* (Recent strike-slip tectonics of sedimentary basins: tectonophysical and fluid dynamic aspects (in connection with oil and gas potential). Part 1. Glubinnaya neft'. 2013, V. 1, No. 4, pp. 561–605.
- Фролова Н. С., Кара Т. В., Читалин А. Ф., Чернецкий А. Г. Аналоговое моделирование сложных сдвиговых зон. Пример Баимской рудной зоны (Западная Чукотка) // Проблемы тектоники континентов и океанов: Материалы LI Тектонического совещания. 2019. С. 320–324.
- Frolova N. S., Kara T. V., Chitalin A. F., Cherneckij A. G. *Analogovoe modelirovanie slozhnykh sdvigovykh zon. Primer Baimskoj rudnoj zony* (Zapadnaya Chukotka) (Analog modeling of complex shear zones. An example of the Baim ore zone (Western Chukotka)). Problems of tectonics of continents and oceans: Proceedings of LI Tectonic Meeting, 2019, pp. 320–324.
- Фролова Н. С., Корбутяк А. Н. Значение моделирования для структурной интерпретации сейсмических данных: пример сдвиговых зон с чехлом большой мощности // Прикладные аспекты динамической геоло-



- гии: Материалы Всерос. науч. конф., посвящ. 110-й годовщине со дня рождения Г. П. Горшкова (1909–1984). 2019. С. 90–96.
- Frolova N. S., Korbutyak A. N. *Znachenie modelirovaniya dlya strukturnoj interpretacii seismicheskikh dannyh: primer sdvigovyh zon s chekhlom bol'shoj moshchnosti* (The value of modeling for the structural interpretation of seismic data: an example of shear zones with a thick cover). Proc. of conference, 2019, pp. 90–96.
- Фролова Н. С., Кара Т. В., Читалин А. Ф. Физическое моделирование сдвиговых зон различной сложности для выявления участков повышенной флюидопроницаемости // Динамическая геология: Электронный научно-образовательный журнал. 2019. № 1. С. 29–47.
- Frolova N. S., Kara T. V., Chitalin A. F. *Fizicheskoe modelirovanie sdvigovyh zon razlichnoj slozhnosti dlya vyavleniya uchastkov povyshennoj flyuidopronicaemosti* (Physical modeling of shear zones of varying complexity to identify areas of increased fluid permeability). Dynamic geology. Electronic scientific and educational journal, 2019, No. 1, pp. 29–47
- Фролова Н. С., Мишакина А. А., Корбутяк А. Н. Аналоговое моделирование структур, формирующихся на платформах при смене режима растяжения сдвиговым режимом // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: Тез. докл. Всерос. совещ., посвящ. пам. проф. С. И. Шермана. 2021. С. 139–140.
- Frolova N. S., Mishakina A. A., Korbutyak A. N. *Analogovoe modelirovanie struktur, formiruyushchihся na platformah pri smene rezhima rastyazheniya sdvigovym rezhimom* (Analog modeling of structures formed on platforms during a change in tension regime by shear regime). Proc. of conference, 2021, pp. 139–140.
- Чернецкий Г. А., Фролова Н. С. Аналоговое моделирование широких зон сдвига // Инновации в геологии, геофизике, географии — 2018: Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 167–168.
- Cherneckij G. A., Frolova N. S. *Analogovoe modelirovanie shirokih zon sdviga* (Analog modeling of wide shear zones). Innovations in Geology, Geophysics, Geography — 2018: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference, 2018, pp. 167–168.
- Christie-Blick, N. and Biddle, K. T. Deformation and Basin Formation along Strike-Slip Faults. In: Biddle, K. T. and Christie-Blick, N., Eds., *Strike-Slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 1985, V. 37, pp. 1–34. DOI:10.2110/pec.85.37.0001.
- Koukouvelas, I. K., and Aydin, A., Fault structure and related basins of the North Aegean Sea and its surroundings, *Tectonics*, 2002, 21 (5), 1046 p. DOI: 10.1029/2001TC901037.
- Le Guerroué, Erwan & Cobbold, Peter. Influence of erosion and sedimentation on strike-slip fault systems: Insights from analogue models. *Journal of Structural Geology*, 2006, 28. DOI:10.1016/j.jsg.2005.11.007.
- Mussofan, W. Thick silicic volcanic sequences at Muara Laboh and Rantau Dedap geothermal fields, Sumatra, Indonesia: implications for reservoir architecture and permeability. *Proceedings of the 41st New Zealand Geothermal Workshop*, 2019.
- Schellart, Wouter & Nieuwland, Dirk. (2003). 3D evolution of a pop-up structure above a double basement strike-slip fault: Some insights from analogue modelling. *Geological Society, London, Special Publications*, 212, pp. 169–179. DOI:10.1144/GSL.SP.2003.212.01.11.

Received / Поступила в редакцию 07.11.2022