

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛОМНОЙ СТРУКТУРЫ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ КУРАЙСКОЙ ВПАДИНЫ ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Айдиса Михайловна Санчаа

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, тел. 8(383)330-49-54, e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

Ирина Владимировна Суродина

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, старший научный сотрудник, e-mail: sur@ommfao1.sscs.ru

Нина Николаевна Неведрова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, доцент, главный научный сотрудник, тел. 8(383)333-16-39, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

В статье представлены результаты трехмерного моделирования разломной структуры Салгандуйского блока Курайской впадины. Моделирование включало выяснение угла наклона сместителя юго-восточного разломного ограничения.

Ключевые слова: Курайская впадина, вертикальные электрические зондирования, геоэлектрическое строение, трехмерное математическое моделирование

3D MODELLING OF THE FAULT STRUCTURE IN THE SOUTHERN PART OF THE KURAIKAYA BASIN ACCORDING TO DIRECT CURRENT METHOD DATA

Aidisa M. Sanchaa

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Leading Scientist, tel.: +7-913-920-17-48, e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

Irina V. Surodina

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Akademika Lavrentieva Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Senior Researcher, e-mail: sur@ommfao1.sscs.ru

Nina N. Nevedrova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, DSc, Associate Professor, Chief Scientist, tel.: +7-913-890-26-45, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

In this article we present the results of three-dimensional modeling of the fault structure of the Salgandui block of the Kuraikaya basin. The modeling included finding out the tilt angle of the fault plane displacer.

Key words: Kuraiskaya basin, geoelectric structure, direct current, 3d mathematical modelling

Курайская впадина является одной из крупных кайнозойских структур Горного Алтая. Она расположена в зоне современной сейсмической активизации. В настоящее время после Чуйского землетрясения 2003 г. с магнитудой 7.3 в её южной части продолжают происходить сейсмические события разного класса, чаще всего приуроченные к разломам. Сейсмологические данные свидетельствуют о напряженном состоянии впадины и об активности имеющихся разломных структур. Несмотря на достаточно большое количество геолого-геофизических данных, полученных на территории впадины в разные годы, строение отдельных её участков до конца непонятно. По результатам предшествующих наших исследований комплексом методов геоэлектрики построены сложные разломно-блоковые геоэлектрические модели депрессии [1, 2]. На данном этапе для уточнения строения участков с присутствием разломов привлекается численное трехмерное моделирование с использованием данных вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ).

В результате длительного геологического развития кайнозойских впадин Горного Алтая на территории многих из них наблюдаются выходы пород фундамента на дневную поверхность. Салгандуйский блок – пример такого феномена. В южной части этого блока выполнена съёмка по системе параллельных профилей (т.е. фактически площадная) методом ВЭЗ. По результатам 1D интерпретации построены разрезы по профилям измерений, на которых выделены разломы. В этой статье представлены результаты трёхмерного моделирования разломной структуры, ограничивающей с юго-восточной стороны Салгандуйский блок. На рис. 1 показано размещение блока на территории впадины, разломы по геологическим данным в этой части впадины [2], а также профили и пункты ВЭЗ, синим контуром отмечена область моделирования.

Для трёхмерного моделирования была использована модифицированная версия программы EMF_DC3Dmod [1, 2]. Новая версия отличается от первоначальной тем, что все расчёты проводятся на графических процессорах [3]. Существенное изменение алгоритма связано с решением полученной системы линейных уравнений и, прежде всего, использованием авторского предобуславливателя [4]. Предобуславливатель построен на основе метода Хотеллинга – Шульца, приближающий обратную матрицу. Причём вычисление самой предобуславливающей матрицы в алгоритме не требуется. На каждой итерации в методе сопряжённых градиентов вычисляется лишь результат воздействия предобуславливающей матрицы на вектор. Это является матрично-векторной операцией и хорошо распараллеливается на GPU. В результате удалось добиться ускорения в 50-60 раз по сравнению с последовательным вариантом.

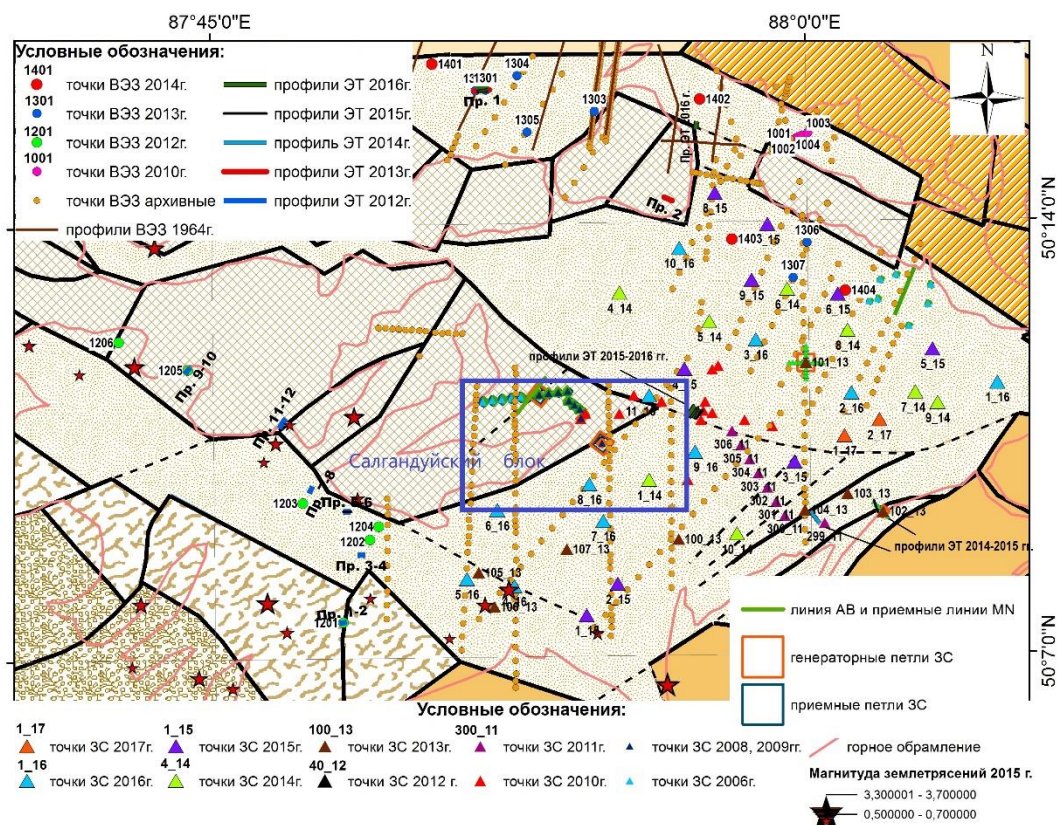


Рис. 1. Блоковая схема Курайской впадины (составлена Е.В. Деевым) с пунктами измерений. Синим прямоугольником отмечена область 3D моделирования

Построение стартовой модели для трёхмерных программ представляет определенные трудности, поэтому был написан небольшой интерфейс для задания входной модели. Вначале по полученным с помощью программ одномерной и двумерной инверсий моделям в каждой точке ВЭЗ строится трёхмерная модель. Далее требуется ввести координаты каждой точки ВЭЗ, мощность и сопротивление каждого слоя. В результате с помощью интерфейса создается общая входная стартовая модель с разбиением, как в работе [2].

Введение разломов в исходную модель также является непростой задачей. Создание модели с разломами было автоматизировано, для чего написана отдельная программа. Во входных данных следует лишь указать номера слоёв на плоскости (в уже построенной модели), номера треугольников, между которыми будет проходить разлом, и угол наклона разлома. Разработанное автоматизированное построение моделей, включающих разломные структуры, существенно упрощает работу с исходными данными и позволяет минимизировать ошибки, неизбежно возникающие при ручном её построении.

Расчёты проведены на кластере ССКЦ СО РАН (НКС-30Т+GPU). Моделирование выполнялось в два этапа. На первом этапе были выполнены расчёты для модели, построенной на основе результатов 1D инверсии ВЭЗ четырех профилей - пр. 2-5, область моделирования показана красным квадратом (рис. 2). Затем на

её основе была создана модель, включающая разломную структуру, при этом область моделирования была уменьшена (синий квадрат на рис. 2) и рассматривались данные ВЭЗ только для профилей 3, 4. Моделировался диагональный разлом, ограничивающий Салгандуйский блок с юго-востока. Сопоставление результатов для двух моделей с разломом и без него приведено в табл.1. Для разломной модели получено меньшее расхождение с полевыми данными. Далее эта модель была использована для выяснения угла наклона сместителя разломной структуры.

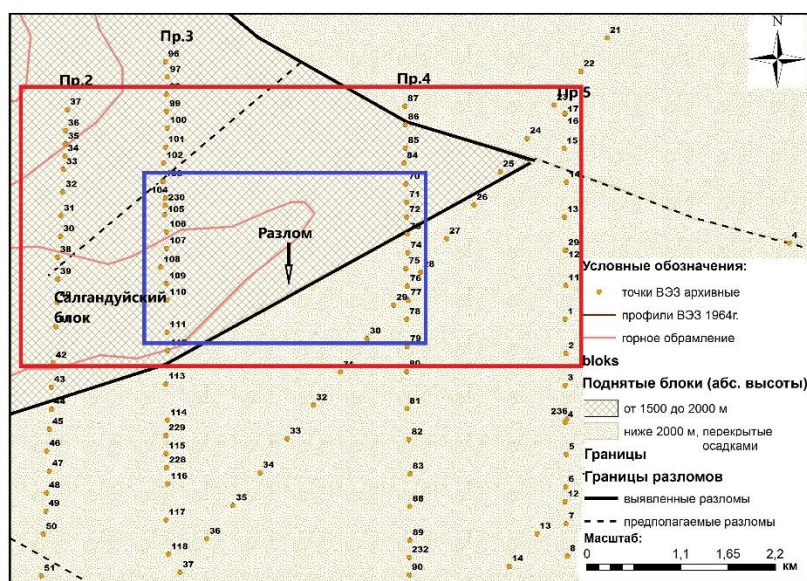


Рис. 2. Участки моделирования. Красным прямоугольником отмечена область моделирования первого этапа.

Синим прямоугольником отмечена область моделирования второго этапа

Таблица 1

Сравнительные данные моделей 1, 2 (первый этап)

ab/2	Rhok	3d мод1	Расх.,%	Разлом	Расх.,%
3	83	79.47	2.17	79.42	2.20
6	107	106.51	0.23	106.21	0.37
9	142	140.51	0.53	139.75	0.80
15	196	187.53	2.21	194.43	0.40
25	258	230.16	5.70	225.3	6.77
40	237	238.06	0.22	233.09	0.83
65	243	206.23	8.19	203.53	8.84
100	201	151.89	13.92	153.64	13.35
150	132	107.26	10.34	115.46	6.68
200	105	95.15	4.92	99.97	2.45
350	118	109.88	3.56	116.13	0.80
500	239	150.49	22.72	157.62	20.52
Среднее расх., %			6.23		5.34

На втором этапе были рассмотрены модели, для которых изменялся угол наклона сместителя разлома для значений $\pm 5^\circ$, $\pm 15^\circ$, $\pm 25^\circ$, $\pm 35^\circ$. Положительный знак означает наклон сместителя в северо-западном направлении, отрицательный – в юго-восточном. Результаты моделирования представлены в таблицах 2, 3 для ВЭЗ 72, подверженному наибольшему влиянию разлома.

Таблица 2

Сравнительные данные моделей разлома для ВЭЗ 72.
Наклон разлома под Салгандуйский блок (второй этап)

AB/ 2	Rho_k	0°	Расх,%	5°	Расх,%	15°	Расх,%	25°	Расх,%	35°	Расх,%
3	83	79.42	2.20	79.42	2.20	79.42	2.20	79.42	2.20	79.42	2.20
6	107	106.21	0.37	106.21	0.37	106.21	0.37	106.21	0.37	106.21	0.37
9	142	139.76	0.80	139.76	0.80	139.76	0.80	139.76	0.80	139.76	0.80
15	196	194.48	0.39	194.48	0.39	194.48	0.39	194.48	0.39	194.48	0.39
25	258	240.83	3.44	240.83	3.44	240.83	3.44	240.83	3.44	240.83	3.44
40	237	233.77	0.69	233.89	0.66	233.87	0.66	233.86	0.67	233.86	0.67
65	243	203.97	8.73	204.04	8.72	203.98	8.73	203.94	8.74	203.92	8.74
100	201	153.75	13.32	153.68	13.34	153.45	13.42	153.29	13.47	153.17	13.50
150	132	115.41	6.71	115.01	6.88	114.31	7.18	113.82	7.40	113.48	7.54
220	105	100.74	2.07	100.55	2.16	100.03	2.42	99.53	2.67	98.99	2.95
350	118	119.67	0.70	119.89	0.79	119.64	0.69	119.29	0.54	118.27	0.11
500	239	171.7	16.39	172.11	16.27	172.76	16.09	171.68	16.39	169.87	16.91
Ср.расх,%			4.65		4.67		4.70		4.76		4.80

Таблица 3

Сравнительные данные моделей разлома для ВЭЗ 72.
Наклон разлома на Салгандуйский блок (второй этап)

AB/2	Rho_k	0°	Расх,%	-5°	Расх,%	-15°	Расх,%	-25°	Расх,%	-35°	Расх,%
3	83	79.42	2.20	79.42	2.20	79.42	2.20	79.42	2.20	79.42	2.20
6	107	106.21	0.37	106.2	0.38	106.2	0.38	106.2	0.38	106.2	0.38
9	142	139.76	0.80	139.74	0.80	139.75	0.80	139.75	0.80	139.75	0.80
15	196	194.48	0.39	194.45	0.40	194.45	0.40	194.45	0.40	194.46	0.39
25	258	240.83	3.44	240.78	3.45	240.78	3.45	240.8	3.45	240.82	3.44
40	237	233.77	0.69	233.78	0.68	233.8	0.68	233.85	0.67	233.94	0.65
65	243	203.97	8.73	204.01	8.72	204.13	8.69	204.34	8.64	204.75	8.54
100	201	153.75	13.32	153.94	13.26	154.43	13.10	155.25	12.84	156.85	12.34
150	132	115.41	6.71	115.98	6.46	117.46	5.83	119.81	4.84	123.97	3.14
220	105	100.74	2.07	100.89	2.00	101.38	1.75	102.4	1.25	104.81	0.09
350	118	119.67	0.70	119.23	0.52	118.24	0.10	117.44	0.24	118.02	0.01
500	239	171.7	16.39	170.81	16.64	168.63	17.26	167.18	17.68	168.62	17.27
Ср.расх,%			4.65		4.63		4.55		4.45		4.10

Наименьшее расхождение от полевых данных показали расчеты для модели с с углом наклона сместителя в 35° . Эти результаты согласуются с геологической информацией об углах наклона сместителей разрывных нарушений в данном районе (рис. 3).

Выполненное трёхмерное моделирование позволяет более достоверно представить глубинную структуру Салгандуйского блока, положение разломных нарушений его ограничивающих. Это дает возможность уточнить кинематику его формирования на основе интерпретации данных геоэлектрики. Полученные результаты важны для понимания особенностей современной геодинамики Горного Алтая, а также для выделения сейсмогенных разломов.

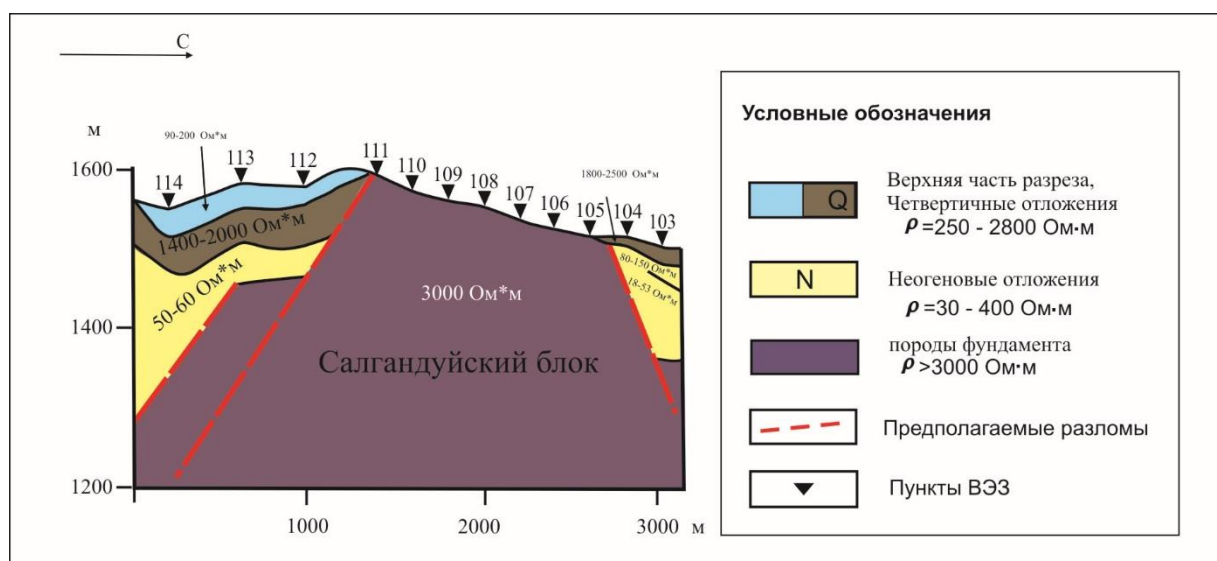


Рис. 3. Модель Салгандуйского блока с учетом результатов трехмерного моделирования

Исследование выполнено в рамках государственных заданий ИНГГ СО РАН №0331-2019-0015 и ИВМиМГ СО РАН №0251-2021-0004 (расчётная часть).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Неведрова Н.Н., Санчаа А.М., Деев Е.В. Строение Курайской впадины Горного Алтая с учетом тектонических особенностей // Геофизика. – 2011. – №6. – с.56-64.
2. Неведрова Н.Н., Санчаа А.М., Деев Е.В. Глубинное строение и характеристики краевых структур Курайской впадины по данным геоэлектрики с контролируемым источником. // Геология и геофизика. – 2014. – т.55. – №1. – с.119-132.
3. Неведрова, Н.Н., Суродина, И.В., Санчаа, А.М. Трёхмерное моделирование сложных геоэлектрических структур // Геофизика. – 2007. - №1. – с.36-41. – ISSN 1681-4568.
4. Неведрова Н.Н., Санчаа А.М., Суродина И.В. Характеристики разломных структур по данным электромагнитных зондирований. Моделирование разломов // Геофизические исследования. Том 15. – 2014 г. – С. 83-94. -ISSN 1818-3735.
5. Суродина И.В, Неведрова Н.Н., Санчаа А.М. Параллельные алгоритмы для моделирования прямых трёхмерных задач электротомографии и ВЭЗ на GPU// "Современные проблемы математического моделирования". Сборник трудов всероссийской школы-конференции молодых исследователей, Абрау-Дюрсо. – 2015. – с.221-225

6. Labutun I.B., Surodina I.V. Algorithm for Sparse Approximate Inverse Preconditioners in Conjugate Gradient Method // Reliable Computing (Interval Computations) [Электронный ресурс] http://interval.louisiana.edu/reliable-computing-journal/tables-of-contents.html#Volume_18.

REFERENCES

1. Nevedrova N.N., Sanchaa A.M., Deev E.V. Stroenie Kurajskoj vpadiny Gornogo Altaya s uchetom tektonicheskikh osobennostej // Geofizika. – 2011. – №6. – с.56-64.
2. Nevedrova N.N., Sanchaa A.M., Deev E.V. Glubinnoe stroenie i harakteristiki kraevykh struktur Kurajskoj vpadiny po dannym geoelektriki s kontroliruемым istochnikom. // Geologiya i geofizika. – 2014. – т.55. – №1. – с.119-132.
3. Nevedrova, N.N., Surodina, I.V., Sanchaa, A.M. Trekhmernoe modelirovanie slozhnykh geoelektricheskikh struktur // Geofizika. – 2007. - №1. – с.36-41. – ISSN 1681-4568.
4. Nevedrova N.N., Sanchaa A.M., Surodina I.V. Harakteristiki razlomnykh struktur po dannym elektromagnitnykh zondirovanij. Modelirovanie razlomov // Geofizicheskie issledovaniya. Tom 15. – 2014 g. – S. 83-94. -ISSN 1818-3735.
5. Surodina I.V, Nevedrova N.N., Sanchaa A.M. Parallelnye algoritmy dlya modelirovaniya pryamykh tryohmernykh zadach elektrotomografii i VEZ na GPU// "Sovremennye problemy matematicheskogo modelirovaniya". Sbornik trudov vsrossijskoj shkoly-konferencii molodykh issledovatelej, Abrau-Dyurso. – 2015. – с.221-225
6. Labutun I.B., Surodina I.V. Algorithm for Sparse Approximate Inverse Preconditioners in Conjugate Gradient Method // Reliable Computing (Interval Computations) [Elektronnyj resurs] http://interval.louisiana.edu/reliable-computing-journal/tables-of-contents.html#Volume_18.

© А. М. Санчаа, И. В. Суродина, Н. Н. Неведрова, 2021