

УДК 622.831+551.248.2

doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.287-295

Разработка геомеханической модели активного разлома южного Сахалина

© 2019 П. А. Каменев*, А. Е. Заболотин, В. А. Дегтярев, О. А. Жердева

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

*E-mail: p.kamenev@imgg.ru

Создана геомеханическая модель, описывающая распределение напряженно-деформированного состояния в выбранном объеме южной части Центрально-Сахалинского разлома (ЦСР) и его изменение во времени. Географически модель расположена в координатах 46.4°–47.4° с.ш. и 142.2°–142.8° в.д. Границами модели являются грани параллелепипеда со сторонами 60 км в субширотном и 150 км в меридиональном направлении, глубиной 30 км. В качестве исходных данных взяты результаты каротажа скважин, лабораторные исследования механических свойств ряда горных пород, сейсмологические данные, сейсморазведки ГСЗ, измерения в пунктах наблюдения GPS/ГЛОНАСС. По глубине модель разбита на 8 слоев с различными значениями плотностей от 1.9 до 2.78 г/см³, коэффициентами Пуассона от 0.27 до 0.28, модулями Юнга от 1.2 до 44.9 ГПа. Для оценок деформационных свойств выбранного сегмента ЦСР поверхность была разбита на 9 блоков со скоростями деформаций от 0.5 до 2.3 мм/год. Подобрены значения напряжений, которые изменяются с ростом глубины в диапазоне σ_1 от 50 до 1500 МПа, σ_2 от 30 до 1000 МПа и σ_3 от 20 до 600 МПа. Сделано предположение о более низких значениях главных напряжений непосредственно в плоскости сместителя разлома, по всей его глубине. Получены первые результаты распределения напряженно-деформированного состояния в окрестности разлома. Расчет избыточных касательных напряжений, возникающих в рассматриваемой области, показывает, что их максимальная величина концентрируется в зоне разлома. Так, максимальное его значение 289 МПа соответствует глубине 9 км и постепенно снижается до минимальных значений на свободной поверхности. Результаты моделирования согласуются как с данными распределения очагов землетрясения, так и с инструментальными данными современных приповерхностных деформаций.

Ключевые слова: разлом, геомеханическая модель, деформации, напряжения, о. Сахалин, сейсмичность.

Geomechanical model of South Sakhalin active fault

Pavel A. Kamenev, Andrey E. Zabolotin, Vlad A. Degtyarev, Olga A. Zherdeva*

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

*E-mail: p.kamenev@imgg.ru

A geomechanical model describing the distribution of the stress-strain state in the selected volume of the southern part of the Central Sakhalin Fault and its change in time is developed. Geographically, the model is located in the coordinates 46.4°–47.4° N and 142.2°–142.8° E. The boundaries of the model are the faces of the parallelepiped with sides of 60 km in the sublatitudinal direction, 150 km in the meridional direction and a depth of 30 km. The following results of the measurements are taken as initial data for the model: well logging data, mechanical properties of some rocks based on the laboratory experimentation, seismological data, seismic exploration of DSS, measurements at GPS/GLONASS observation points. The depth of the model is divided into 8 layers with different densities from 1.9 to 2.78 g/cm³, Poisson's ratio from 0.27 to 0.28, Young's modules from 1.2 to 44.9 GPA. To estimate the deformation properties of the selected CSR segment, the surface was divided into 9 blocks with different strain rates from 0.5 to 2.3 mm/year. The stress values are specified varying with increasing depth in the range σ_1 from 50 to 1500 MPa, σ_2 from 30 to 1000 MPa and σ_3 from 20 to 600 MPa. The assumption of lower values of the main stresses directly in the deeping plane of the fault along its entire depth is accepted. The first results of the stress-strain state distribution in the vicinity of the fault have been obtained. The calculation of the excess tangential stress arising in the considered area shows that its maximum magnitude is concentrated in the fault zone. Thus, the maximum stress of 289 MPa corresponds to a depth of 9 km and gradually decreases to its minimum values on the surface. The simulation results are correspondent with the data of earthquake hypocenters distribution and near-surface deformations.

Keywords: fault, geomechanical model, stress, strain, Sakhalin Island, seismicity.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМГиГ ДВО РАН.

Введение

Остров Сахалин является одним из самых сейсмоактивных регионов России. В недавнее время в результате землетрясений были полностью разрушены пос. Нефтегорск и г. Невельск. Большая часть населения Сахалинской области проживает в непосредственной близости от Центрально-Сахалинского разлома (ЦСР), точнее южной его части (рис. 1). Поэтому наблюдения за сейсмической активностью, связанными с ней напряжениями и деформациями, а также возможный сейсмический прогноз являются весьма актуальной задачей.

Результаты среднесрочного прогноза землетрясений методами LURR и СРП указали на наличие потенциальной опасности в окрестности южного сегмента ЦСР [Закупин, Богинская, 2019]. Кроме разработки методов среднесрочного прогноза, коллективом ИМГиГ ДВО РАН совместно с другими структурными подразделениями РАН и вузами страны были организованы пункты комплексного геофизического мониторинга области активного разлома [Макаров и др., 2018; Каменев, 2019]. В этой связи задача изучения распределения деформаций и напряжений в процессе подготовки сильного сейсмического события и после его реализации представляется весьма интересной. За рубежом исследования по моделированию напряженно-деформированного состояния в окрестности разломов также активно проводятся, в частности в непосредственной близости от разлома Сан-Андреас [Lin, Stein, 2004] и на территории Японии [Toda et al., 1998].

Выбранный нами сегмент южной части Центрально-Сахалинского разлома примечателен еще и тем, что на нем находится Южно-Сахалинский грязевой вулкан [Ершов, 2012; Никитенко и др., 2018]. Моделирование напряженно-деформированного состояния в окрестности грязевого вулкана представляет существенный интерес в связи с изучением динамики его активности. Подобные работы по моделированию извержений на основе данных GPS ранее уже проводились сотрудниками ИМГиГ ДВО РАН [Прытков и др., 2014]. По нашему мнению, создание геомеханической модели территории, включающей и Юж-

но-Сахалинский грязевой вулкан, может быть полезно для более углубленного изучения этого уникального объекта. В связи с этим авторами настоящей работы предпринята попытка создания геомеханической модели южной части ЦСР для изучения распределения напряженно-деформированного состояния данного сегмента разлома.

Исходные данные

Исходным размером модели стал параллелепипед со сторонами 150 км в меридиональном направлении, 60 км в субширотном направлении и глубиной 30 км. Географически модель приурочена к координатам в пределах 46.4° – 47.4° с.ш. и 142.2° – 142.8° в.д. Центрально-Сахалинский разлом представлен двумя ветвями: западной (Тынь-Поронайский разлом) и восточной – Апрельский (Троицкий), рассматриваемый в некоторых источниках как опережающий Тынь-Поронайский взбросо-надвиг [Кучай, 1987; Мельников, 2002; Воейкова и др., 2007]. Плоскости сместителей обеих ветвей разлома наклонены на запад под углом 60 – 80° , при выходе на дневную поверхность с постепенным выполаживанием с глубиной до 20 – 30° на глубинах 10 – 15 км [Сапрыгин, 2005].

Западная ветвь разлома (Тынь-Поронайский) выражена в рельефе в виде уступа высотой до 50 – 80 м; смещает плиоцен-раннечетвертичную и среднечетвертичную поверхность выравнивания. Вдоль плоскости разлома наблюдается пластичная смазка в виде аргиллитов быковской свиты. Наличие многочисленных углекислых и сероводородных источников, грязевого вулканизма и аномально высокое давление, отмеченное в буровых скважинах, способствуют быстрому снятию тектонического напряжения.

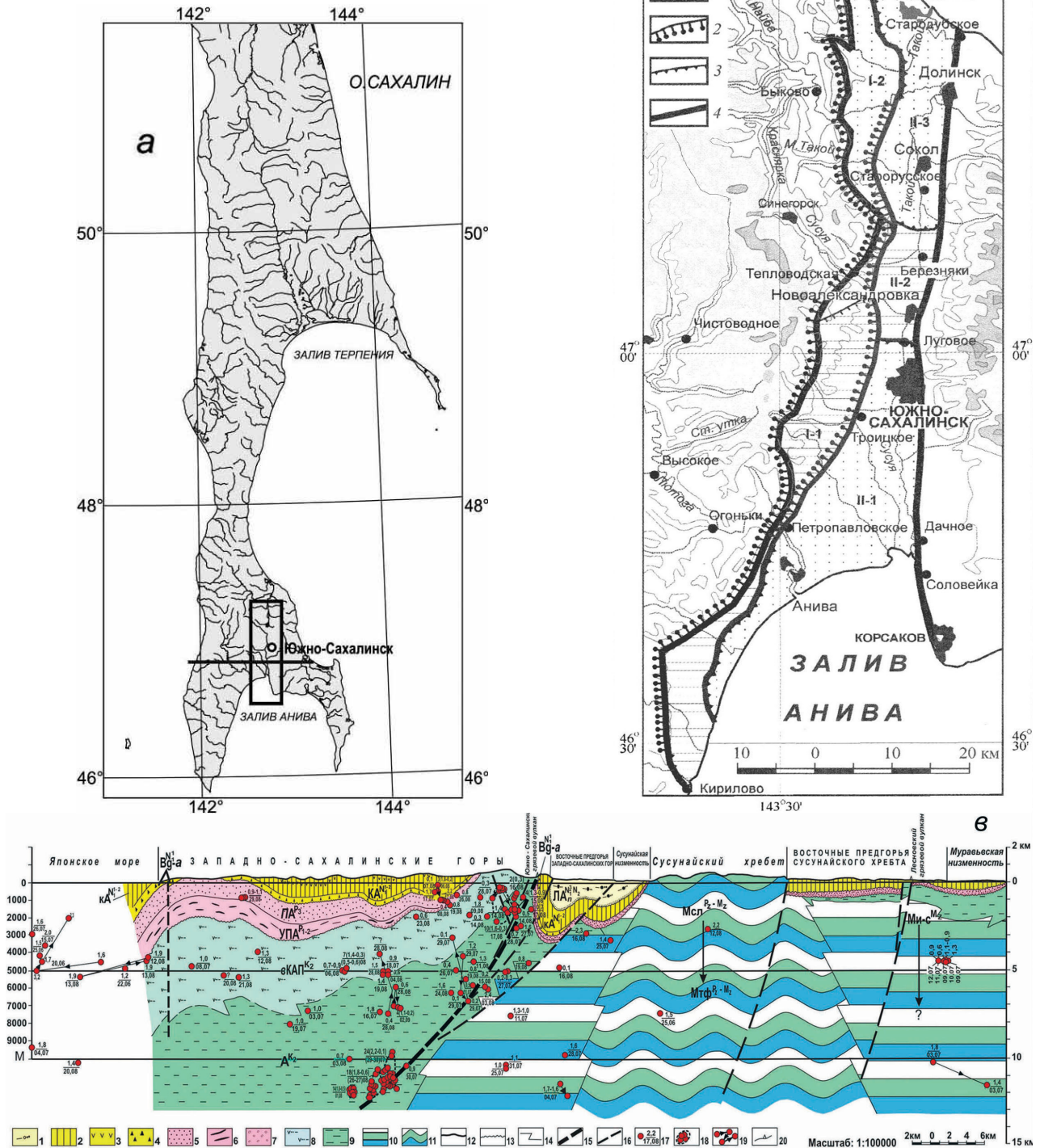
Апрельский разлом (включает два сближенных разрыва – Апрельский и Ключевской) хорошо выражен в рельефе в виде тектонического уступа до 20 – 40 м. Плоскость разлома падает на запад под углом 75 – 85° . Разлом отделяет восточные предгорья Западно-Сахалинских гор от Сусунайской депрессии [Кучай, 1987], представляет собой четкую границу между зоной предгорий и аллювиально-озерной аккумулятивной равниной.

Рис. 1. Район исследования (а, показана траектория разреза, приведенного на рис. 1в), схема расположения разломов (б) и глубинный разрез исследуемого района (в).

(б) – активные разломы центральной и южной частей Сахалина (сост. с использованием данных геологических съемок) [Воейкова и др., 2007]: 1 – сбросы, 2 – надвижки, 3 – флексуры, 4 – границы мегаструктур 3-го порядка.

(в) – структурно-формационный профиль г. Холмск – пос. Охотское через Южно-Сахалинский и Лесновский газоводолитокластитовые вулканы с вынесенными на него близрасположенными гипоцентрами землетрясений [Невельское... , 2009].

Схемы дают представление о геометрии выбранного для моделирования сегмента разлома ЦСР, пояснения остальных условных обозначений в контексте данной работы не требуются.



Тренчинг Апвеловского разлома позволил установить западное падение разлома и предположить, что ранее (около 1000 лет назад) на сегментах этого разлома могли иметь место подвижки, сравнимые по амплитуде с Нефтегорским и Углегорско-Айнским землетрясениями [Булгаков и др., 2002].

Отдельного упоминания заслуживает грязевой вулканизм Центрально-Сахалинского разлома. К разлому приурочена целая система грязевых вулканов – Пугачевские грязевые вулканы, Восточный и Южно-Сахалинский [Ершов, 2012]. На территории Сахалинской области Южно-Сахалинский грязевой вулкан является одним из наиболее крупных и активных на сегодняшний день. Поскольку грязевой вулканизм является природной флюидодинамической системой, то любое воздействие на эту систему или изменение напряженно-деформированного состояния будет приводить к вариациям гидродинамического режима системы, а следовательно, и к вариациям геофизических, геохимических и других параметров.

По уровню сейсмичности южная часть ЦСР схожа с Восточно-Сахалинской системой разломов. Наиболее сильные сейсмические события в зоне разлома таковы (с юга на север): Крильонские 1911, 1912, 1921 гг. ($M = 4.7-5.1$); Анивские 1951 г. ($M = 5.5$) и 1964 г. ($M = 5.0$); Перевальско-Синегорские 1923 и 1924 гг. ($M = 4.5-4.8$); Перевальское 1949 г. ($M = 5.2$) и Найбинское 1928 г. ($M = 4.9$), Такойское 2001 г. ($M = 5.2$). Их эпицентры приурочены преимущественно к районам пересечения Центрально-Сахалинского сбросо-надвига с диагональными разломами [Сафонов, 2008].

В качестве исходных натуральных данных для модели взяты результаты сейсморазведки ГСЗ, каротажа скважин, измерения в пунктах наблюдения GPS / ГЛОНАСС, сейсмологические данные [Каменев и др., 2012; Прытков, Василенко, 2018; Лившиц, 1972]. По глубине (H) модель разбита на 8 слоев с различными значениями плотности ρ от 1.9 до 2.78 г/см³, модулями Юнга E от 1.2 до 44.9 ГПа, коэффициентами Пуассона μ от 0.27 до 0.28. Плотности и геомеханические параметры

рассчитывались на основе данных скоростной модели из [Лившиц, 1972]. При расчете плотностей использовали соотношения из работы [Gardner et al., 1974]. Геомеханические параметры были рассчитаны на основе феноменологических зависимостей соответствующих параметров от скоростей продольных волн. Значения модуля Юнга получены на основе соотношения из работы [Horsrud, 2001]. Коэффициенты Пуассона были подобраны путем обобщения других работ [Каменев и др., 2017а; Каменев, Злобин, 2003].

Для оценок деформационного поведения выбранного блока ЦСР поверхность разбивалась на 9 блоков с различными скоростями деформаций – от 0.5 до 2.3 мм/год. Источником данных по деформациям являются натурные измерения, полученные в [Прытков, Василенко, 2018].

Подбор величин напряжений, действующих в окрестности разлома, выполнен на основе систематизации и обобщения результатов работ [Каменев и др., 2017б; Барышников и др., 1982; Али и др., 2002; Heidbach et al., 2018].

Исследования напряженно-деформированного состояния с применением инструментальных методов на Сахалине не проводились. Ближайшие измерения были выполнены на Николаевском месторождении полиметаллических руд в восточном Приамурье [Барышников и др., 1982]. Было отмечено превышение горизонтальных напряжений над вертикальными, причем имела место анизотропия горизонтальных напряжений. Максимальные сжимающие напряжения на глубине до 850 м ориентированы по азимуту $120 \pm 20^\circ$ и не превышают 40 МПа. Район месторождения характеризуется повышенной сейсмической активностью и высоким градиентом скорости новейших вертикальных движений.

За основу были приняты результаты работы [Каменев и др., 2017б], полученные по результатам бурения глубоких скважин. Дальнейшие данные получены путем экстраполяции рассчитанных в верхних интервалах напряжений. Минимальное горизонтальное напряжение было принято в виде среднего

значения между максимальным горизонтальным и литостатическим напряжением исходя из локальной геодинамики.

В геодинамической обстановке большей части территории Сахалина литостатическое давление соответствует наименьшему из главных напряжений, характеризующему нормальную и сдвиговую компоненты. Такое предположение основано на геодинамических условиях, обуславливающих преобладание субширотного сжатия в результате взаимодействия Охотоморской и Амурской плит. В работах по проекту The World Stress Map [Heidbach et al., 2018] на карте напряжений для региона северо-востока Евразии отмечено преобладание режима горизонтального сжатия, что проявляется в преимущественно взбросовых подвижках в очагах землетрясений, полученных по решениям для фокальных механизмов очагов. Более детальная характеристика поля напряжений и деформаций по данным механизмов очагов землетрясений выбранного сегмента ЦСР представлена в работе [Татаурова, 2015]. Данные кавернометрии скважин Пильгун-Астохского месторождения [Али и др., 2002], расположенного на севере Сахалина, также демонстрируют преобладание горизонтального напряжения (субширотного сжатия) над вертикальным в интервале глубин 1800–2000 м. Согласно [Али и др., 2002], стенки исследуемой скважины имели выраженные обрушения в двух диаметрально противоположных угловых секторах по азимуту 160 и $340 \pm 10^\circ$, указывающих направление действия максимального сжатия/растяжения. Все это подтверждает соотношение главных напряжений $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, где σ_1 – наибольшее горизонтальное напряжение (сжатие), σ_2 – меньшая из двух компонент горизонтального напряжения, σ_3 – вертикальное напряжение.

Для разрабатываемой модели значения напряжений изменяются с ростом глубины в диапазоне σ_1 от 50 до 1500 МПа, σ_2 от 30 до 1000 МПа и σ_3 от 20 до 600 МПа. Сводные характеристики распределения геомеханических параметров и напряжений с ростом глубины в южной части Центрально-Сахалинского разлома представлены в таблице.

Сводные характеристики распределения геомеханических параметров и напряжений с ростом глубины в южной части Центрально-Сахалинского разлома

H, км	E, ГПа	μ	ρ , г/см ³	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа
1	1.20	0,28	1.90	50	30	20
2	2.43	0.28	2.00	100	70	40
3	4.00	0.28	2.12	150	110	60
4	6.16	0.28	2.29	200	140	80
5	12.67	0.28	2.46	250	180	100
6	12.67	0.28	2.60	300	210	120
7	12.67	0.28	2.66	350	250	140
8	12.67	0.28	2.72	400	280	160
9	12.67	0.28	2.73	450	310	180
10	12.67	0.28	2.75	500	350	200
20	26.73	0.27	2.76	1000	700	400
30	44.95	0.27	2.78	1500	1000	600

Расчетные значения горизонтальных и вертикального напряжений были сопоставлены с результатами исследования напряжений в сверхглубоких скважинах Кольская и КТВ [Brudy et al., 1997; Горбацевич, Савченко, 2009], при этом было получено удовлетворительное согласие данных. Необходимо отметить, что в настоящей работе не учитывается воздействие пластовых давлений.

Графическая модель создана в программе COMSOL Multiphysics. Основная работа по моделированию напряженно-деформированного состояния выбранного сегмента ЦСР также будет проводиться с использованием этого пакета программ.

Результаты и обсуждение

Для исходной модели рассматриваемого региона, представленного на рис. 2, проведены численные расчеты напряженно-деформируемого состояния при следующих допущениях.

1. Так как целью работы является общая оценка напряженного состояния среды и, в частности, определение напряжений на разломе, все геологические слои считаются горизонтальными, а разломы согласно глубинному разрезу района из [Невельское... , 2009].

2. При расчете напряжений мы не исключали движение среды как целого. Поэтому в работе на всех внешних границах исследуемого региона заданы свободные граничные условия.

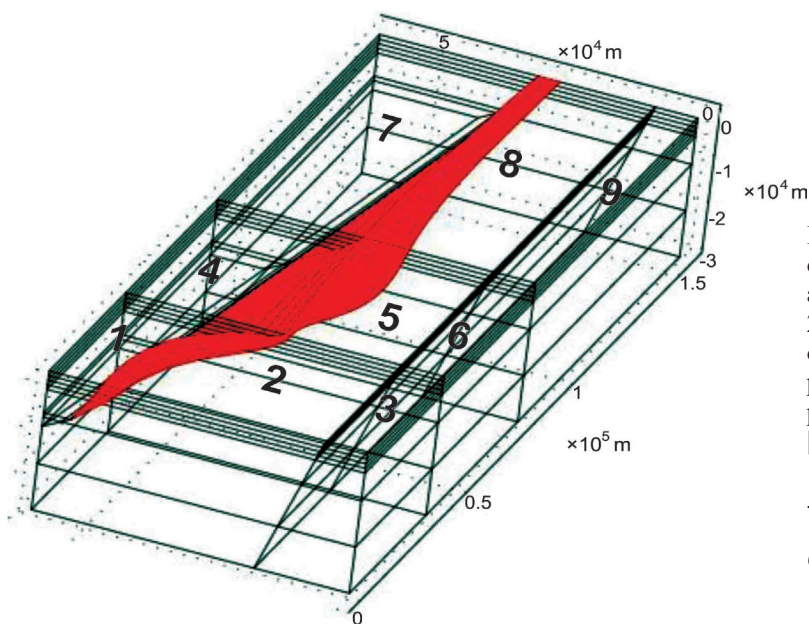


Рис. 2. Модель рассматриваемого региона. Красным цветом выделена область активного разлома согласно [Булгаков, 2002; Невельское... , 2009]. Цифрами обозначены вертикальные области с различными горизонтальными скоростями (в мм/г), согласно работе [Прытков, Василенко, 2018]: 1 – $V_e = 6$, $V_n = 0,5$; 2 – $V_e = 8,3$, $V_n = -0,4$; 3 – $V_e = 8,7$, $V_n = -0,8$; 4 – $V_e = 6,9$, $V_n = -0,4$; 5 – $V_e = 7,8$, $V_n = -0,45$; 6 – $V_e = 8,5$, $V_n = -0,5$; 7 – $V_e = 5,9$, $V_n = 0,4$; 8 – $V_e = 8$, $V_n = -0,4$; 9 – $V_e = 9$, $V_n = -0,5$.

3. Отдельно выделены 9 вертикальных областей с различными горизонтальными скоростями, согласно работе [Прытков, Василенко, 2018]. Эти данные принимаются за начальные условия для численной реализации в зависимости от времени (рис. 2).

4. Сделано предположение более низких значений главных напряжений в плоскости сместителя разлома по всей его глубине (рис. 2). Для главных напряжений были взяты их значения для глубины 1 км, согласно таблице. Данное предположение частично подтверждается в работе [Pijush, Zoback, 2008], в которой показано, что в зоне разлома линейная зависимость изменения значений главных напряжений является несколько приближенной.

На первом этапе численной реализации рассчитывалось напряженно-деформированное состояние, возникающее в рассматриваемой области в статическом режиме. Далее данное напряженно-деформированное состояние считалось начальным при реализации расчета при заданных горизонтальных скоростях для вертикальных областей.

Для описанного нами выше региона (рис. 2) произведены численные расчеты избыточных касательных напряжений, возникающих в течение 10 лет. За величину избыточного касательного напряжения принята такая скалярная мера, как интенсивность касательных напряжений по Мизесу.

Максимальная величина рассчитанных избыточных касательных напряжений, возник-

ающих в рассматриваемой области, концентрируется в зоне разлома. Так, максимальное значение 289 МПа соответствует глубине 9 км и постепенно снижается до минимальных значений на свободной поверхности (рис. 3А).

Географически зонам с повышенными значениями избыточных касательных напряжений в южной части зоны модели соответствуют зоны с населенными пунктами от пос. Кирилово до Петропавловского; в северной части – населенные пункты Стародубское и Долинск (рис. 1б). В центральной части, на небольших глубинах, получены относительно небольшие значения избыточных касательных напряжений в диапазоне от 7 до 10 МПа (рис. 3Б).

Данное распределение напряжений отражает общую кинематику ЦСР, которая характеризуется преимущественно взбросо-надвиговой природой. Области повышенных значений избыточных касательных напряжений соответствуют районам повышенной сейсмической активности (рис. 4). Эти области совпадают с районами интенсивного деформирования земной поверхности [Прытков, Василенко, 2018]. Результаты распределения напряжений, полученные на основе механизмов очагов землетрясений в работе [Татаурова, 2015], свидетельствуют о геодинамическом режиме субширотного сжатия, что подтверждается в нашей модели.

Из сопоставления рис. 3Б и 4 можно видеть, что области низких скоростей деформа-

ций коррелируют с зонами слабой и разреженной сейсмичности. Необходимо отметить, что относительно низкий уровень сейсмичности в окрестностях г. Южно-Сахалинск (рис. 1б) отражен в модели в невысоком уровне избыточных касательных напряжений.

Заключение

В работе получены первые результаты моделирования распределения напряженно-деформированного состояния в окрестности разлома. Подбор граничных условий, условий подобия геологической модели, геомеханических параметров, безусловно, может исказить истинную картину напряженно-деформированного состояния в зоне и окрестностях Центрально-Сахалинского разлома. Тем не менее полученные распределения интенсивности касательных напряжений соответствуют локальной геодинамической обстановке, выраженной в повышенной сейсмичности в зоне разлома. Известно, что большинство сейсмических событий выбранного сегмента ЦСР происходит в интервале глубин первого десятка километров, что соответствует выбранным границам модели.

Расчет избыточных касательных напряжений, возникающих в рассматриваемой области, показывает, что их максимальная величина концентрируется в зоне разлома. Максимальное значение избыточных касательных напряжений – 289 МПа соответствует глубине 9 км и постепенно снижается до минимальных значений на свободной поверхности. Результаты моделирования

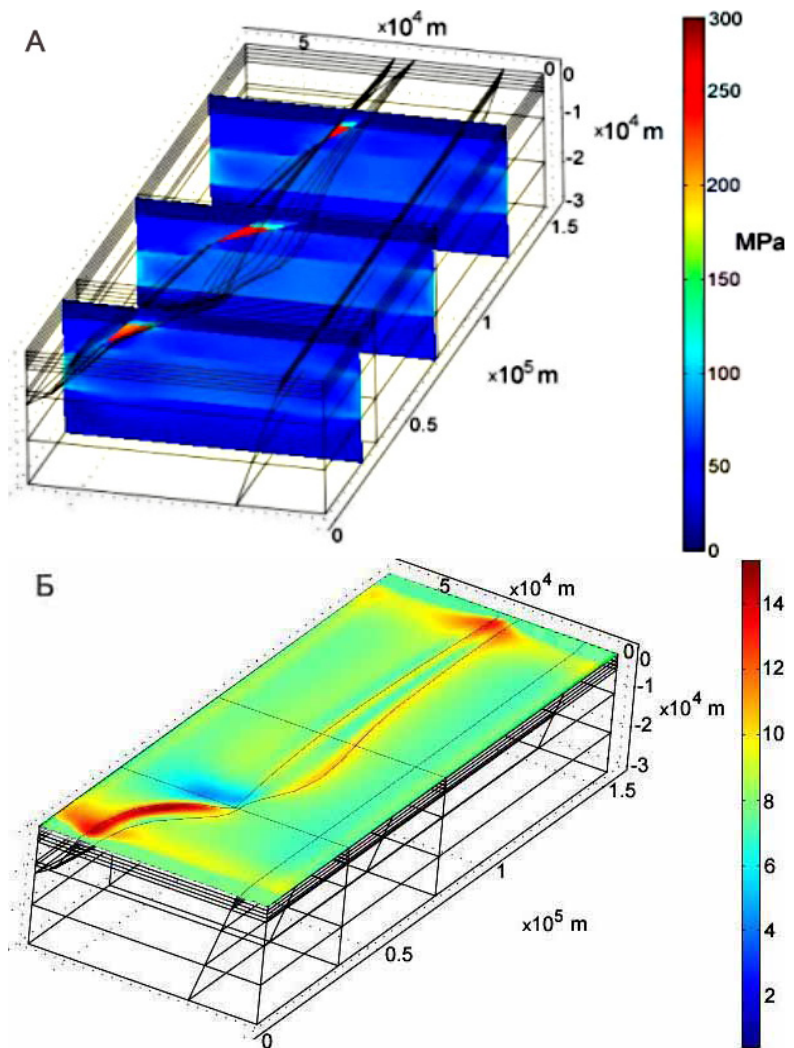


Рис. 3. Интенсивность избыточных напряжений по Мизесу в южном сегменте Центрально-Сахалинского разлома: А – распределение по глубине, Б – приповерхностные данные.

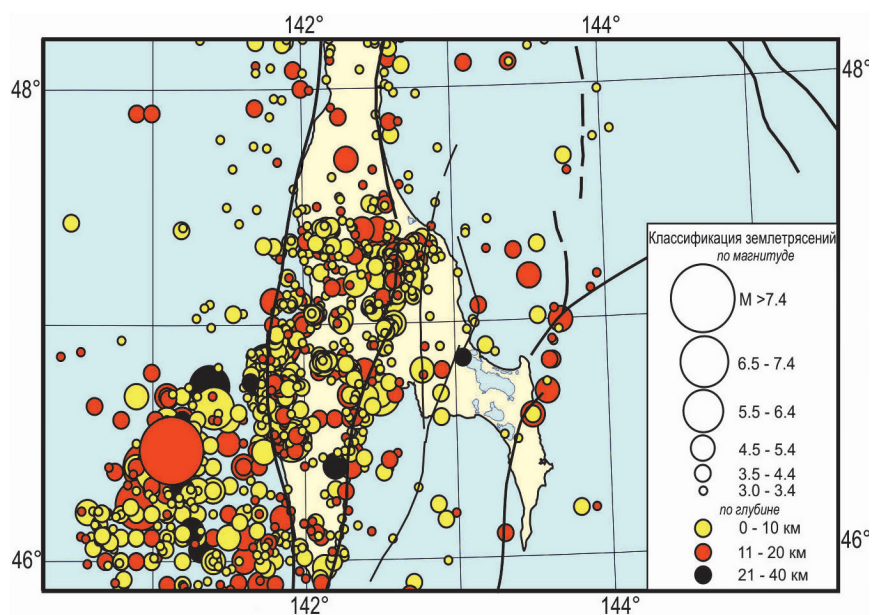


Рис. 4. Карта эпицентров землетрясений южной части о. Сахалин за период 1906–2016 гг. Линиями показаны основные разломы.

коррелируют как с данными распределения очагов землетрясений, так и с инструментальными данными современных приповерхностных деформаций. Совместное использование геомеханической модели, геофизических методов мониторинга области активного разлома и среднесрочного прогноза землетрясений различными методами позволяет выделять «проблемные» области разлома, оптимально использовать геофизическую аппаратуру для наблюдений. Это в перспективе даст возможность существенно повысить точность среднесрочного прогноза землетрясений [Каменев, 2019].

Данная работа отражает лишь первый этап создания геомеханической модели южного сегмента Центрально-Сахалинского разлома и первые полученные результаты. В дальнейшем предполагается продолжение работ по моделированию данной проблемной сейсмической зоны, уточнение и отладка модели. Общие подходы, использованные в статье, могут быть применимы к другим регионам со схожими геодинамическими условиями.

Список литературы

1. Али А.Х., Марти Ш., Еса Р. Передовой метод гидравлического разрыва пласта с использованием геомеханического моделирования и механики пород – технически интегрированный подход // *Нефтегазовое обозрение*. Осень 2002. С. 75–83.
2. Барышников В.Д., Курленя М.В., Леонтьев А.В. О напряженно-деформированном состоянии Николаевского месторождения // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 1982. № 2. С. 3–12.
3. Булгаков Р.Ф., Иващенко А.И., Ким Ч.У., Сергеев К.Ф., Стрельцов М.И., Кожурин А.И., Бесстрашнов В.М., Стром А.Л., Сузуки Я., Цуцуми Х., Ватанабе М., Уеки Т., Шимамото Т., Окумура К., Гото Х., Кария Я. Активные разломы северо-восточного Сахалина // *Геотектоника*. 2002. № 3. С. 66–86.
4. Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. *Неотектоника и активные разломы Сахалина*. М.: Наука, 2007. 187 с.
5. Горбачевич Ф.Ф., Савченко С.Н. Современные напряжения в северной части Балтийского щита по данным исследований Печенегского геоблока и разреза Кольской сверхглубокой скважины // *Геофизический журнал*. 2009. Т. 31, № 6. С. 41–54.
6. Ершов В.В. Флюидодинамические процессы в зоне Центрально-Сахалинского разлома (по результатам наблюдений на Южно-Сахалинском грязевом вул-

кане) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2012. Т. 3, № 4. С. 345–360. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-4-0078>

7. Закупин А.С., Богинская Н.В. Современная сейсмичность в районе Центрально-Сахалинского разлома (юг о. Сахалин): ложная тревога или отодвинутый прогноз? // *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 1. С. 27–34. doi:10.30730/2541-8912.2019.3.1.027-034

8. Каменев П.А. Комплексные исследования активности южной части Центрально-Сахалинского разлома // *Геодинамические процессы и природные катастрофы: тез. докл. III Всерос. науч. конф. с междунар. участием*. Южно-Сахалинск, 2019. С. 62.

9. Каменев П.А., Злобин Т.К. Распределение поля упругих напряжений в литосфере Охотоморского региона // *Тектоника, глубинное строение и геодинамика востока Азии: IV Косыгин. чтения (Хабаровск, 21–23 янв. 2003 г.)*. Хабаровск, 2003. С. 232–237.

10. Каменев П.А., Богомоллов Л.М., Валетов С.А. О методах оценок геомеханических параметров массивов осадочных пород «in situ» по данным каротажа // *Тихоокеанская геология*. 2012. Т. 31, № 6. С. 109–114.

11. Каменев П.А., Усольцева О.М., Цой П.А., Семенов В.Н., Сиволап Б.Б. Лабораторные исследования геомеханических параметров массивов осадочных пород юга Сахалина // *Геосистемы переходных зон*. 2017а. Т. 3, № 1. С. 30–36. doi:10.30730/2541-8912.2017.1.1.030-036

12. Каменев П.А., Богомоллов Л.М., Закупин А.С. О напряженном состоянии земной коры Сахалина по данным бурения глубоких скважин // *Тихоокеанская геология*. 2017б. Т. 36, № 1. С. 29–38. [Kamenev P.A., Bogomolov L.M., Zakupin A.S. On the stress state of the Sakhalin crust according to the data of drilling deep boreholes. *Russian J. of Pacific Geology*, 2017, 11(1): 25-33. doi:10.1134/S1819714017010043]

13. Кучай В.К. Современная орогенная структура южной части о. Сахалин // *Тихоокеанская геология*. 1987. № 1. С. 50–57.

14. Лившиц М.Х. Глубинное строение Сахалина по геофизическим данным // *Геофизический сборник*. Южно-Сахалинск, 1972. Вып. 24, № 2. С. 16–25.

15. Макаров Е.О., Фирстов П.П., Костылев Д.В., Рылов Е.С., Дудченко И.П. Первые результаты мониторинга подпочвенного радона сетью пунктов, работающей в тестовом режиме, на юге острова Сахалин // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2018. № 5(25). С. 99–114. doi:10.18454/2079-6641-2018-25-5-99-114

16. Мельников О.А. Дислокации и сейсмичность южной части зоны Тымь-Поронайского взбросо-надвига // *Тектоника, геодинамика, магматизм, металлогения и сейсмичность Тихоокеанского сегмента Земли*. Южно-Сахалинск: Ин-т морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2002. С. 50–87.

17. Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 года. О. Сахалин / под ред. Б.В. Левина, И.Н. Тихонова. М.: Янус-К, 2009. 204 с.

18. Никитенко О.А., Ершов В.В., Перстнева Ю.А., Бондаренко Д.Д., Балогланов Э.Э., Аббасов О.Р. Ве-

- ществленный состав продуктов деятельности грязевых вулканов Сахалина и Азербайджана: сравнительный анализ // *Геосистемы переходных зон*. 2018. Т. 2, № 4. С. 346–358. doi: 10.30730/2541-8912.2018.2.4.346-358
19. Прытков А.С., Василенко Н.Ф. Деформации земной поверхности острова Сахалин по данным GPS-наблюдений // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9, № 2. С. 503–514. doi:10.5800/GT-2018-9-2-0358
20. Прытков А.С., Василенко Н.Ф., Ершов В.В. Моделирование источника извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана в 2011 г. по данным GPS-наблюдений // *Тихоокеанская геология*. 2014. Т. 33, № 3. С. 79–87. [Prytkov A.S., Vasilenko N.F., Ershov V.V. Simulation of the 2011 South Sakhalin mud volcano eruption based on the GPS data. *Russian J. of Pacific Geology*, 2014, 8(3): 224-231. doi:10.1134/S1819714014030075]
21. Сапрыгин С.М. *Тектоника плит и сейсмичность в Дальневосточном регионе*. Южно-Сахалинск: Сахалин. кн. изд-во, 2005. 83 с.
22. Сафонов Д.А. *Динамика сейсмичности Южного Сахалина на основе современных инструментальных и макросейсмических данных*: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Южно-Сахалинск, 2008. 146 с.
23. Татаурова А.А. Поля напряжений и деформаций по данным механизмов коровых землетрясений о. Сахалин // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. 2015. Вып. 27, № 3. С. 92–101.
24. Brudy M., Zoback M.D., Fuchs K., Rummel F., Baumgärtner J. Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: Implication for crustal strength // *J. of Geophysical Research: Solid Earth*. 1997. Vol. 102. P. 18453–18475. <https://doi.org/10.1029/96jb02942>
25. Gardner G.H., Gardner L.W., Gregory A.R. Formation velocity and density – the diagnostic basics for stratigraphic traps // *Geophysics*. 1974. Vol. 39, N 6. P. 770–780. <https://doi.org/10.1190/1.1440465>
26. Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller B., Reinecker J., Reiter K., Tingay M., Wenzel F., Xie F., Ziegler M.O., Zoback M.L., Zoback M.D. The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales // *Tectonophysics*. 2018. Vol. 744. P. 484–498. doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007
28. Horsrud P. Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations // *SPE Drilling & Completion*. 2001. N 6. P. 68–73. <https://doi.org/10.2118/56017-pa>
29. Lin J., Stein R.S. Stress triggering in thrust and subduction earthquakes, and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults // *J. of Geophysical Research*. 2004. Vol. 109. B02303. <https://doi.org/10.1029/2003jb002607>
30. Pijush P., Zoback M. Wellbore-stability study for the SAFOD borehole through the San Andreas fault // *SPE Drilling & Completion*. 2008. Vol. 12. P. 394–408. <https://doi.org/10.2118/102781-pa>
29. Toda S., Stein R.S., Reasenber P.A., Dieterich J.H. Stress transferred by the Mw=6.5 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities // *J. of Geophysical Research*. 1998. Vol. 103(B10). P. 24543–24565. <https://doi.org/10.1029/98jb00765>

Сведения об авторах

КАМЕНЕВ Павел Александрович (ORCID 0000-0002-9934-5855), кандидат технических наук, старший научный сотрудник ЦКП, ЗАБОЛОТИН Андрей Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, ДЕГТЯРЕВ Владислав Анатольевич (ORCID 0000-0001-8922-3654), аспирант, ЖЕРДЕВА Ольга Андреевна (ORCID 0000-0003-4814-0865), младший научный сотрудник – лаборатория сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.