

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ НА О. САХАЛИН ПО ДАННЫМ GPS НАБЛЮДЕНИЙ

Н.Ф. Василенко, А.С. Прытков

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки 16, г. Южно-Сахалинск, 693022;
e-mail: vnf@imgg.ru*

Поступила в редакцию 12 ноября 2010 г.

Современная геодинамика Сахалина определяется схождением Евразийской и Североамериканской литосферных плит, что проявляется в высокой сейсмической активности острова. Методом инверсии горизонтальных скоростей земной поверхности островной суши с учетом геологических особенностей региона рассмотрены различные модели схождения литосферных плит. Это позволило оценить глубину залегания зоны механического контакта плит и установить скорости их схождения для юга, центральной части и севера острова.

Ключевые слова: горизонтальные скорости деформирования земной поверхности, GPS измерения, моделирование, о. Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

Остров Сахалин находится в зоне интенсивных деформаций земной поверхности, связанных с взаимодействием Евразийской и Североамериканской литосферных плит, скорость схождения (конвергенции) которых в различных моделях составляет от 7 до 14 мм/год [12, 13, 15, 17, 20, 21]. Граница плит отождествляется с системой главных субмеридиональных разломов острова: Северо-Сахалинским, Центрально-Сахалинским и Западно-Сахалинским [14, 24]. В зонах этих разломов проявляется высокая сейсмическая активность в виде мелкофокусных землетрясений, более 96 % которых происходит на глубинах до 20 км (рис. 1а) [4, 5].

Для изучения деформаций и смещений земной поверхности острова в 1999–2003 гг. созданы региональные сети геодинамических GPS наблюдений. По данным периодических измерений, на всем протяжении островной суши преобладают деформации субширотного сжатия, наиболее интенсивное накопление которых со скоростью ~6 мм/год отмечено в южной части [6]. Деформации правостороннего сдвига до 5 мм/год выявлены только на севере острова.

Межсейсмические скорости деформирования земной поверхности отражают процесс взаимодействия литосферных плит в условиях механически сомкнутой зоны контакта. Методом инверсии горизонтальных скоростей смещений земной поверхнос-

ти с учетом геологических особенностей региона рассмотрены различные модели схождения Евразийской и Североамериканской литосферных плит. Для юга, центральной части и севера Сахалина установлены скорость схождения и глубина зоны механического контакта плит. Эти параметры являются определяющими для оценки сейсмического потенциала острова.

АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ И СЕЙСМИЧНОСТЬ САХАЛИНА

В земной коре о. Сахалин и окружающих его акваторий выделяются три основные системы активных глубинных разломов, имеющих достаточно крутое западное падение (рис. 1б): Северо-Сахалинская, Центрально-Сахалинская и Западно-Сахалинская [2, 7–9, 11].

Северо-Сахалинская зона представлена субмеридиональной взбросо-сдвиговой системой разломов, протягивающейся вдоль охотоморского побережья острова. Ширина ее приразломных дислокаций достигает 7 км [7]. К Северо-Сахалинской зоне разломов приурочены Нефтегорское межплитовое землетрясение 1995 г. $M = 7.0$, в результате которого вскрылся Верхне-Пильтунский сейсморазрыв [3], и серия событий с $M = 5.0–6.0$.

Центрально-Сахалинская разломная зона простирается практически через всю территорию острова с севера на юг. Она выражена системой разрывов,

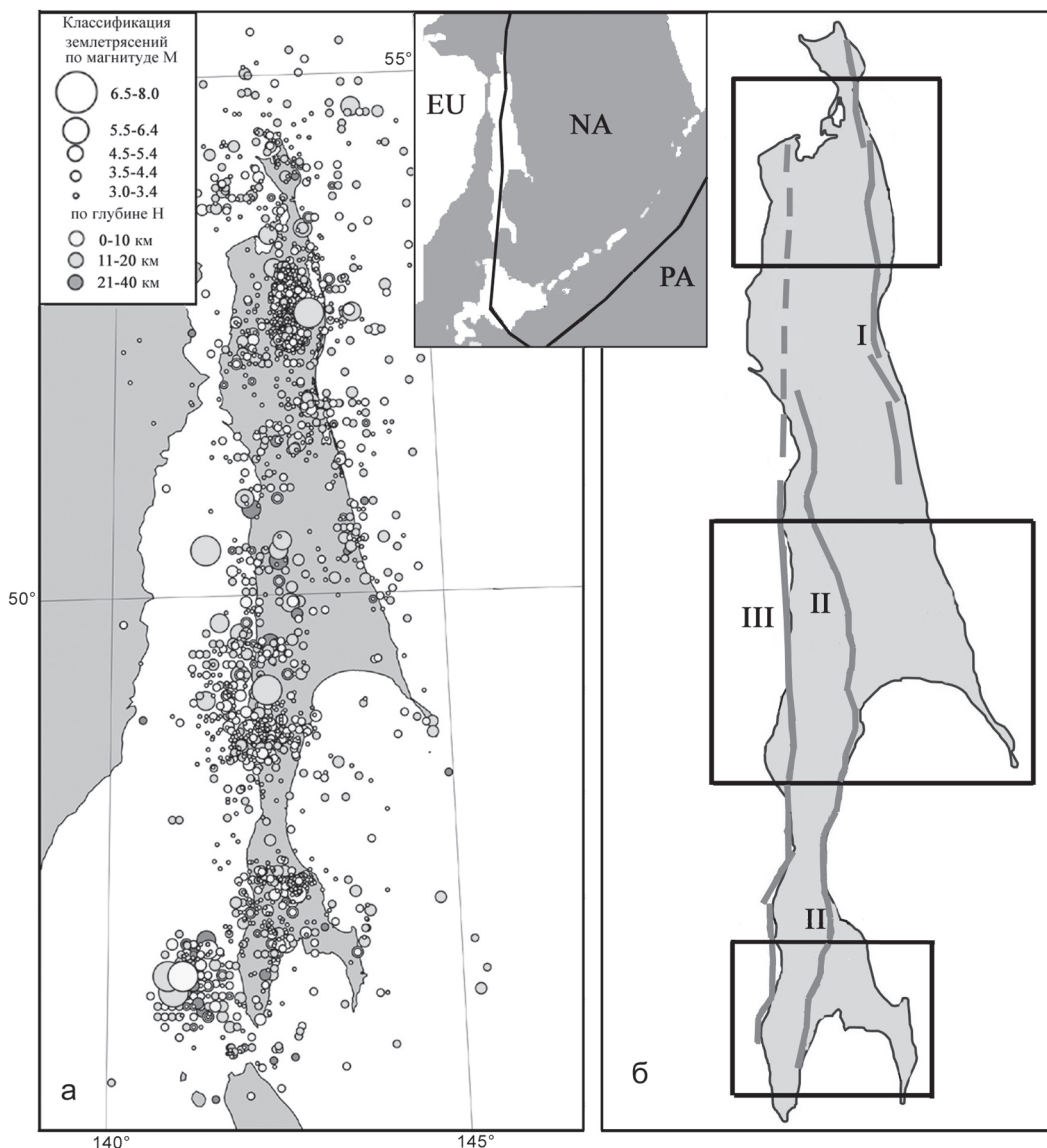


Рис. 1. Сейсмичность о. Сахалин за период 1906–2005 гг. [5] (а); схема основных активных разломов, по В.С. Рождественскому [8] (б).

I – Северо-Сахалинский, II – Центрально-Сахалинский, III – Западно-Сахалинский разломы. Прямоугольниками выделены районы региональных GPS наблюдений, показанные на рис. 2. На схеме-врезке приведены границы литосферных плит региона, согласно геологической модели NUVEL-1A [14]: EA – Евразийская, NA – Североамериканская, PA – Тихоокеанская литосферные плиты.

зон дробления и приразломных складок шириной до 10 км [1]. Кинематика в целом характеризуется взбросо-надвиговой природой. Сейсмическая активность Центрально-Сахалинской разломной зоны в настоящее время невысока. Однако по результатам палеосейсмологических исследований данная зона способна генерировать землетрясения с $M = 7.0-7.5$ [10].

Западно-Сахалинская разломная зона вытянута вдоль восточного побережья Татарского пролива и

проявляется в виде сети тесно связанных между собой сбросов и взбросов. В некоторых работах [2, 11] ее продолжение фиксируется на суше западного побережья северной части острова в виде погребенных разрывов. Ширина приразломных дислокаций составляет 10–15 км. Сейсмическая активность Западно-Сахалинской системы разломов достаточно высока. В ее пределах наблюдалось несколько землетрясений с $M > 6.5$, в том числе Монеронское землетрясение 1971 г. $M = 7.2$.

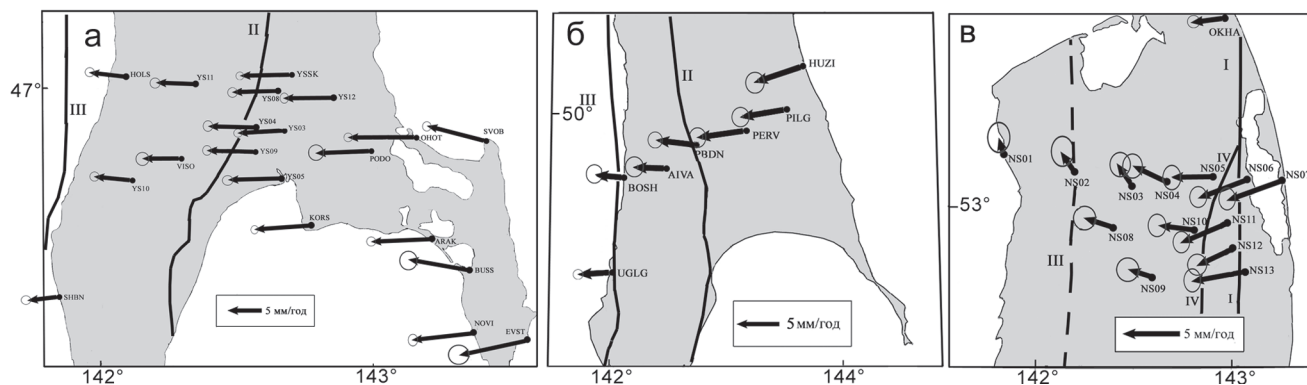


Рис. 2. GPS скорости горизонтальных деформаций земной поверхности о. Сахалин относительно Евразийской литосферной плиты.

а – юг острова (период наблюдений 1999–2009 гг.); б – центральная часть острова (период наблюдений 2000–2005 гг.); в – север острова (период наблюдений 2003–2006 гг.); I – Северо-Сахалинский, II – Центрально-Сахалинский, III – Западно-Сахалинский, IV – Верхне-Пильтунский разломы.

ДААННЫЕ GPS ИЗМЕРЕНИЙ

Для анализа скоростей деформирования земной поверхности в зоне схождения литосферных плит использованы данные GPS наблюдений на пунктах региональных геодинамических сетей севера, центра и юга о. Сахалин [6]. Измерения в сетях выполнялись периодически с частотой один раз в два-три года продолжительностью трое суток на каждом пункте наблюдений. Обработка измерений проведена с использованием специализированных пакетов программного обеспечения [18, 19]. Высокая точность результатов измерений достигается после учета различных поправок в процессе обработки.

Межсейсмические скорости горизонтальных смещений земной поверхности о. Сахалин вычислены относительно Евразийской плиты (рис. 2). Скорости пунктов увеличиваются с запада на восток, достигая максимальных значений около 9 мм/год на юге, 6 мм/год в центре и 5 мм/год на севере острова. Векторы скоростей имеют субширотное направление, практически перпендикулярное плитовой границе. Только в северной части острова наблюдаются небольшие компоненты правостороннего субмеридионального сдвига. Горизонтальные скорости пунктов YS10 и SHBN южной сети приведены за период 1999–2005 гг., поскольку на этих пунктах выявлены смещения в результате Невельского землетрясения 2007 г. $M = 6.2$.

МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЗОНЕ КОНВЕРГЕНЦИИ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

Деформации земной поверхности в зоне конвергенции литосферных плит можно смоделировать

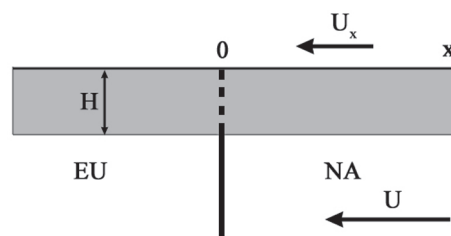


Рис. 3. Схематическая модель взаимодействия литосферных плит.

для однородной изотропной упругой среды, разделенной вертикальной плоскостью (рис. 3). Решение двумерной задачи в виде профиля скоростей U_x на поверхности (вдоль оси x , перпендикулярной плитовой границе) имеет вид [22]:

$$U_x = \frac{U}{\pi} \left(\frac{xH}{x^2 + H^2} - \arctan \frac{x}{H} + \frac{\pi}{2} \right), \quad (1)$$

где U – скорость конвергенции, перпендикулярная границе плит, H – глубина залегания зоны механического контакта плит, x – расстояние до границы плит.

В работе [16] рассмотрена возможность представления границы литосферных плит в виде нескольких разломов, на каждом из которых происходит накопление деформаций в результате взаимодействия плит. В этом случае сумма скоростей на каждом разломе представляет скорость схождения плит. Тогда, для границы плит, представленной в виде двух разломов, имеем:

$$U_x = \frac{U_1}{\pi} \left(\frac{x_1 H_1}{x_1^2 + H_1^2} - \arctan \frac{x_1}{H_1} + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{U_2}{\pi} \left(\frac{x_2 H_2}{x_2^2 + H_2^2} - \arctan \frac{x_2}{H_2} + \frac{\pi}{2} \right), \quad (2)$$

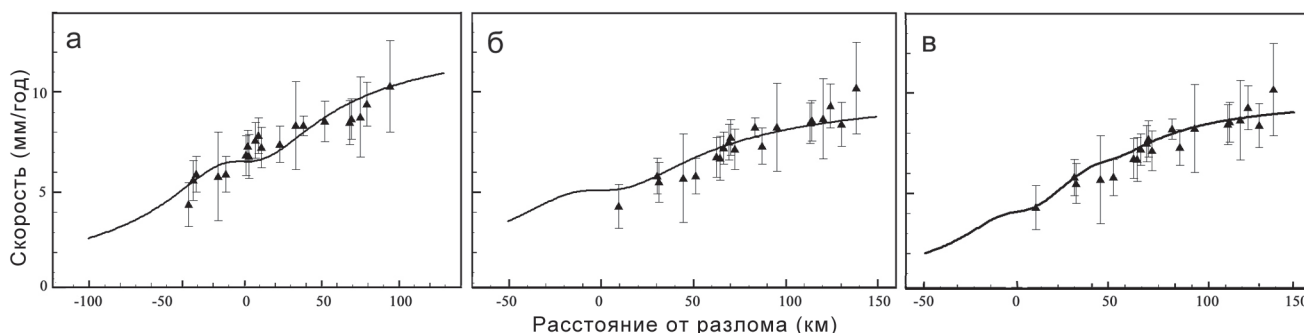


Рис. 4. Наилучшее решение для измеренных и модельных скоростей деформирования земной поверхности юга о. Сахалин.

а – граница плит проходит по Центрально-Сахалинскому разлому: скорость схождения плит – 13.1 мм/год, глубина контакта – 35 км; б – граница плит проходит по Западно-Сахалинскому разлому: скорость схождения плит – 10.4 мм/год, глубина контакта – 36 км; в – модель с двумя разломами: скорость схождения плит – 10.2 мм/год, глубина контакта – 20 км для Центрально-Сахалинского и 22 км – для Западно-Сахалинского разлома. Начало координат – от Западно-Сахалинского разлома. Модельные скорости изображены сплошной линией, измеренные скорости с одной среднеквадратической ошибкой изображены треугольниками.

где U_1 , H_1 и x_1 – скорость конвергенции, глубина залегания зоны механического контакта и расстояние до первого разлома, соответственно; U_2 , H_2 и x_2 – скорость конвергенции, глубина залегания зоны механического контакта и расстояние до второго разлома.

Сопоставление модельных и измеренных скоростей позволяет решить обратную задачу: для каждого района исследований определить скорость схождения плит и оценить глубину их сцепления. Для этого необходимо минимизировать среднеквадратическую невязку измеренных и модельных смещений, которая может быть выполнена численными методами поиска минимума функции нескольких переменных:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - U_i)^2}{\sigma_i^2} \rightarrow \min,$$

где y_i – измеренные, U_i – модельные скорости пунктов, σ_i^2 – ошибка измерений, N – количество пунктов наблюдений.

Для доверительного интервала 95 % ($p = 0.05$) оценка параметров модели имеет вид [16]:

$$\chi_{95\%}^2 = \chi^2 \left[1 + \left(\frac{K}{N - K} \right) F \right],$$

где K – количество неизвестных параметров модели, N – число данных, F – уровень значимости для чисел K и N .

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для каждой региональной сети рассмотрены три варианта расположения плитовых границ. Для юга и центра острова построены модели с границей плит, проходящей по Центрально-Сахалинскому, За-

падно-Сахалинскому разлому и совместно с двумя разломами. В северной части о. Сахалин рассмотрены модели с границей по Северо-Сахалинскому, с границей по предполагаемому продолжению Западно-Сахалинского разлома и модель с двумя разломами. Сравнение результатов моделирования выполнено с использованием F -критерия [23]:

$$F = \frac{[\chi^2(r) - \chi^2(p)] / (p - r)}{\chi^2(p) / (N - p)},$$

где параметр $\chi^2(r)$ соответствует наилучшему решению для первой модели, $\chi^2(p)$ – наилучшему решению для второй модели, p и r – количество оцениваемых параметров, $N - p$ – число степеней свободы.

В южной части о. Сахалин (рис. 4, табл.) для границы литосферных плит, проходящей по Центрально-Сахалинскому разлому, наилучшее по параметру χ^2 решение получено при глубине залегания зоны механического контакта 35 км и скорости схождения 13.1 мм/год ($\chi^2 = 8.4$). Зона механического контакта для Западно-Сахалинского разлома имеет глубину 36 км при скорости схождения плит 10.4 мм/год ($\chi^2 = 4.9$). Моделирование деформаций земной поверхности для границы плит, представленной в виде двух разломов, улучшает оценку χ^2 до 2.9. При этом скорость схождения плит на юге острова составляет 10.2 мм/год, а глубина залегания разломов ~20 км. Величины F -критерия 15.28 и 5.56 на уровне выше 95 % критического значения 3.49 свидетельствуют, что граница плит в виде двух разломов отличается от моделей с одним разломом. Таким образом, для южной части о. Сахалин наилучшее согласование изме-

Таблица. Результаты моделирования взаимодействия Евразийской и Североамериканской литосферных плит.

Граница литосферных плит	Скорость схождения плит и оценка, мм/год	Глубина контакта и ее оценка, км	Число измерений, N	χ^2	Число степеней свободы, $N-p$	Значение F -критерия
Юг острова						
Центрально-Сахалинский разлом	13.1 ^{+0.6} _{-0.6}	35 ⁺¹¹ ₋₇	20	8.4	18	15.28
Центрально-Сахалинский и Западно-Сахалинский разломы	3.5 ^{+0.4} _{-0.4} 6.7 ^{+0.3} _{-0.3}	20 ⁺¹² ₋₇ 22 ⁺⁶ ₋₄		2.9	16	5.56
Западно-Сахалинский разлом	10.4 ^{+0.4} _{-0.4}	36 ⁺⁶ ₋₅		4.9	18	
Центральная часть острова						
Центрально-Сахалинский разлом	9.5 ^{+1.1} _{-1.0}	43 ⁺²⁹ ₋₁₃	7	0.52	5	-
Центрально-Сахалинский и Западно-Сахалинский разломы	1.0 ^{+0.3} _{-1.0} 7.0 ^{+0.6} _{-0.7}	40* 31 ⁺²¹ ₋₁₁		0.20	3	
Западно-Сахалинский разлом	8.1 ^{+0.5} _{-0.5}	37 ⁺¹³ ₋₁₁		0.21	5	
Север острова						
Северо-Сахалинский разлом	7.8 ^{+1.1} _{-1.0}	13 ⁺⁷ ₋₅	13	1.2	11	0.35
Северо-Сахалинский и Западно-Сахалинский разломы	7.5 ^{+1.3} _{-1.3} 0.3 ^{+0.8} _{-0.7}	13 ⁺⁹ ₋₆ 14*		1.3	9	10.07
Западно-Сахалинский разлом	4.6 ^{+1.0} _{-1.0}	15 ⁺²⁰ ₋₁₀		4.2	11	

Примечание. Оценка параметров моделей выполнена для доверительного интервала 95 % ($p = 0.05$). * – в пределах доверительного интервала оценка невозможна.

ренных и модельных скоростей соответствует границе плит, представленной в виде двух разломов.

В центральной части острова (рис. 5, табл.) для небольшого набора исходных данных (7 пунктов наблюдений) на настоящем этапе исследований модель в виде границы плит с двумя разломами сопоставима с моделью для Западно-Сахалинского разлома ($\chi^2 \sim 0.2$), в то время как для границы плит, проходящей по Центрально-Сахалинскому разлому, величина χ^2 оставляет 0.52. Скорость схождения плит около 8 мм/год.

На севере острова наилучшая оценка $\chi^2 = 1.2$ получена для границы плит, проходящей по Северо-Сахалинскому разлому. Скорость схождения плит составляет 7.8 мм/год при глубине зоны механического контакта 13 км (рис. 6, табл.). Для модели с границей плит, представленной в виде двух разломов (Северо-Сахалинский и продолжение Западно-Сахалинского разлома), оценка $\chi^2 = 1.3$. Однако решение с границей по Северо-Сахалинскому разлому не отличается

от модели с двумя разломами ($F = 0.35$ существенно ниже 95 % уровня критического значения 3.81). С другой стороны, F -критерий различия свидетельствует, что модель с двумя разломами на уровне выше 95 % отличается от модели с границей по Западно-Сахалинскому разлому. Следовательно, на севере острова для скоростей, перпендикулярных плитовой границе, предпочтительнее модель с границей, проходящей по Северо-Сахалинскому разлому.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом инверсии горизонтальных скоростей деформирования земной поверхности юга, центральной части и севера острова Сахалин с учетом геологических особенностей региона рассмотрены различные модели схождения Евразийской и Североамериканской литосферных плит.

На юге острова наилучшее согласование измеренных и модельных скоростей получено для грани-

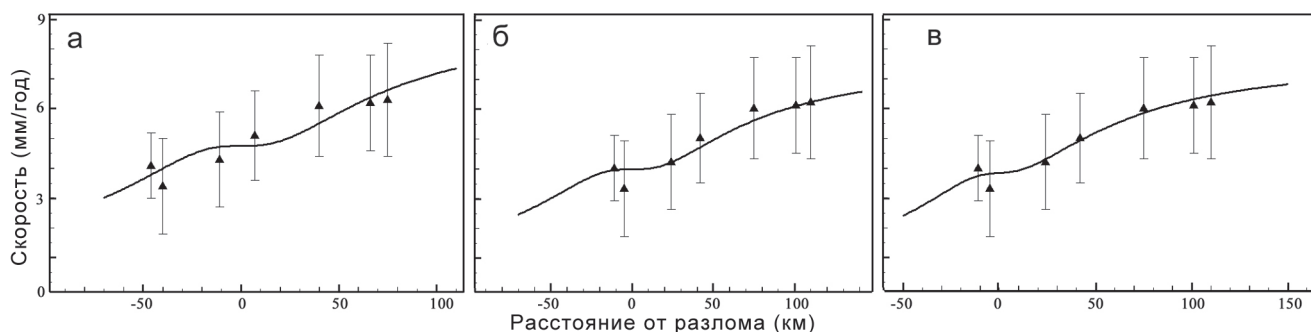


Рис. 5. Наилучшее решение для измеренных и модельных скоростей деформирования земной поверхности центральной части о. Сахалин.

а – граница плит проходит по Центрально-Сахалинскому разлому: скорость схождения плит – 9.5 мм/год, глубина контакта – 43 км; б – граница плит проходит по Западно-Сахалинскому разлому: скорость схождения плит – 8.1 мм/год, глубина контакта – 37 км; в – модель с двумя разломами: скорость схождения плит – 8.0 мм/год, глубина контакта – 40 км для Центрально-Сахалинского и 31 км – для Западно-Сахалинского разлома. Начало координат – от Западно-Сахалинского разлома. Модельные скорости изображены сплошной линией, измеренные скорости с одной среднеквадратической ошибкой изображены треугольниками.

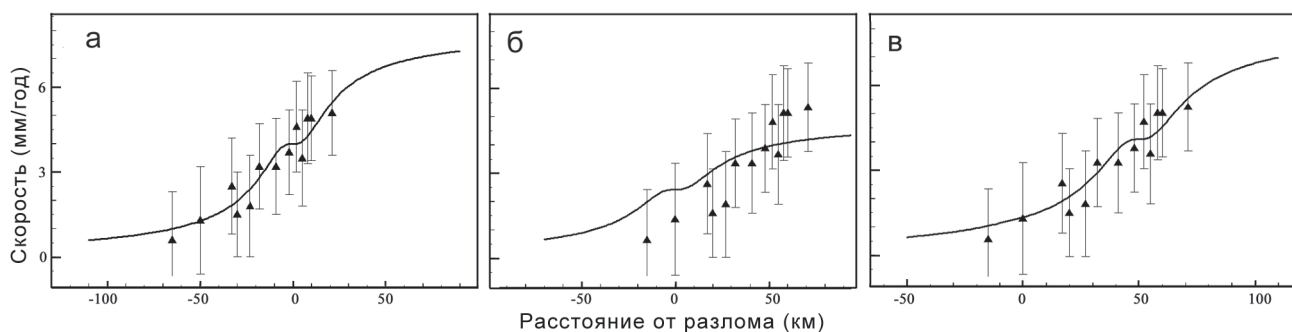


Рис. 6. Наилучшее решение для измеренных и модельных скоростей деформирования земной поверхности севера о. Сахалин.

а – граница плит проходит по Северо-Сахалинскому разлому: скорость схождения плит – 7.8 мм/год, глубина контакта – 13 км; б – граница плит проходит по Западно-Сахалинскому разлому: скорость схождения плит – 4.6 мм/год, глубина контакта – 15 км; в – модель с двумя разломами: скорость схождения плит – 7.8 мм/год, глубина контакта – 13 км для Северо-Сахалинского и 14 км – для Западно-Сахалинского разлома. Начало координат – от Западно-Сахалинского разлома. Модельные скорости изображены сплошной линией, измеренные скорости с одной среднеквадратической ошибкой изображены треугольниками.

цы плит, представленной двумя разломами: Центрально-Сахалинским и Западно-Сахалинским. Относительно Евразии скорость схождения плит составляет 10.2 мм/год при глубине зоны механического контакта разломов ~20 км.

Для центральной части о. Сахалин построить корректную модель, имея ограниченное количество данных, не представляется возможным. На настоящем этапе исследований предпочтительнее модель в виде границы с двумя разломами: Центрально-Сахалинским и Западно-Сахалинским. Скорость схождения плит для этого района составляет 8.0 мм/год, глубина зоны механического контакта разломов – 30–40 км.

Деформации земной поверхности северной части острова наилучшим образом согласуются с модель-

ным решением для границы литосферных плит, проходящей по Северо-Сахалинскому разлому. Скорость схождения плит – 7.8 мм/год, глубина контакта – 13 км.

Полученные скорости схождения Евразийской и Североамериканской литосферных плит на о. Сахалин в пределах точности их определения (~1 мм/год) согласуются с моделями взаимодействия плит, построенными в последние годы на основе данных глобальных геодезических сетей [17, 20, 21].

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ, грант МК-4575.2011.5, РФФИ, грант 08-05-00197-а и Президиума ДВО РАН, грант 10-III-B-08-225.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров С.М. Остров Сахалин (История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока). М.: Наука, 1973. С. 24–26.
2. Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. Неотектоника и активные разрывы Сахалина. М.: Наука, 2007. 186 с.
3. Нефтегорское землетрясение 27(28) мая 1995 г. // Информ.-аналит. бюл. ФССН; Спец. вып. М., 1995. 236 с.
4. Оскорбин Л.С. Сейсмичность Сахалина // Сейсмическое районирование Сахалина. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 3–22.
5. Поплавская Л.Н., Иващенко А.И., Оскорбин Л.С. и др. Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 103 с.
6. Прытков А.С. Современные движения земной коры Сахалино-Курильского региона и моделирование геодинамических процессов по данным GPS наблюдений: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2008. 24 с.
7. Рождественский В.С. Сдвиги Северо-Восточного Сахалина // Геотектоника. 1975. № 2. С. 85–97.
8. Рождественский В.С. Геодинамическая эволюция Хоккайдо-Сахалинской складчатой системы // Тихоокеан. геология. 1993. № 2. С. 76–88.
9. Соловьев С.Л., Оскорбин Л.С. Схема сейсмического районирования Сахалина // Сейсмическое районирование Сахалина. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 52–61.
10. Стрельцов М.И., Кожурин А.И. Активные разломы и катастрофические землетрясения Сахалина (Апреловский активный разлом, результаты тренченга). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2002. 4 с.
11. Харахинов В.В., Гальцев-Безюк С.Д., Терещенков А.А. Разломы Сахалина // Тихоокеан. геология. 1984. № 2. С. 77–86.
12. Altamimi Z., Sillard P., Boucher C. ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications // J. Geophys. Res. 2002. V. 107(B10). 2214, doi:10.1029/2001JB000561.
13. Apel E.V., Burgmann R., Steblov G. et al. Independent Active Microplate Tectonics of Northeast Asia from GPS velocities and Block Modeling // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L11303, doi: 10.1029/2006GL026077.
14. Chapman M.E., Solomon S.C. North American-Eurasian plate boundary in northeast Asia // J. Geophys. Res. 1976. V. 81. P. 921–930.
15. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F. et al. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21, N 20. P. 2191–2194.
16. Dixon T., Decaix J., Farina F. et al. Seismic cycle and rheological effects on estimation of present-day slip rate for the Agua Blanca and San Miguel-Vallecitos faults, northern Baja California, Mexico // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N. B10. P. 2226–2249.
17. Drewes H. The Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model APKIM2005 as basis for a non-rotating ITRF, Geodetic Reference Frames / H. Drewes (Ed.), IAG Symposia, 134, 95-99, Springer, doi:10.1007/978-3-642-00860-3_15, 2009.
18. Hugentobler U., Schafer S., Fridez P. Bernese GPS Software Version 4.2. Astronomical Institute of University of Berne. 2001. 515 p.
19. King R.W., Bock Y. Documentation for the GAMIT GPS analysis software, Release 10.0 – December 2000. MIT, 2002.
20. Kogan M.G., Steblov G.M. Current global plate kinematics from GPS (1995–2007) with the plate consistent reference frame // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. B04416. DOI:10.1029/2007JB005353.
21. Kreemer C., Holt W.E., Haines A.J. An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation // Geophys. J. Int. 2003. V. 154. P. 8–34.
22. Shimazaki K., Zhao Y. Dislocation model for strain accumulation in plate collision zone // Earth Planets Space. 2000. V. 52, N 11. P. 1091–1094.
23. Stein S., Gordon R.G. Statistical tests of additional plate boundaries from plate motion inversions // Earth Planet. Sci. Lett. 1984. N 69(2). P. 401–412.
24. Zonenshain L.P., Savostin L.A. Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia // Tectonophysics. 1981. V. 76. P. 1–45.

Рекомендована к печати Б.В. Левиным

N.F. Vasilenko, A.S. Prytkov

Modeling of the lithosphere plates interaction in Sakhalin Island from GPS data

Recent geodynamics of Sakhalin Island is defined by the convergence of the Eurasian and North American lithosphere plates, which is manifested in high seismic activity of the island. Different models of lithosphere plates convergence were constructed using the inversion method of horizontal GPS velocities of the island Earth's surface with account of regional geological particularities. This makes it possible to assess the depth of mechanical plate contacts zone and to determine plate convergence velocities for the southern, central and northern parts of the Sakhalin Island.

Key words: horizontal velocities of the Earth's surface deformations, GPS measurements, modeling, Sakhalin Island.