

ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ О. САХАЛИН ПО ДАННЫМ GPS НАБЛЮДЕНИЙ

А.С. Прытков, Н.Ф. Василенко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, a.prytkov@imgg.ru

Введение

Современная геодинамика острова Сахалин определяется взаимодействием Евразийской (Амурской) и Североамериканской (Охотской) литосферных плит, скорость конвергенции которых в различных геодинамических моделях увеличивается с севера на юг, достигая максимальных значений в пределах островной суши 13 мм/год. Граница плит отождествляется с системой главных субмеридиональных разломов острова: Хоккайдо-Сахалинским, Центрально-Сахалинским и Западно-Сахалинским [1, 10, 14]. Взаимодействие литосферных плит проявляется не только в виде высокой коровой сейсмичности, более 96% которой сосредоточено на глубинах до 20 км, а также в интенсивном неоднородном деформировании земной поверхности в окрестности разломных зон.

Напряженно-деформированное состояние земных недр является отражением характера современных тектонических процессов в Сахалинском регионе. Реконструкция полей напряжений и деформаций земных недр необходима для обоснованного выделения особенностей их состояния и областей возможных очагов землетрясений. Для Сахалина это особенно важно, так как регион характеризуется высокой сейсмической активностью.

Данные о скоростях смещений земной поверхности, которые отражают процессы, протекающие на глубине, являются дополнительным источником информации о напряженно-деформированном состоянии среды. В последние годы основным методом изучения современных движений являются спутниковые GPS/ГЛОНАСС наблюдения. В отличие от других методов, геодезические данные позволяют не только отслеживать изменение напряженного состояния, но и дают количественные оценки деформационных процессов. В настоящей работе представлены результаты моделирования деформационного состояния острова Сахалин, выполненного на основе межсейсмических скоростей смещений земной поверхности, а также проведено сопоставление полученных результатов с пространственным распределением сейсмичности и разломной тектоники острова.

Активные разломы и сейсмичность острова Сахалин

Для анализа сейсмичности острова построена карта эпицентров землетрясений с $M \geq 3.0$ за период 1905-2016 гг. (рис. 1). В основу карты легли данные регионального каталога землетрясений Сахалина за период 1905-2005 гг. [6], результаты детальных сейсмологических наблюдений на севере [3] и юге острова [11]. Сейсмичность острова отличается неоднородным характером распределения землетрясений, гипоцентры которых главным образом сосредоточены в земной коре на глубинах до 20 км (рис. 1). Выделяются три района – южный, центральный и северный с наибольшим числом землетрясений, разделенных участками с редкими эпицентрами сравнительно слабых землетрясений. На севере Сахалина наибольшая концентрация эпицентров наблюдается вдоль северо-восточного побережья, в то время как в центральной и южной частях повышенная активность приурочена к западному побережью. Между тем, в центре и на юге острова отчетливо прорисовываются области пониженной сейсмичности, которые, по мнению Мельникова О.В. [4], приурочены к древним видоизменено-реликтовым антиклиналиям (древнейшим геологическим структурам).

Характерной особенностью распределения сейсмичности является ее связь с современной тектонической активностью главных субмеридиональных разломов острова и их оперений. В земной коре Сахалина и окружающих его акваторий выделяются три основных системы разломов: Хоккайдо-Сахалинская, Центрально- и Западно-Сахалинская.

Хоккайдо-Сахалинская зона представлена субмеридиональной взбросо-сдвиговой системой разломов, протягивающейся вдоль Охотоморского побережья. К этой зоне разломов приурочены Нефтегорское землетрясение 1995 г. $M_w = 7.1$, в результате которого вскрылся Верхне-Пильтунский сейсморазрыв [5], и серия сейсмических событий с $M = 5.0-6.0$. Центрально-Сахалинский разлом простирается практически через всю территорию острова с севера на юг. Кинематика разлома в

целом характеризуется взбросо-надвиговой природой. Сейсмическая активность разломной зоны в настоящее время невысока. Однако по результатам палеосейсмологических исследований разлом способен генерировать землетрясения с $M = 7.0-7.5$ [8]. Западно-Сахалинская разломная зона вытянута вдоль восточного побережья Татарского пролива и проявляется в виде сети тесно связанных между собой сбросов и взбросов. Сейсмическая активность разломов достаточно высока. В ее пределах наблюдалось несколько сильных землетрясений, в том числе Углегорское 2000 г. $M_w = 7.0$ и Невельское 2007 г. $M_w = 6.2$.

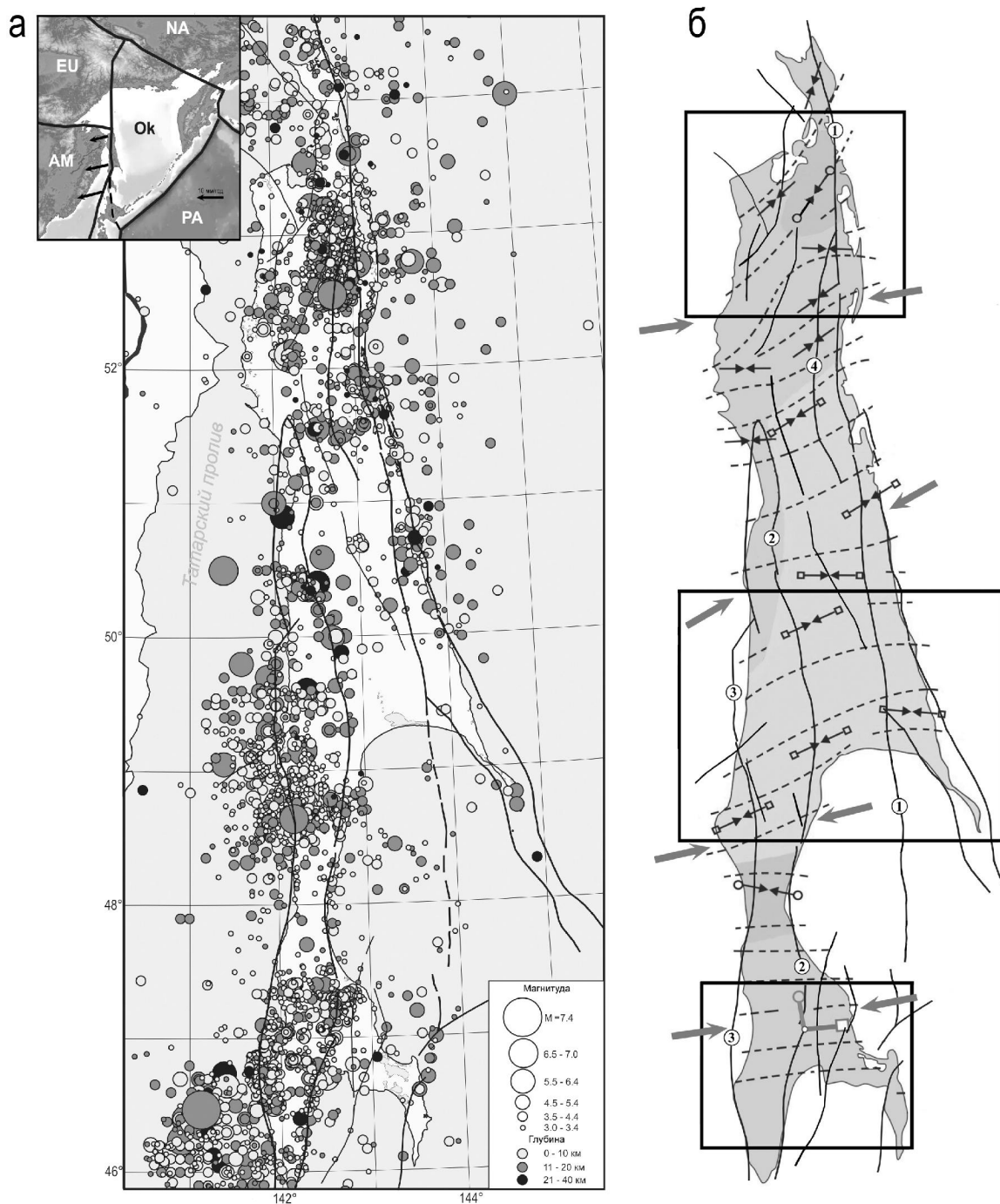


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений о. Сахалин за период 1906-2016 гг. и основные разломы по В.В. Харахинову [9] (а). Схема районирования областей с разной геодинамической обстановкой [7] (б). Направление регионального тензора напряжений сжатия по данным механизмов очагов землетрясений за 1962-2011 гг. с $M \geq 4.6$ показано крупными серыми стрелками [2]. Основные разломы (цифры в кружках): 1 - Хоккайдо-Сахалинский, 2 - Центрально-Сахалинский, 3 - Западно-Сахалинский, 4 - Верхне-Пильтунский. Прямоугольниками выделены районы региональных GPS наблюдений. На схеме-врезке приведены границы литосферных плит региона согласно геологической модели NUVEL-1A: EA - Евразийская, NA - Североамериканская, PA - Тихоокеанская литосферные плиты.

Результаты GPS измерений

Для изучения современной геодинамики о. Сахалин в 1999-2003 гг. на юге, в центральной части и на севере острова были созданы региональные сети периодических GPS наблюдений (рис. 2а, 3а, 4а). Геодезические сети представляют собой поперечные профили, пересекающие островную сушу с запада на восток. Такая геометрия сетей определялась из тектонических особенностей региона, а сгущение на севере и юге острова продиктовано необходимостью оценки относительных смещений отдельных структурных элементов. К 2013 г. на объектах проведены 4-6 эпох повторных измерений продолжительностью не менее трех суток на каждом пункте наблюдений. Результаты измерений представлены относительно Евразийской литосферной плиты. Векторы межсейсмических горизонтальных скоростей смещений земной поверхности Сахалина легли в основу реконструкции полей деформаций.

Геодинамические GPS наблюдения на поперечном профиле северной части о. Сахалин и пунктах, контролирующих окрестности Верхне-Пильтунского сейсморазрыва, позволили установить характер деформирования земной поверхности после Нефтегорского землетрясения 1995 г. Постепенное увеличение скоростей пунктов сети наблюдается с запада на восток от 1.2 до 5.1 мм/год. В восточной части сети на границе Верхне-Пильтунского разлома скорости пунктов меняют западное направление на юго-западное, при этом скорость правостороннего смещения достигает 3.5 мм/год.

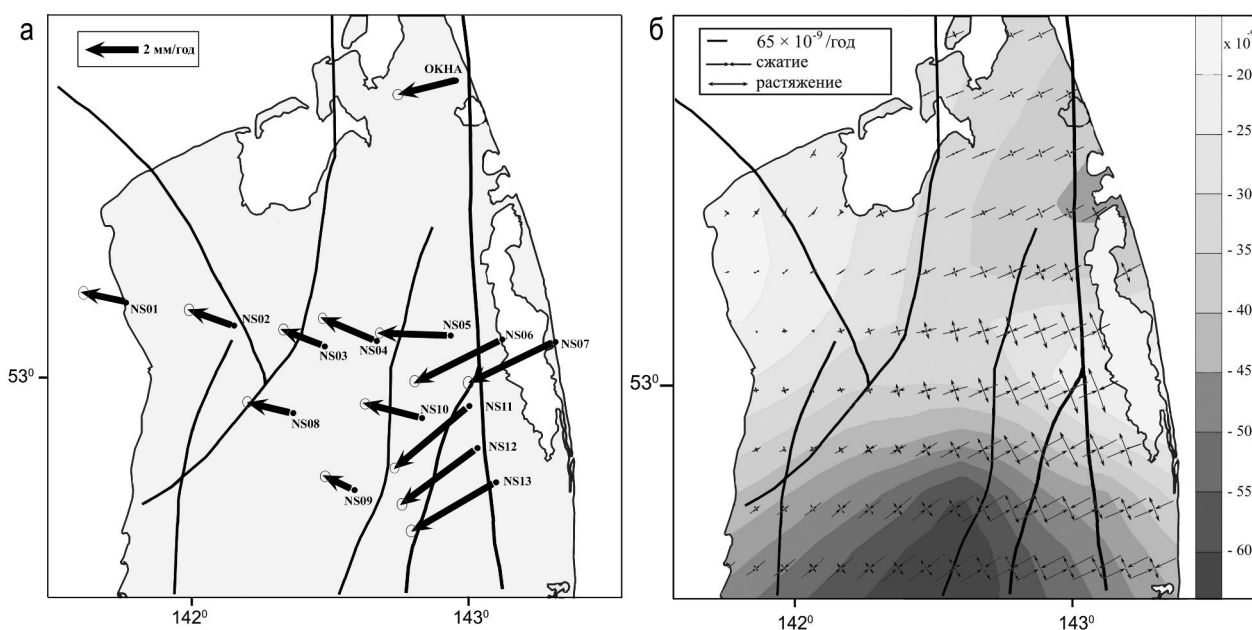


Рис. 2. Горизонтальные скорости GPS пунктов северной части о. Сахалин относительно Евразийской литосферной плиты за период 2003-2013 гг. (а). Скорости дилатации и главных деформаций (б).

Здесь и далее: эллипсы ошибок скоростей соответствуют 95% доверительному интервалу, линиями показаны разломы.

В центре и юге острова межсейсмические скорости пунктов возрастают с запада на восток, достигая максимальных значений 6 и 9 мм/год, соответственно. В отличие от центральной части острова, где векторы скоростей имеют юго-западное направление смещений, на юге острова направление скоростей практически перпендикулярно границе литосферных плит. Уменьшение скоростей в западном направлении свидетельствует о сжатии островной суши и интерпретируется как одна из причин накопления напряжений на границе литосферных плит.

Деформации земной поверхности по данным GPS наблюдений

Деформации земной поверхности острова Сахалин вычислены с помощью программного пакета GRID_STRAIN [13]. В качестве исходных данных для расчета использовались оценки горизонтальных скоростей смещений и погрешности их определения. Расчет деформаций выполняется по узлам регулярной сетки, в каждом узле которой определяется локальная деформация с использованием подходящей стратегии взвешивания. При этом все доступные наблюдения включаются в вычислительную процедуру, но их ошибки масштабируются с помощью специальной весовой функции $f = e^{-di/d0}$, которая характеризует степень значимости i -й станции в зависимости от расстояния до заданной точки di , $d0$ – масштабный параметр [12]. Таким образом, уменьшается вклад

точек наблюдения по мере их удаления от узла расчета. В наших расчетах параметр $d0$ составлял 30 км.

Анализ пространственного распределения осей напряжений свидетельствует о неоднородности деформирования земной поверхности острова (рис. 2б, 3б, 4б). Так, преобладающим режимом является сжатие островной суши. Сокращение земной коры в регионе происходит в основном в субширотном направлении, однако оно несколько меняется от района к району.

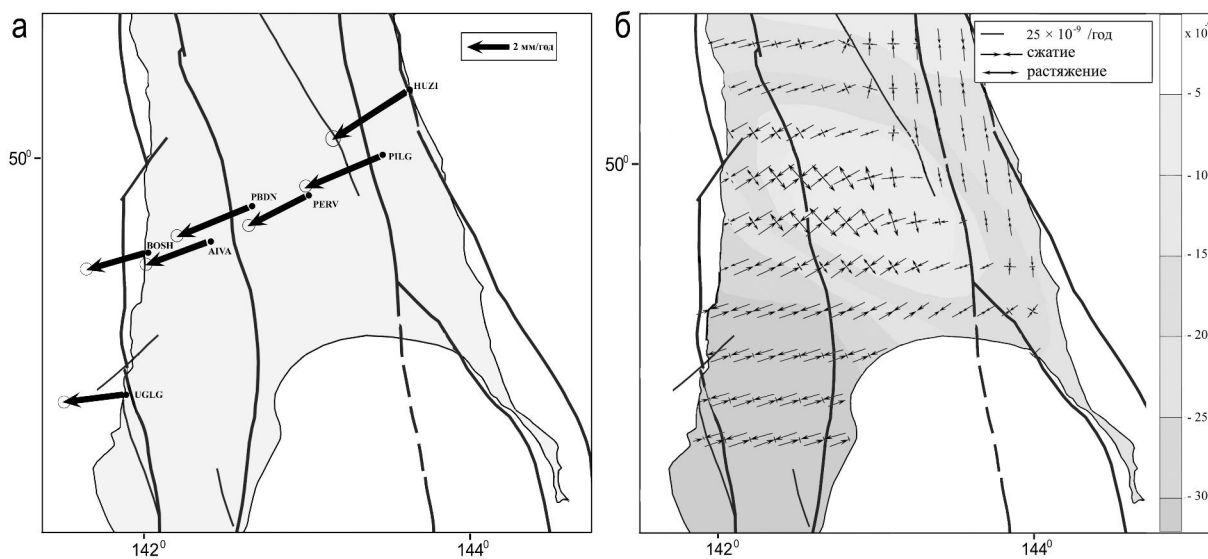


Рис. 3. Горизонтальные скорости GPS пунктов центральной части о. Сахалин относительно Евразийской литосферной плиты за период 2000-2011 гг. (а). Скорости дилатации и главных деформаций (б).

Территория северной части острова подвержена сжатию в юго-западном направлении. Максимальные скорости деформаций до 130×10^{-9} в год проявляются в восточной его части (рис. 2б). Наибольшие значения дилатации наблюдаются на юге района и приурочены к зоне скалывания между активными разломами, глубина механического контакта которых составляет ~ 13 км при скорости конвергенции литосферных плит 7.8 мм/год [1]. В этой зоне происходит интенсивное накопление напряжений, что проявляется в сейсмичности после Нефтегорского землетрясения. В отличие от работы [7] (рис. 1б) на севере острова не выявлено областей растяжений, однако выделяется существенный градиент скорости дилатации.

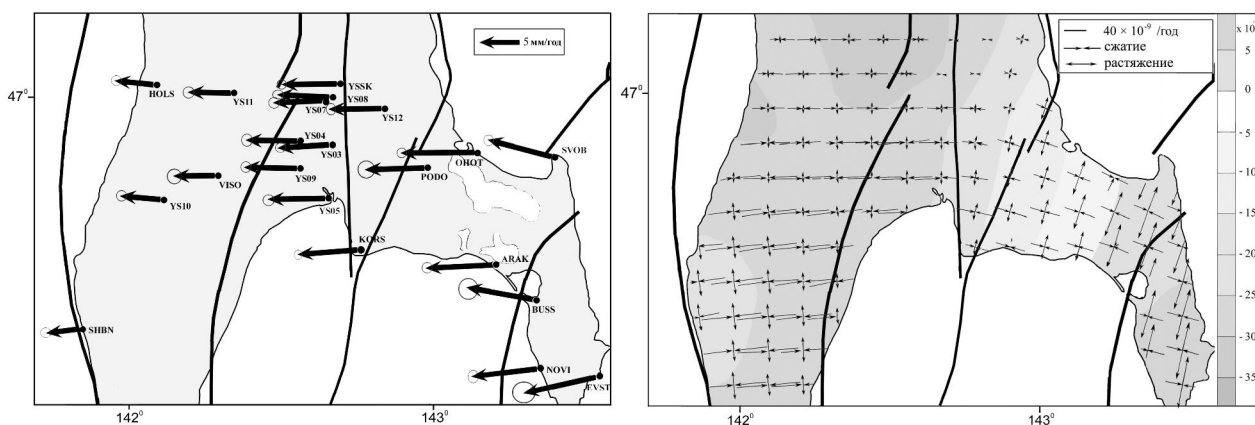


Рис. 4. Горизонтальные скорости GPS пунктов южной части о. Сахалин относительно Евразийской литосферной плиты за период 1999-2009 гг. (а). Скорости дилатации и главных деформаций (б).

Для центральной части острова характерны невысокие значения скоростей деформирования земной поверхности, не превышающие $\sim 50 \times 10^{-9}$ в год (рис. 3б). Хоккайдо-Сахалинский разлом разграничивает территорию с разной геодинамической обстановкой: на границе разлома юго-западное направление осей сжатия сменяется субмеридиональной ориентацией. Между Центрально-Сахалинским и Западно-Сахалинским разломом присутствует поле пониженной дилатации, скорости которой не превышают 5×10^{-9} в год. Хаотичное распределение скоростей деформирования земной

поверхности может являться следствием разреженности GPS сети центральной части острова. Однако, в целом, за исключением восточной части района, ориентация сжатия земной поверхности согласуется с геодинамической обстановкой (рис. 1б).

В южной части о. Сахалин наряду с доминирующим субширотным сжатием островной суши, которое достигает значений $\sim 80 \times 10^{-9}$ в год, выделяется область растяжения (рис. 4б). В окрестности Центрально-Сахалинского разлома оси сжатия меняют свое западное направление на северо-западное, а преобладающим режимом деформирования становится растяжение северо-восточного направления, которое отчетливо картируется положительными значениями дилатации. Характер деформирования земной поверхности отражает кинематику Центрально-Сахалинской разломной зоны, которая характеризуется взбросо-надвиговой природой. Области высоких скоростей деформаций сжатия коррелируют с районом высокой сейсмичности, в то время как, зона растяжения является практически асейсмичной (рис. 1а).

Заключение

На основе межсейсмических скоростей смещений GPS пунктов рассчитаны скорости деформирования земной поверхности северной, центральной и южной частей о. Сахалин. Пространственное распределение осей деформаций острова неоднородно. Максимальные скорости деформаций до 130×10^{-9} в год выявлены в северной части острова в районе Верхне-Пильтунского межплитового сдвига. Доминирующим современным деформационным режимом является сжатие островной суши, наряду с которым наблюдаются незначительные области растяжения. Выявленные области растяжения и сжатия-сдвига свидетельствуют о сложном геологическом строении и, скорее всего, являются откликом среды на общее сжатие в результате схождения Евразийской (Амурской) и Североамериканской (Охотской) литосферных плит. В районах интенсивного накопления напряжений наблюдается умеренная сейсмичность последних лет.

Результаты проведенных исследований хорошо согласуются с региональным тензором напряжений сжатия по данным механизмов очагов землетрясений [2] и оценками напряженно-деформированного состояния территории Сахалина, полученного методом катакластического анализа разрывных смещений [7].

Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке по программе фундаментальных исследований ДВО РАН «Дальний Восток»: проект 15-И-2-087.

Список литературы

1. Василенко Н.Ф., Прытков А.С. Моделирование взаимодействия литосферных плит на о. Сахалин по данным GPS наблюдений // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 1. С. 42–48.
2. Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин. Владивосток: Дальнаука, 2014. 252 с.
3. Коновалов А.В., Степнов А.А., Гаврилов А.В., Манайчев К.А., Сычев А.С., Клачков В.А., Сабуров М.С. Особенности региональной сейсмичности на севере о. Сахалин в связи с промышленным освоением месторождений нефти и газа на шельфе // История науки и техники. 2016. № 6. С. 63–71
4. Мельников О.А. О взаимосвязи геологического строения и сейсмичности Сахалина // Сейсмическое районирование Сахалина. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 46–51.
5. Нефтегорское землетрясение 27 (28) мая 1995 г. // Информ.-аналит. бюл. ФССН; спец. вып. М., 1995. 236 с.
6. 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.
7. Сим Л.А., Брянцева Г.В., Саввичев П.А., Каменев П.А. Особенности переходной зоны между Евразийской и Северо-Американской литосферными плитами (на примере напряженного состояния о-ва Сахалин) // Геосистемы переходных зон. 2017. № 1. С. 3–22.
8. 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.
9. Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.
10. Chapman M.E., Solomon S.C. North American-Eurasian plate boundary in northeast Asia // J. Geophys. Res. 1976. V. 81. P. 921–930.
11. <http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/new/catalog.pl>
12. Shen Z.K., Jackson D.D., Ge B.X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements // Journal of Geophysical Research. 1996. V. 101. P. 27957–27980.
13. Teza G., Pesci A., Galgano A. Grid_strain and grid_strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments // Computers and Geosciences. 2008. V. 34. N 9. P. 1142–1153.
14. Zonenshain L.P., Savostin L.A. Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia // Tectonophysics. 1981. V. 76. P. 1–45.