

КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

УДК 528.389:550.83

СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ОКРАИНЫ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ GPS-НАБЛЮДЕНИЙ

Владимир Юрьевич Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Геннадьевич Ардюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Павел Юрьевич Горнов

Институт тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН, 680000, Россия, г. Хабаровск, ул. Ким Ю. Чена, 65, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, e-mail: gornov@itig.as.khb.ru

Антон Владимирович Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Максим Георгиевич Валитов

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, 690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская 43, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, e-mail: maxval@mail.ru

Елена Валерьевна Бойко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

В работе рассматриваются результаты многолетних измерений современных движений на континентальной окраине Дальнего Востока России. Здесь создана геодинимическая сеть, на которой проводятся периодические опросы методом космической геодезии. По данным о скоростях горизонтальных смещений за 2003–2014 гг. проводится анализ поля смещений. Выделяются косейсмические эффекты, связанные с сильными (магнитудой более 8) землетрясениями региона. Проводится анализ связи современной кинематики в разных частях ис-

следуемой территории (Приморский край и южная часть Хабаровского края) и разломной сети региона. Величина наблюдаемых быстрых смещений составила от 40 мм для косейсмических смещений в дальней зоне Японского 11.03.2011 ($M = 9$) землетрясения до аномальных скоростей в различных частях территории от 0,2 до 3,3 мм/год.

Ключевые слова: космическая геодезия, GPS метод, косейсмические смещения, кинематика зон разломов земной коры.

Известно, что современная геодинамика и сейсмичность Дальнего Востока в значительной мере определяются взаимодействием Евразийской, Тихоокеанской, Североамериканской, а также Амурской и Охотской тектоническими плитами (рис. 1) [1].

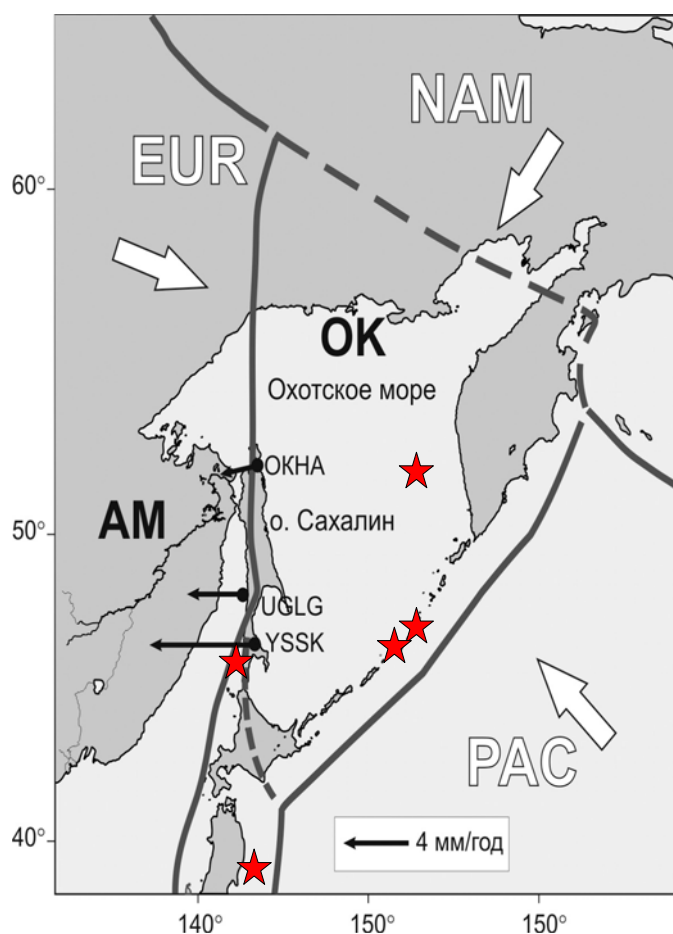


Рис. 1. Схема взаимодействия литосферных плит на Северо-Востоке Азии [1].

Стрелки – горизонтальные скорости GPS-пунктов о. Сахалин относительно Евразийской плиты. Сплошные линии – границы литосферных плит (глобальная модель Земли NUVEL-1A). Пунктир – предполагаемые границы микроплит. Здесь: NAM – Североамериканская, EUR – Евразийская, PAC – Тихоокеанская, ОК – Охотская, AM – Амурская литосферные плиты. Цифрами обозначены: 1 и 2 – Симуширские землетрясения 15.11.2006 и 13.01.2007 с магнитудами 8,0 и 8,1; 3 – Невельское землетрясение 02.08.2007 г. с магнитудой $M = 6,5$; 4 – катастрофическое Японское землетрясение 11.03.2008 с магнитудой 9,0; 5 – Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. магнитудой 8,3

Тихоокеанская плита, представленная океанической корой, со скоростью 8 см в год пододвигается под Евразийскую плиту. На востоке Евразийской и Амурской плит в континентальной части региона в настоящее время доминирует режим сжатия с развитием орогенных структур (например, хребет Сихотэ-Алинь). Накопленные в коре напряжения концентрируются и активно разгружаются в градиентных зонах на границах жестких блоков со структурами, сохранившими относительную мобильность. Это отражается как в мозаике распределения зон разломов, так и в характере смещений по разломам, выделяемом по геологическим данным. Изучаемый район находится в пределах современной Амурской плиты, восточные границы которой точно не определены. Л. П. Зоненшайн, А. Н. Савостин [2] считают таковой Сахалинский сейсмический пояс, В. С. Имаев с соавторами [3] в качестве этой границы принимают Итун-Иланьскую ветвь разлома Тан-Лу. Близкого мнения придерживаются Ю. Г. Гатинский и Д. В. Рундквист [4], выделяя еще к востоку от Амурской плиты Японо-Корейский блок. В целом, среди геологов имеются различные точки зрения на строение и кинематику восточной окраины Азии [5–8], а для прояснения существующих вопросов необходимо развивать дополнительно новые методы научных исследований.

Целью нашей работы являлось получение поля скоростей горизонтальных смещений Дальнего Востока (с использованием методов космической геодезии), анализ кинематики территории и зон разломов с учетом высокой сейсмичности региона. Изучение современных геодинамических процессов на поверхности нашей планеты в последние десятилетия успешно развивается с применением технологии космической геодезии. На основе мировой сети постоянных станций различные методы исследований (VLBI, GPS, SLR и DORIS) дают представление о горизонтальных перемещениях участков земной поверхности по всей нашей планете [9, 10]. В центральной и южной части Евразии широкое развитие получили региональные и локальные сети, опрашиваемые с помощью двухчастотных приемников GPS различного типа.

Геодинамическая сеть в Приморье закладывалась летом 2003 г. [11]. Измерения проводились ежегодно во второй половине сентября – первой половине октября, что исключает влияние сезонных факторов. Применялась технология жесткой центровки на скальных реперах. Использовались два комплекта приемников TRIMBLE 4700, один устанавливался на базовой станции в д. Змейка (код пункта ZMEY), второй использовался при последовательных измерениях по сети. Измерения на сетевых пунктах продолжались от 36 до 72 часов. Обработка результатов с использованием программного пакета GAMIT-GLOBK осуществляется относительно постоянных станций Евразии либо в рамках плитных моделей, либо относительно сетевой станции, расположенной на недеформируемой части плиты и максимально приближенной к изучаемому району. В результате обработки данных многолетних измерений получены скорости смещения пункта в геоцентрической системе координат, которые включают скорость смещения плиты в целом и аномалии скоростей, которые связаны

со смещениями и локальным деформированием отдельных блоков литосферы (микроплиты) и/или их вращением. Далее движения крупных плит исключаются и анализируются относительно малые (аномальные) перемещения. Результаты измерений на созданной в 2003 г. (ИНГГ СОРАН и ИТиГ ДВО РАН) и функционирующей до настоящего времени Сихотэ-Алиньской геодинамической сети (6 пунктов) обрабатывались совместно с данными постоянных пунктов GPS-наблюдений мировой сети. Измерения и результаты обработки данных съемки 2003, 2004, 2005, 2006 гг. позволили составить первые представления о кинематике окраины континента (рис. 2). На первом этапе исследований была сделана попытка разделить движение Евразии и Амурской плиты [11]. Величины скоростей горизонтальных смещений по сети в геоцентрической системе координат и модельные определения (ITRF 2008) приведены в табл. 1. Расчеты, выполненные по пунктам наблюдений локальной сети относительно пункта EAST (западный борт Центрального Сихотэ-Алиньского разлома), показали наличие современного левостороннего смещения вдоль Центрального Сихотэ-Алиньского разлома, что не противоречит геологическим данным. Величина смещения составляет около 2 мм/год при ошибке от 0,6 до 1,5 мм (табл. 2).

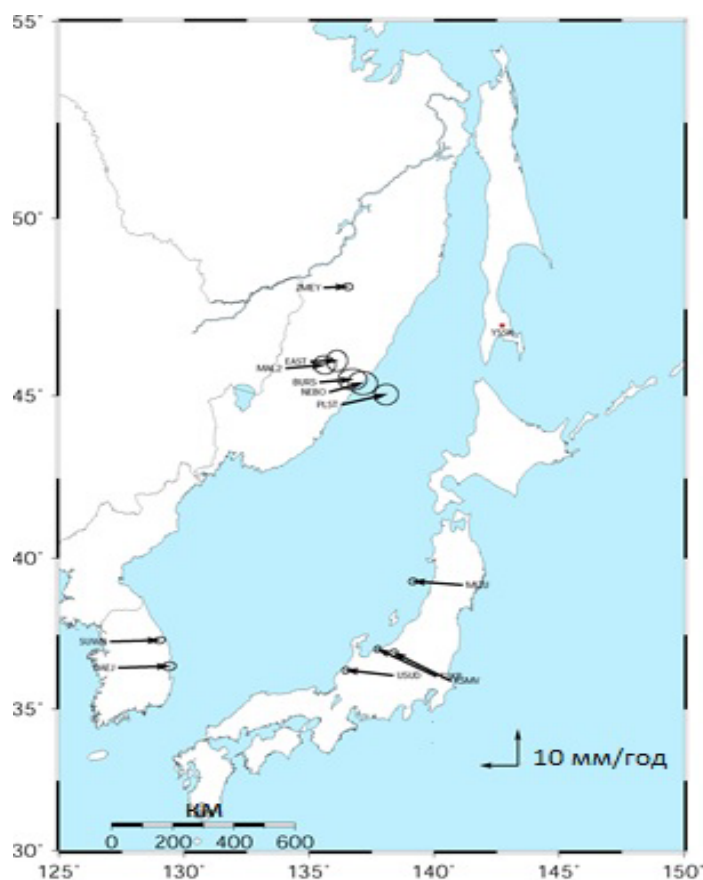


Рис. 2. Горизонтальные смещения пунктов сети относительно постоянной станции мировой сети Южно-Сахалинск (YSSK) за период 2003–2006 гг.

Таблица 1

Координаты станций Сихотэ-Алиньской сети, профиль по северу Приморского края. Годовая скорость горизонтальных смещений по экспериментальным данным (решение в геоцентрической системе координат) и модельные расчеты. Эпоха 2003, 2004, 2005, 2006 гг.

Код пункта	Широта φ , в градусах	Долгота λ , в градусах	Экс. рез. φ , в мм	Экс. рез. λ , в мм	Модель φ , в мм	Модель λ , в мм
Zmey	48,10	135,59	-13,2	+21,7	-13,558	+21,822
MAL2	45,81	134,08	-13,3	+23,6	-13,315	+22,491
EAST	46,00	135,06	-13,5	+22,3	-13,474	+22,292
BURS	45,40	135,44	-12,6	+23,8	-13,534	+22,332
NEBO	45,11	135,82	-12,5	+23,0	-13,594	+22,317
PLST	44,73	136,31	-12,9	+24,4	-13,670	+22,298

Таблица 2

Годовая скорость для пунктов, расположенных к востоку от Центрального Сихотэ-Алиньского разлома (ЦСАР), относительно пункта EAST, расположенного на западном борту ЦСАР. Эпоха 2003–2006 гг.

Код пункта	Широта φ , в градусах	Долгота λ , в градусах	Экспериментальные результаты φ , в мм	Экспериментальные результаты λ , в мм
EAST	48,10	135,59	0,0	0,0
BURS	45,40	135,44	+0,9	+1,5
NEBO	45,11	135,82	+1,0	+0,7
PLST	44,73	136,31	+0,6	+2,1

С другой стороны, пересчет нашего материала с добавлением региональных данных статистико-вероятностными методами не дал четкого ответа о характере смещений на Центральном Сихотэ-Алинском разломе в современную эпоху [12].

Результаты обработки данных съемки 2003–2006 гг. относительно пункта Южно-Сахалинск (YSSK) показывают, что пункты Сихотэ-Алиньской геодезической сети и стационарные пункты, расположенные на континентальной окраине, имеют скорость современных движений, отличную от литосферных блоков Охотоморской плиты, на которых расположены пункты Японии и Сахалина (см. рис. 1, 2). На основании расчетов и из выполненных построений следует, что вдоль границы сочленения Амурской и Охотоморской литосферных плит существует область сжатия, где возможны землетрясения, например, здесь случилось Невельское землетрясение (02.08.2007 г., $M = 6,5$; у юго-западного побережья о. Сахалин). Можно заметить, что эпоха измерений с октября 2003 г. по октябрь 2006 г. отличалась отсутствием сильных землетрясений региона.

В 2007 г. сеть измерений была дополнена северным профилем с пунктами, расположенными вблизи малого БАМа и вдоль дороги г. Комсомольска-на-Амуре – п. Полины Осипенко. Пункты измерений расположены на отдель-

ных «блоках», разделенных выделенными геологами разломами. Измерения на пунктах выполнялись по той же технологии, что и на первом профиле. Всего опрашивалось четыре сетевых пункта при одном базовом (д. Змейка). Эпоха измерений, начиная с конца 2006 г., отличается регулярным наличием высокой сейсмичности в регионе, что сильно осложняет работу по технологии отдельных ежегодных опросов.

Границы литосферных плит являются классической областью сильных землетрясений. Граница Тихоокеанской тектонической плиты – «огненное кольцо» – является областью, где выделяется максимум сейсмической энергии на Земле. В дальневосточной части границы Тихоокеанской плиты в период наших измерений случились следующие землетрясения с магнитудой более 8 по шкале Рихтера: Симуширские землетрясения 15.11.2006 и 13.01.2007 с магнитудами 8,0 и 8,1 [13], катастрофическое Японское землетрясение 11.03.2008 с магнитудой 9,0 [14] и Охотоморское землетрясение 24.05.2013 с магнитудой 8,3 [15].

Мощнейшее катастрофическое Японское землетрясение выделяется многометровыми косейсмическими смещениями даже в 100 км от эпицентра [14]. Область необратимых косейсмических смещений, при событиях магнитудой от 8 до 9, распространяется на тысячу километров и более [14]. Процесс, в целом, соответствует теории упругой отдачи, и «мгновенные» смещения рассчитываются в рамках подвижки в упругом однородном полупространстве [14, 15]. Иллюстрацией косейсмических смещений служат результаты наблюдений на базовом пункте Змейка в эпоху 2007–2012 гг. (рис. 3).

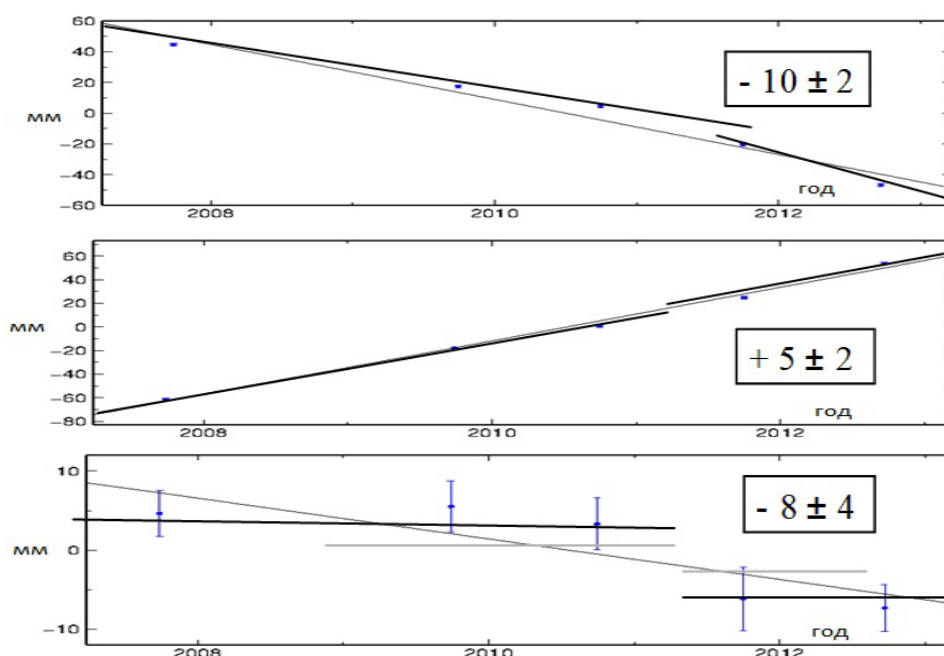


Рис. 3. Косейсмический скачок смещений на пункте ZMEYU (сверху вниз: N, E, V) на ЮЮВ. Японское землетрясение (11.03.2011, M = 9). Расстояние до эпицентра составляет 1 200 км. Эпоха наблюдений с 2007 по 2012 г.

В дальней зоне Японского землетрясения 11.03.2001 на Дальнем Востоке на расстояниях от 1 000 до 1 600 км косейсмические смещения зарегистрированы на уровне от 4 до 1 см (рис. 4).

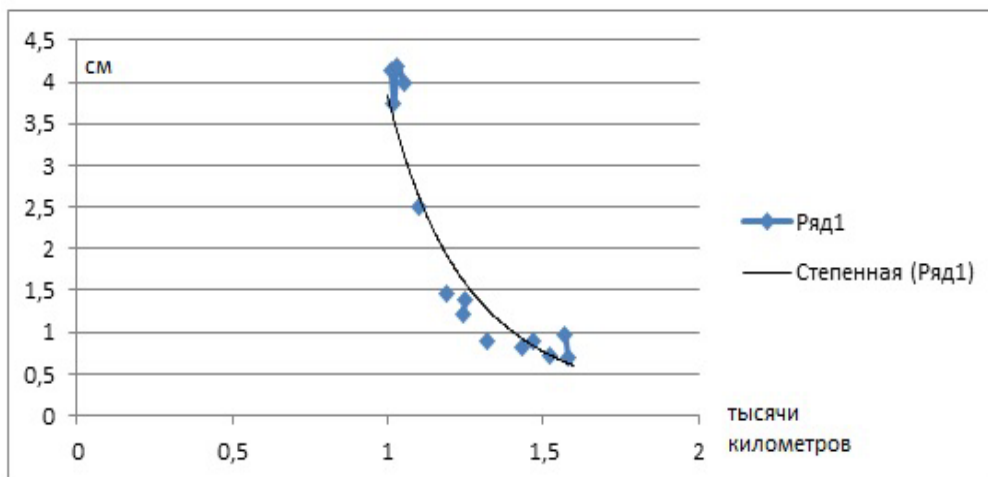


Рис. 4. Зависимость косейсмического горизонтального смещения (в см) от расстояния до эпицентра в тысячах километрах. Экспериментальные данные и квадратичная кривая. Дальняя зона Японского (Tohoku-Oki) землетрясения

Результаты обработки данных наблюдений по южному и северному профилям приведены в табл. 3.

Таблица 3

Скорости смещения относительно пункта YSSK (г. Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН). На пунктах южного профиля (рис. 2, 3 и 5) опрос проводился в 2003, 2004, 2005, 2006, 2008 и 2014 гг. На пунктах северного профиля опрос проводился в 2007, 2009, 2010, 2011 и 2012 гг. Базовый пункт ZMEY – ежегодно с 2003 по 2014 г. за исключением 2013 г. (наводнение, режим ЧС)

Долгота Λ, в градусах	Широта Φ, в градусах	Скорость V_{λ} , в мм/год	Ошибка V_{λ} , в мм/год	Скорость V_{ϕ} , в мм/год	Ошибка V_{ϕ} , в мм/год	Скорость V_h , в мм/год	Ошибка V_h , в мм/год	Пункт
142,72	47,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	YSSK
135,05	48,52	8,03	0,11	-2,20	0,13	-1,22	0,35	KHAJ
135,59	48,10	8,12	0,09	-1,93	0,11	-0,59	0,32	ZMEY
138,26	50,36	4,95	1,38	-5,94	1,74	-2,58	6,76	UKTR
136,91	51,03	5,83	0,87	-1,84	1,13	-0,52	3,79	HURM

Окончание табл. 3

Долгота Λ, в градусах	Широта Φ, в градусах	Скорость V_{λ} , в мм/год	Ошибка V_{λ} , в мм/год	Скорость V_{ϕ} , в мм/год	Ошибка V_{ϕ} , в мм/год	Скорость V_h , в мм/год	Ошибка V_h , в мм/год	Пункт
136,31	44,73	12,16	0,28	-6,75	0,29	-0,84	0,99	PLST
135,92	52,08	4,76	0,91	-2,58	1,03	-6,09	3,75	BRIA
135,87	51,57	5,02	1,09	-0,80	1,17	-5,84	3,86	DUKI
135,82	45,11	10,95	0,28	-4,54	0,29	-0,21	1,08	NEBO
135,44	45,40	10,88	0,34	-4,42	0,34	-4,13	1,55	BURS
135,06	46,00	9,47	0,33	-2,31	0,35	-0,37	1,31	EAST
134,08	45,81	10,73	0,85	0,71	1,06	4,89	3,89	MAL2

В таблице приведены результаты по пунктам в г. Хабаровск и в д. Змейка, они очень близки, и далее используем среднее по пунктам для вычисления разностного значения скоростей смещения на пунктах сети (табл. 4).

Таблица 4

Скорости смещения пунктов геодинамической сети относительно пункта YSSK (г. Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН) и среднее значение для двух пунктов ZMEY и KHAJ. Эпоха 2003–2014 гг.

Долгота Λ, в градусах	Широта Φ, в градусах	Скорость V_{λ} , в мм/год	Ошибка V_{λ} , в мм/год	Скорость V_{ϕ} , в мм/год	Ошибка V_{ϕ} , в мм/год	Скорость V_h , в мм/год	Ошибка V_h , в мм/год	Пункт
142,72	47,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	YSSK
135,59	48,10	8,12	0,09	-1,93	0,11	-0,59	0,32	ZMEY
135,05	48,52	8,03	0,11	-2,20	0,13	-1,22	0,35	KHAJ
135,31	48,31	8,07	0,11	-2,06	0,13	-0,90	0,35	Среднее по двум станциям

Значения скоростей на пунктах геодинамической сети вычислялись относительно среднего значения (см. табл. 4). Они приведены в табл. 5. Скорости относительных смещений изменяются от 0,2 до 3,3 мм в год при ошибке определения от 0,3 до 1,7 мм. Наложение этих величин на схему разломов исследуемой территории показано на рис. 5.

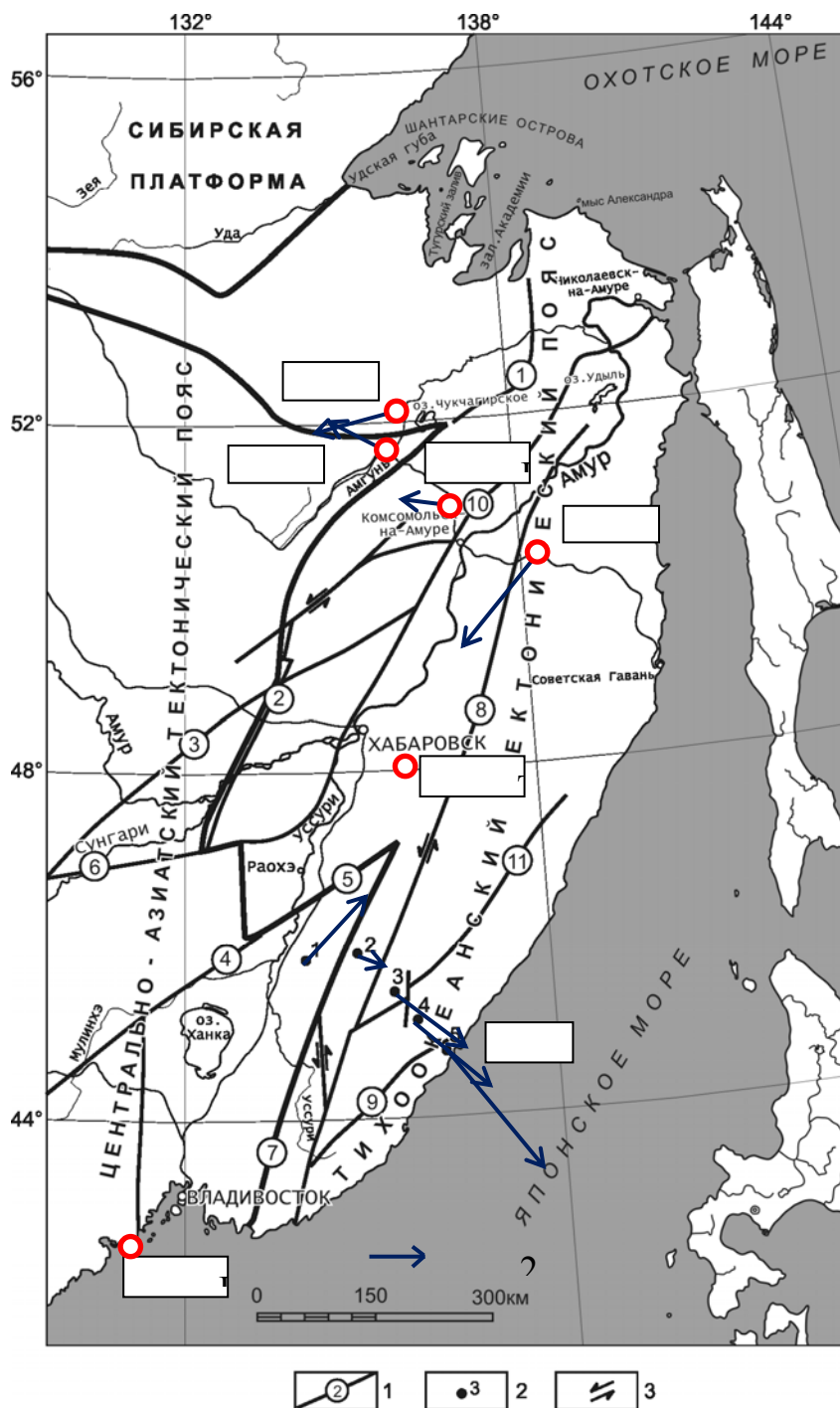


Рис. 5. Положение пунктов измерений и разломная сеть исследуемой территории. Приведены скорости смещений пунктов сети относительно среднего по пунктам Хабаровск и Змейка (ZMEY) в центре территории. Показано положение пункта (POI-P) полигон «мыс Шульца» (ТОИ ДВО РАН).
 Условные обозначения: 1) разломы: 1 – Пауканский, 2 – Куканский, 3 – Итунь-Иланский (Тан-Лу), 4 – Дун Ми, 5 – Алчинский, 6 – Наолихэ, 7 – Арсеньевский, 8 – ЦС-А, 9 – Прибрежный, 10 – Амурский, 11 – Колумбинский; 2) пункты GPS наблюдений: 0 – ZMEY (с 2003 г.), 1 – MAL2 (с 2003 г.), 2 – EAST (с 2003 г.), 3 – BURS (с 2003 г.), 4 – NEBO (с 2003 г.), 5 – PLAS (2004 г.); 3) характер смещений по разломам [7, 11]. Величины и направления смещений отражают сглаженное влияние косейсмических смещений

Таблица 5

Скорости смещения пунктов геодинамической сети относительно среднего значения для двух пунктов ZMEY и КНАJ. Эпоха 2003–2014 гг.

Долгота Λ, в градусах	Широта Φ, в градусах	Скорость V_{λ} , в мм/год	Ошибка V_{λ} , в мм/год	Скорость V_{ϕ} , в мм/год	Ошибка V_{ϕ} , в мм/год	Скорость V_h , в мм/год	Ошибка V_h , в мм/год	Пункт
135,31	48,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Среднее
138,26	50,36	-3,12	1,38	-3,88	1,74	-1,68	6,76	UKTR
136,91	51,03	-2,24	0,87	+0,22	1,13	+0,38	3,79	HURM
136,31	44,73	4,09	0,28	-4,69	0,29	-0,84	0,99	PLST
135,92	52,08	-3,31	0,91	-0,52	1,03	-5,19	3,75	BRIA
135,87	51,57	-3,05	1,09	+1,26	1,17	-4,94	3,86	DUKI
135,82	45,11	2,88	0,28	-2,48	0,29	+0,69	1,08	NEBO
135,44	45,40	2,81	0,34	-2,36	0,34	-3,23	1,55	BURS
135,06	46,00	1,40	0,33	-0,25	0,35	+0,53	1,31	EAST
134,08	45,81	2,66	0,85	2,77	1,06	+5,79	3,89	MAL2

В полученной картине отражаются косейсмические и постсейсмические эффекты на разломах. Например, на южном профиле при вычислении скорости за период с 2003 по 2012 г. активно проявляется постсейсмическое смещение на юго-восток, связанное с Японским землетрясением 2011 г. (табл. 2, б), и оно микширует возможные смещения на Центральном Сихотэ-Алиньском разломе.

Таблица 6

Скорости смещения пунктов геодинамической сети относительно пункта EAST, расположенного на западном борту Центрального Сихотэ-Алиньского разлома (2003-2014 гг.)

Долгота Λ, в градусах	Широта Φ, в градусах	Скорость V_{λ} , в мм/год	Ошибка V_{λ} , в мм/год	Скорость V_{ϕ} , в мм/год	Ошибка V_{ϕ} , в мм/год	Скорость V_h , в мм/год	Ошибка V_h , в мм/год	Пункт
135,06	46,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	EAST
135,44	45,40	1,41	0,34	-2,11	0,34	-3,76	1,55	BURS
135,82	45,11	1,48	0,28	-2,24	0,29	+0,16	1,08	NEBO
136,31	44,73	2,69	0,28	-4,44	0,29	-1,37	0,99	PLST

С 2012 г. начаты ежегодные измерения на крайнем юге региона на полигоне ТОИ ДВО РАН (см. рис. 5). Предварительные результаты измерений в эпоху 2012–2014 гг. приведены на рис. 6. Они также отражают постсейсмические процессы в дальней зоне Японского землетрясения. Здесь, на мысе Шульца и полуострове Гамова, в настоящее время заложено 4 пункта, которые опрашиваются одновременно с пунктами северного и южного профилей геодинами-

ческой сети. Из эксперимента (см. рис. 3) известно о наличии в дальней зоне Японского землетрясения значительной вертикальной компоненты. Для надежного определения вертикальной составляющей современных движений на полигоне «Мыс Шульца» одновременно проводятся измерения с помощью приемников космической геодезии различных типов и высокоточные гравиметрические наблюдения с относительными и абсолютными гравиметрами [16–20]. Эти результаты позволяют разделить смещения и деформации земной коры региона, что является задачей будущих исследований.

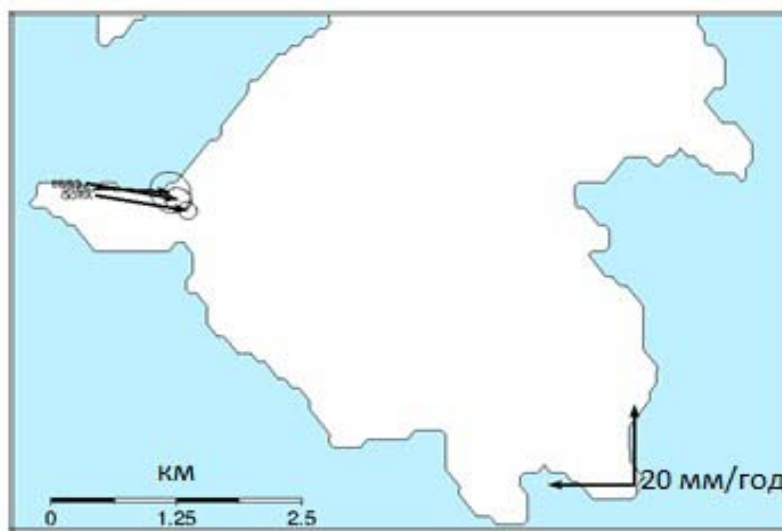


Рис. 6. Скорости смещения пунктов полигона «мыс Шульца» ROI-P (ТОИ ДВО РАН) относительно пункта YSSK (г. Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН) в эпоху 2012–2014 гг. Координаты полигона 42,58 °с.ш. и 131,16 °в.д. Косейсмическое смещение полигона в момент Японского землетрясения 11.03.2011 г. составило 4 см на ЮВВ

Выводы

Из проведенных построений следует, что внутриблоковая структура восточной части Евроазиатской (Амурской) литосферной плиты имеет разноориентированный кинематический характер. Значимые скорости относительных смещений варьируются в пределах от долей миллиметра в год до 1-3 мм в год. Регулярные измерения смещений осложняются частой сейсмической активностью и необратимыми смещениями, связанными с сильными землетрясениями региона. Связь со структурными элементами континентальной окраины проявилась слабо, что вызвано малыми скоростями тектонических смещений на разломах и на границах блоков земной коры. Ошибка измерений около 1 мм (от 0,5 до 1,5 мм), видимо, может служить ограничением величины скоростей в год. Таким образом, системные наблюдения и обработка GPS-данных позволили показать современную кинематику территории Приморья и представили

количественные ограничения и методические предпосылки для палеогеодинамических реконструкций.

Исследования были выполнены при частичной финансовой поддержке по гранту РФФ №16-17-00015 и по гранту ДВО РАН 15-1-2-068.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Plate boundaries in the Far East region of Russia (from GPS measurement, seismic-prospecting, and seismological data) / V. Yu. Timofeev, D. G. Ardyukov, V. M. Solov'ev, S. V. Shibaev, A. F. Petrov, P. Yu. Gornov, A. V. Timofeev // *Russian Geology and Geophysics*. – 2012. – Vol. 53. – P. 321–336.
2. Zonenshain L. P., Savostin L. A. Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia // *Tectonophysics*. – 1981. – Vol. 76. – 1–45.
3. Имаев В. С., Имаева Л. П., Козьмин Б. М. Сейсмотектоника Якутии. – М. : ГЕОС, 2000. – 227 с.
4. Gatinskii Yu. G., Runquist D. V. Geodynamics of Eurasia: Plate Tectonics and Block Tectonics // *Geotectonics*. – 2004. – Vol. 38. – P. 1–16.
5. Parfenov L. M., Berzin N. A., Khanchuk A. I. Model of tectonic belts for Center and North-East of Asia // *Russian Journal of Pacific Geology*. – 2003. – Vol. 22, No. 6.
6. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994-2002); Implications for current kinematics of Asia / E. Calais, M. Vergnolle, V. San'kov, A. Lukhnev, A. Miroshnitchenko, S. Amarjargal, J. Derverche're // *Journal Geophysical Res.* – 2003. – Vol. 108, No. 10. – P. 2501.
7. Deep Structure of the Amur Lithospheric Plate Border Zone / Yu. F. Malyshev, V. Ya. Podgornyi, B. F. Shevchenko, N. P. Romanovskii, V. B. Kaplun, P. Yu. Gornov // *Russian Journal of Pacific Geology*. – 2007. – Vol. 26, No. 2. – P. 3–17.
8. Rotation Parameters of the Siberian Domain and Its Eastern Surrounding Structures during Different Geological Epochs / V. Yu. Timofeev, A. Yu. Kazansky, D. G. Ardyukov, D. V. Metelkin, P. Yu. Gornov, N. V. Shestakov, G. Z. Gil'manova // *Russian Journal of Pacific Geology*. – 2011. – Vol. 5, No. 4. – P. 288–297.
9. Boucher C., et al. The ITRF 2000. IERS Technical Note, 2001, No. 31.
10. Drewes H. Combination of VLBI, SLR and GPS determined station velocities for actual plate kinematic and crustal deformation models // *Geodynamics, IAG Symposia*. M. Feissel (Ed.). – Springer, 1998.
11. GPS Measurements (2003–2006) in the Sikhote Alin Network, the Far East / V. Yu. Timofeev, D. G. Ardyukov, P. Yu. Gornov, Yu. F. Malyshev, E. V. Boyko // *Russian Journal of Pacific Geology*. – 2008. – Vol. 1, P. 314–324.
12. Present tectonics of the southeast of Russia as seen from GPS observations / N. Shestakov, M. Gerasimenko, H. Takahashi, M. Kasahara, V. Bormotov, V. Bykov, T. Kato // *Geophysical Journal International*. – 2011. – Vol. 184, No. 2. – P. 529–540.
13. The mechanism of postseismic deformation triggered by the 2006–2007 great Kuril earthquakes / M. G. Kogan, N. F. Vasilenko, D. I. Frolov, J. T. Freymueller, G. M. Steblov, B. W. Levin, A. S. Prytkov // *Geophysical Res. Lett.* – 2011. – V. 38. – No. L06304. – P. 3691–3706.
14. Rapid postseismic relaxation after the great 2006-2007 Kuril earthquakes from GPS observations in 2007-2011 / M. G. Kogan, N. F. Vasilenko, D. I. Frolov, J. T. Freymueller, G. M. Steblov, A. S. Prytkov, G. Ekstrom // *J. Geophys. Res.* – 2013. – Vol. 118. – No. 7. – P. 3691–3706.
15. Analysis of the far-field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations / N. V. Shestakov, H. Takahashi, M. Ohzono, A. S. Prytkov, V. G. Bykov, M. D. Gerasimenko, M. A. Serov // *Tectonophysics*. – 2012.

16. Coseismic displacements model for Okhotomorskoe deep earthquake 24.05.2013, $M = 8.3$ / N. V. Shestakov, M. Ohzono, H. Takahashi, M. D. Gerasimenko, V. G. Bykov, E. I. Gordeev, V. V. Pupatenko // *Doklady Earth Sciences*. – 2014. – Vol. 457, No. 4. – P. 471–476.

17. Coseismic effects of the 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake measured at Far East Russia continental coast by gravity and GPS methods / V. Timofeev, R. Kulinich, M. Valitov, Y. Stus, E. Kalish, B. Ducarme, Z. Proshkina // *International Journal of Geosciences*. – 2013. – Vol. 4. – P. 362–370.

18. Приливные эффекты по гравиметрическим и уровнемерным наблюдениям, океанические приливные модели / В. Ю. Тимофеев, М. Г. Валитов, Б. Дюкарм, Д. Г. Ардюков, С. Б. Наумов, А. В. Тимофеев, Р. Г. Кулинич, Т. Н. Колпащикова, З. Н. Прошкина, И. С. Сизиков, Д. А. Носов // *Вестник СГУГиТ*. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 36–47.

19. Приливные эффекты по гравиметрическим данным, модели и эффект жидкого ядра Земли / В. Ю. Тимофеев, М. Г. Валитов, Б. Дюкарм, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев, Р. Г. Кулинич, Т. Н. Колпащикова, З. Н. Прошкина, И. С. Сизиков, Д. А. Носов, С. Б. Наумов // *Вестник СГУГиТ*. – 2016. – Вып. 2 (34). – С. 34–46.

20. Absolute Gravity Measurements at Shults Cape / D. G. Ardyukov, E. N. Kalish, D. A. Nosov, I. S. Sizikov, M. G. Smirnov, Yu. F. Stus, M. G. Valitov // *Gyroscopy and Navigation*. – 2015. – Vol. 6, No. 4. – P. 260–264.

Получено 12.01.2017

© В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, П. Ю. Горнов,
А. В. Тимофеев, М. Г. Валитов, Е. В. Бойко, 2017

CURRENT MOTION OF CONTINENTAL PART FOR FAR-EAST OF RUSSIA BY GPS METHOD

Vladimir Yu. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Akademika Koptyuga Prsp., Dr. Sc., Chief Researcher, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Dmitriy G. Ardyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Akademika Koptyuga Prsp., Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)335-64-42, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Pavel Yu. Gornov

Kosigin Institute of Tectonics and Geophysics Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, 680000, Russia, Khabarovsk, 65 Kim Yu. Chena St., Ph. D., Senior Researcher, e-mail: gornov@itig.as.khb.ru

Anton V. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Akademika Koptyuga Prsp., Researcher, phone: (383)335-64-42, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Maxsim G. Valitov

Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, 690041, Russia, Vladivostok, 43 Baltiyskaya St., Ph. D., Chief of Laboratory, e-mail: maxval@mail.ru

Elena V. Boyko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Akademika Koptyuga Prsp., Ph. D., Researcher, phone: (383)335-64-42, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

In this work the preliminary estimate of crustal displacements at Far East region of Russia is shown. Local Geodetic Network for space geodesy is presented at 2003-2014 period. Kinematics parameters induced by strong earthquakes or geological structure are discussed. Analysis of the far-field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations. Co-seismic jump up to 40 mm is registered at far-zone of Tohoku event. Irregular horizontal velocities are observed from 0,2 mm/y to 3,3 mm/y level.

Key words: space geodesy, GPS-method, co-seismic motion, kinematic of fracture zone of crust.

REFERENCES

1. Timofeev, V. Yu., Ardyukov, D. G., Solov'ev, V. M., Shibaev, S. V., Petrov A. F., Gornov, P. Yu., & Timofeev A. V. (2012). Plate boundaries in the Far East region of Russia (from GPS measurement, seismic-prospecting, and seismological data). *Russian Geology and Geophysics*, 53, 321–336.
2. Zonenshain, L. P., & Savostin, L. A. (1981). Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia. *Tectonophysics*, 76, 1–45.
3. Imaev, V. S., Imaeva, P. L., & Kozmin, B. M. (2000). *Seismotectonika Yakutii. [Seismotectonic of Yakutii]*. Moscow: GEOS [in Russian]
4. Gatinskii, Yu. G., & Runquist, D. V. (2004). Geodynamics of Eurasia: Plate Tectonics and Block Tectonics. *Geotectonics*, 38, 1–16.
5. Parfenov, L. M., Berzin, N. A., & Khanchuk, A. I. (2003). Model of tectonic belts for Center and North-East of Asia. *Russian Journal of Pacific Geology*, 22(6), 7–41.
6. Calais, E., Vergnolle, M., San'kov, V., Likhnev, A., Miroshnitchenko, A., Amarjargal, S., & Derverche're, J. (2003). GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994-2002); Implications for current kinematics of Asia. *Journal Geophysical Res.*, 108(10), p. 2501.
7. Malyshev, Yu. F., Podgornyi, V. Ya., Shevchenko, B. F., Romanovskii, N.P., Kaplun, V.B., & Gornov, P. Yu. (2007). Deep Structure of the Amur Lithospheric Plate Border Zone. *Russian Journal of Pacific Geology*, 26(2), 3–17.
8. Timofeev, V. Yu., Kazansky. A. Yu., Ardyukov, D. G., Metelkin, D. V., Gornov, P. Yu., Shestakov, N. V., & Gil'manova, G. Z. (2011). Rotation Parameters of the Siberian Domain and Its Eastern Surrounding Structures during Different Geological Epochs. *Russian Journal of Pacific Geology*, 5(4), 288–297.
9. Boucher C., et al. (2001). *The ITRF 2000*. IERS Technical Note, 2001, No. 31.
10. Drewes, H. (1998). Combination of VLBI, SLR and GPS determined station velocities for actual plate kinematic and crustal deformation models. In *Geodynamics, IAG Symposia*. M. Feissel (Ed.). Springer, 1998.
11. Timofeev, V. Yu., Ardyukov, D. G., Gornov, P. Yu., Malyshev, Yu. F., & Boyko, E. V. (2008). GPS Measurements (2003–2006) in the Sikhote Alin Network, the Far East. *Russian Journal of Pacific Geology*, 1, 314–324.
12. Shestakov, N., Gerasimenko, M., Takahashi, H., Kasahara, M., Bormotov, V., Bykov, V., & Kato, T. (2011). Present tectonics of the southeast of Russia as seen from GPS observations. *Geophysical Journal International*, 184(2), 529–540.

13. Kogan, M. G., Vasilenko, N. F., Frolov, D. I., Freymueller, J. T., Steblov, G. M., Levin, B. W., & Prytkov, A. S. (2011). The mechanism of postseismic deformation triggered by the 2006–2007 great Kuril earthquakes. *Geophysical Res. Lett.*, 38(L06304), 3691–3706.
14. Kogan, M. G., Vasilenko, N. F., Frolov, D. I., Freymueller, J. T., Steblov, G. M., Prytkov, A. S., Ekstrom, G. (2013). Rapid postseismic relaxation after the great 2006–2007 Kuril earthquakes from GPS observations in 2007–2011. *J. Geophys. Res.*, 118(7), 3691–3706.
15. Shestakov, N. V., Takahashi, H., Ohzono, M., Prytkov, A. S., Bykov, V. G., Gerasimenko M. D., ... Serov M. A. (2012). Analysis of the far-field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations. *Tectonophysics*. doi:10.1016/j.tecto.2011.12.019.
16. Shestakov, N. V., Ohzono, M., Takahashi, H., Gerasimenko, M. D., Bykov, V. G., Gordeev, E. I., & Pupatenko. V. V. (2014). Coseismic displacements model for Okhotomorskoe deep earthquake 24.05.2013, M=8.3. *Doklady Earth Sciences*, 457(4), 471–476. doi: 10.7868/S086956521422023X.
17. Timofeev, V., Kulinich, R., Valitov, M., Stus, Y., Kalish, E., Ducarme, B., & Proshkina, Z. (2013). Coseismic effects of the 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake measured at Far East Russia continental coast by gravity and GPS methods. *International Journal of Geosciences*, 4, 362–370.
18. Timofeev, V., Valitov, M., Ducarme, B., Ardyukov, D., Naymov, S., Timofeev, A., Kulinich, R., Kolpashikova, T., Proshkina, Z., Sizikov, I., & Nosov, D. (2016). Tidal effects by gravity and sea level observation, ocean tidal models. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33), 36–47 [in Russian].
19. Timofeev, V., Valitov, M., Ducarme, B., Ardyukov, D., Timofeev, A., Kulinich, R., Kolpashikova, T., Proshkina, Z., Sizikov, I., Nosov, D., & Naymov, S. (2016). Tidal effects by gravity observation, models and liquid core effect. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2(34), 34–46 [in Russian].
20. Ardyukov, D. G., Kalish, E. N., Nosov, D. A., Sizikov, I. S., Smirnov, M. G., Stus, Yu. F., & Valitov, M. G. (2015). Absolute Gravity Measurements at Shults Cape. *Gyroscopy and Navigation*, 6(4), 260–264.

Received 12.01.2017

© V. Yu. Timofeev, D. G. Ardyukov, P. Yu. Gornov,
A. V. Timofeev, M. G. Valitov, E. V. Boyko, 2017