

СОВРЕМЕННЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЮГА О. САХАЛИН ПО ДАННЫМ GNSS НАБЛЮДЕНИЙ

Н.Ф. Василенко, А.С. Прытков

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия;
e-mail: n.vasilenko@imgg.ru, a.prytkov@imgg.ru*

Поступила в редакцию 5 февраля 2024 г.

В региональном структурно-неотектоническом плане юг острова Сахалин состоит из трех поднятий субмеридиональной ориентации и двух разделяющих их прогибов. Организация геодинамической GNSS (Global Navigation Satellite System) сети наблюдений на юге острова позволила оценить вековые вертикальные движения земной поверхности на основе межсейсмических скоростей в системе координат ITRF (International Terrestrial Reference Frame). Межсейсмические вертикальные движения неотектонических структур определены по данным 29 пунктов GNSS наблюдений, где с 1999 г. по 2012 г. было выполнено от 3 до 6 циклов периодических измерений. Характерной чертой межсейсмических движений является поднятие юга острова со средней скоростью 1.1 мм/год, что согласуется с геолого-геоморфологическими исследованиями неотектонического этапа развития региона. Наибольшие скорости (1.0–1.6 мм/год) приурочены к поднятиям, относительно меньшие скорости (0.6–0.7 мм/год) проявляются в прогибах. Выявленные неоднородности скоростей вертикальных движений в прогибах находят отражение в региональном поле горизонтальных деформаций и кинематике разломов, ограничивающих прогибы. Полученные оценки вековых скоростей неотектонических структур отличаются от карты современных вертикальных движений земной коры о. Сахалин (далее – карта СВДЗК), составленной в конце 70-х годов прошлого столетия на основе повторных измерений нивелирной сети и данных постов наблюдений за уровнем моря. Согласно карте СВДЗК, большая часть юга острова характеризовалась опусканием земной поверхности со скоростями до 7–8 мм/год, которое проявлялось как в пределах новейших поднятий, так и прогибов и интерпретировалось в качестве вековых тектонических движений. Сильные сейсмические события, произошедшие на юге острова в период повторных измерений нивелирной сети (1959–1977 гг.), исказили карту СВДЗК как карту вековых тектонических движений.

Ключевые слова: GNSS наблюдения, вертикальные движения земной поверхности, вековые тектонические движения, о. Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

Остров Сахалин расположен в зоне перехода от Азиатского континента к Тихому океану и в тектоническом отношении представляет собой кайнозойскую складчато-глыбовую систему [1, 8]. Юг острова в региональном структурно-неотектоническом плане состоит из трех поднятий, появившихся в плиоцен-четвертичное время (последние примерно 4 млн лет назад): Западно-Сахалинского, Сусунайско-Корсаковского и Тонино-Анивского. Поднятия разделяются двумя прогибами: Сусунайским и Муравьевским (рис. 1). Между поднятиями и прогибами протягиваются главные субмеридиональные разломы юга острова [13].

В конце 70-х годов прошлого столетия была составлена карта современных вертикальных движений земной коры о. Сахалин (далее – карта СВДЗК) [4, 14]. На юге острова в ее геодезическую основу были положены линии повторного высокоточного нивелирования, которые пересекали все неотектонические структуры за исключением Тонино-Анивского поднятия. Для получения абсолютных скоростей вертикальных движений земной поверхности в качестве исходных использовались данные постов наблюдений за уровнем моря, расположенных на юго-западном побережье острова. Юг острова, в целом, характеризовался опусканием земной поверхности, скорость которого увеличивалась в восточном на-

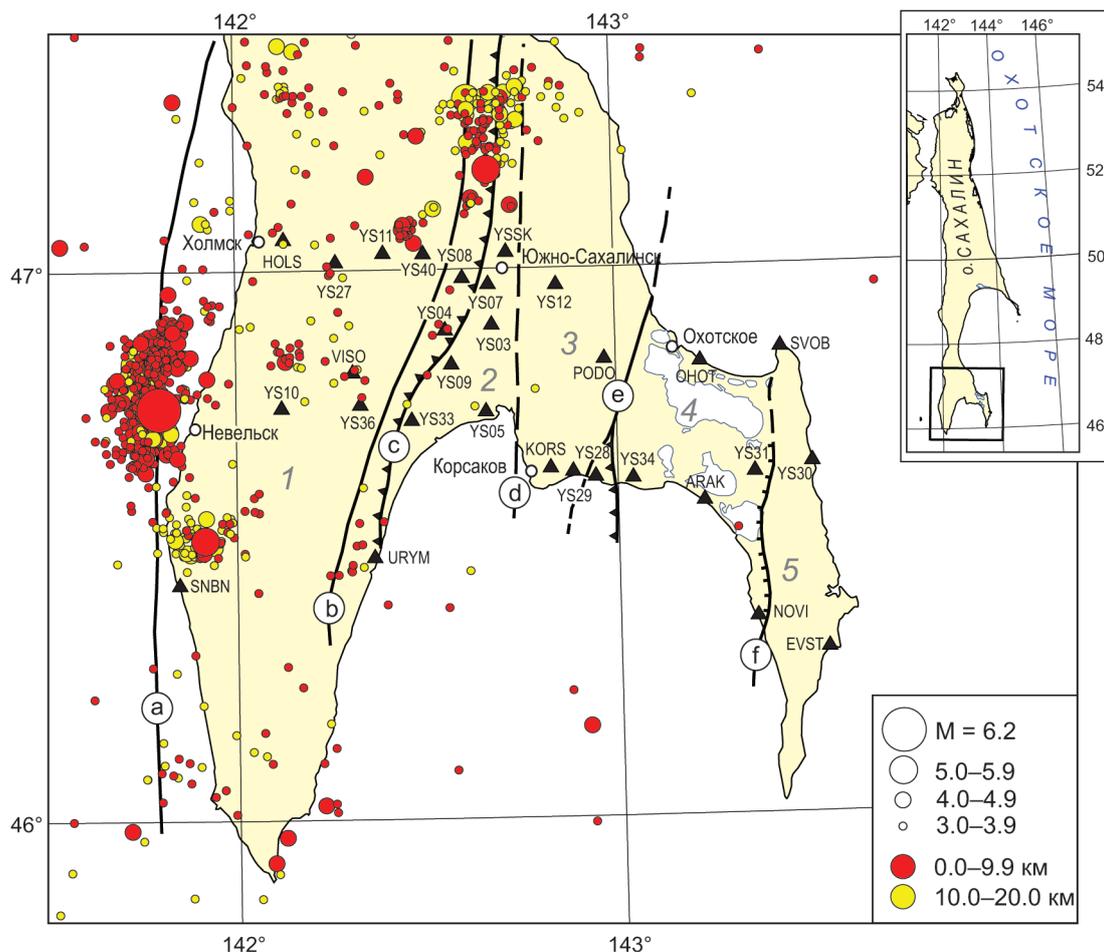


Рис. 1. Схема геодинамической GNSS сети юга о. Сахалин и землетрясения с $M \geq 3.0$ за период 1999–2012 гг. по данным [3, 12].

На врезке показан район исследований. Цифрами обозначены неотектонические структуры: 1 – Западно-Сахалинское поднятие, 2 – Сусунайский прогиб, 3 – Сусунайско-Корсаковское поднятие, 4 – Муравьевский прогиб, 5 – Тонино-Анивское поднятие. Основные разломы (с упрощением) приведены по данным [1, 13]. Буквами в кружках обозначены разломы: а – Западно-Сахалинский, b – Центрально-Сахалинский, с – Апрельский, d – Сусунайский, e – Мерейский, f – Тонино-Анивский. Пунктиром обозначены возможные продолжения разломов в морской акватории и погребенные разрывы. Западно-Сахалинское поднятие и Сусунайский прогиб разделяются Апрельским разломом. Бергштрихи взбросов (треугольники) направлены по наклону сместителя; бергштрихи сбросов – в сторону опущенного крыла.

правлении до 7–8 мм/год. Узкая полоса поднятий со скоростью до 1.7 мм/год выделялась только вдоль западного побережья.

Развитие методов спутниковой геодезии позволило изучать не только горизонтальные, но и вертикальные движения земной поверхности. На юге острова создана сеть геодинамических GNSS (Global Navigation Satellite System) наблюдений, охватывающая все региональные неотектонические структуры. Целью настоящего исследования являлась оценка вековых вертикальных движений земной поверхности южной части о. Сахалин на основе межсейсмических скоростей пунктов геодинамической сети.

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ GNSS СЕТЬ, АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Создание геодинамической GNSS сети на юге о. Сахалин начато в 1999 г., когда были проведены первые измерения на 11 пунктах наблюдений. В 2002–2005 гг. сеть была значительно расширена и охватила все неотектонические структуры региона (рис. 1).

Измерения выполнялись двухчастотными приемниками AshTech Z-XII и Trimble NetRS с антеннами типа Choke Ring. Антенны закреплялись на стандартных штативах, их высота над центром знаков измерялась до и после наблюдений с точностью 0.1 мм. Для исключения систематических ошибок фазовых

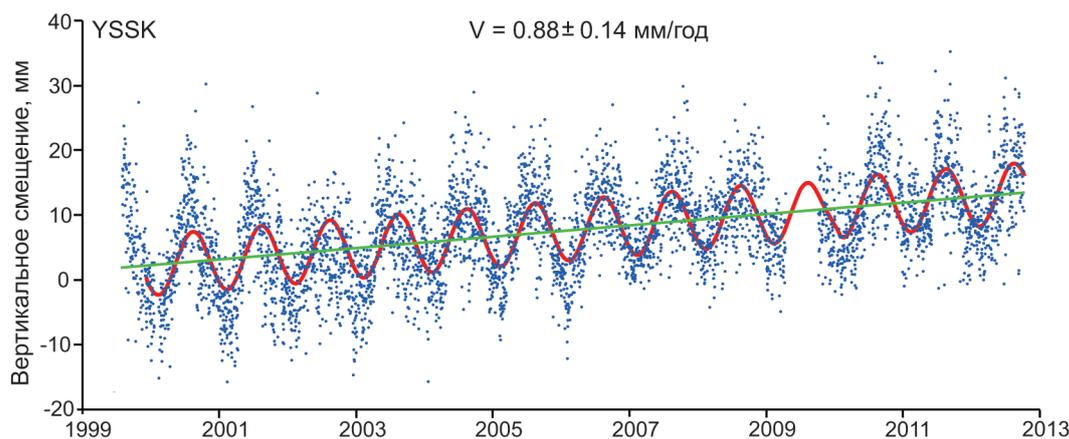


Рис. 2. Изменение высоты станции YSSK за период 1999–2012 гг. в системе координат ITRF2014, по данным [22]. Синусоидой показаны сезонные вариации высоты с годовым периодом, прямой – линейная аппроксимация временного ряда.

центров антенн наблюдения на всех пунктах выполнялись одними и теми же антеннами. Регистрация осуществлялась с 30-секундной дискретностью и маской возвышения спутников от 10° . В качестве опорной использовалась станция YSSK, входящая в состав международной сети IGS (International GNSS Service).

Станция YSSK имеет длительную временную стабильность [22]. В период исследований станция испытала небольшие косейсмические смещения от удаленных сильнейших землетрясений в зоне субдукции Тихоокеанской и Североамериканской (Охотской) литосферных плит: землетрясения Токачи-Оки (восточнее побережья о. Хоккайдо) 26.09.2003 г. $M_w = 8.1$ (-0.50 мм) и Симуширского землетрясения (восточнее одноименного острова, Курильские о-ва) 15.11.2006 г. $M_w = 8.3$ (+0.61 мм) [23]. Временной ряд изменения высоты станции скорректирован за косейсмические смещения, в общеземной системе координат ITRF2014 [17] ее вертикальная скорость в период 1999–2012 гг. составляет $+0.88 \pm 0.14$ мм/год (рис. 2). Амплитуда сезонных вариаций ее высоты с годовым периодом – 4.65 мм. Вопрос о природе этих вариаций до сих пор остается открытым. В числе возможных причин этого явления авторы работ [7, 18] выделяют влияние атмосферной и снеговой нагрузки. В одинаковых климатических условиях сезонные вариации высот пунктов, расположенных на расстояниях в десятки и даже сотни километров, имеют достаточно близкие характеристики. Тем не менее, для минимизации сезонного влияния на точность позиционирования пунктов периодических наблюдений все измерения проводились в летне-осенний период. Продолжительность измерений в каждом цикле составляла 3 суток на пунктах, уда-

ленных более 10 км от опорной станции, и 2 суток для меньших расстояний.

Обработка данных периодических наблюдений осуществлялась с использованием пакета программного обеспечения GAMIT/GLOBK [19]. Высокая точность результатов измерений достигалась после учета различных поправок в процессе обработки. При этом использовались финальные орбиты спутников, представленные IGS, параметры ориентации вращения Земли IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service), таблицы зависимостей фазовых центров антенн, параметров Солнца и Луны и другие материалы, рекомендованные IGS [20].

АНАЛИЗ КОСЕЙСМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Для анализа косейсмических эффектов землетрясений на величины межсейсмических вертикальных скоростей земной поверхности построена карта эпицентров землетрясений юга о. Сахалин с $M \geq 3.0$ за период 1999–2012 гг. (рис. 1). В ее основу легли данные регионального каталога землетрясений [12] и результаты детальных сейсмологических наблюдений, проводимых на юге острова [3]. Ошибки определения координат эпицентров сейсмических событий в районе исследований с 2000 г. не превышают 1.5–2.0 км.

В июле-сентябре 2001 г. к северу от геодинамической сети произошел рой землетрясений с главным толчком $M_w = 5.2$, удаленным от станции YSSK на 23 км. Его косейсмический эффект на станции не проявился [22]. Можно полагать, что вертикальные косейсмические смещения на ближайших пунктах периодических наблюдений также отсутствуют.

В августе 2006 г. на юго-западном побережье острова, в 11 км к северу от пункта SHBN, произошло землетрясение $M_w = 5.6$. Тип смещения в очаге – взброс с небольшой сдвиговой компонентой по суб-меридиональной плоскости сейсморазрыва [5]. Моделирование очага конечным прямоугольным источником с однородным смещением по разлому в упругом полупространстве [21] показывает, что возможное вертикальное косейсмическое смещение ближайшего к эпицентру пункта SHBN пренебрежимо мало.

В августе 2007 г. на шельфе Татарского пролива вблизи г. Невельск произошла серия сильных землетрясений с главным толчком $M_w = 6.2$. Построенная дислокационная модель очага главного толчка и его сильных афтершоков позволила оценить вертикальные косейсмические смещения, которые проявились на расстояниях до 25 км [9]. Ближайшие пункты SHBN и YS10 геодинимической сети расположены, соответственно, в 36 км и 41 км от эпицентра главного толчка.

Магнитуды других коровых землетрясений в окрестностях района исследований не превышают 4.3 и не оказывают никакого влияния на вертикальные смещения пунктов GNSS сети (рис. 1). Косейсмические эффекты землетрясений в зоне субдукции, рассмотренные в предыдущем разделе, имеют практически одинаковую величину на опорной станции YSSK и пунктах геодинимической сети и никак не сказываются на скоростях их относительных вертикальных смещений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Межсейсмические вертикальные движения определены для 29 пунктов геодинимической сети, на которых с 1999 г. по 2012 г. было проведено от 3 до 6 циклов наблюдений. Результаты обработки измерений на некоторых пунктах показаны на рис. 3. Приведение скоростей пунктов периодических наблюдений в общеземную систему координат (относительно центра масс Земли) выполнено путем добавления скорости $(+0.88 \pm 0.14$ мм/год) опорной IGS станции YSSK (табл.).

В таблице пункты периодических наблюдений сгруппированы в границах региональных неотектонических структур [1]. Ошибки их скоростей (σ) имеют достаточно большой разброс, который, в основном, определяется периодом наблюдений, количеством циклов и точностью измерений. С другой стороны, величины вертикальных скоростей (V) могут зависеть как от локальных тектонических условий расположения пунктов, так и от мелкоблокового строения новейших структур. Поэтому оценка вертикальных скоростей неотектонических структур выполнена пу-

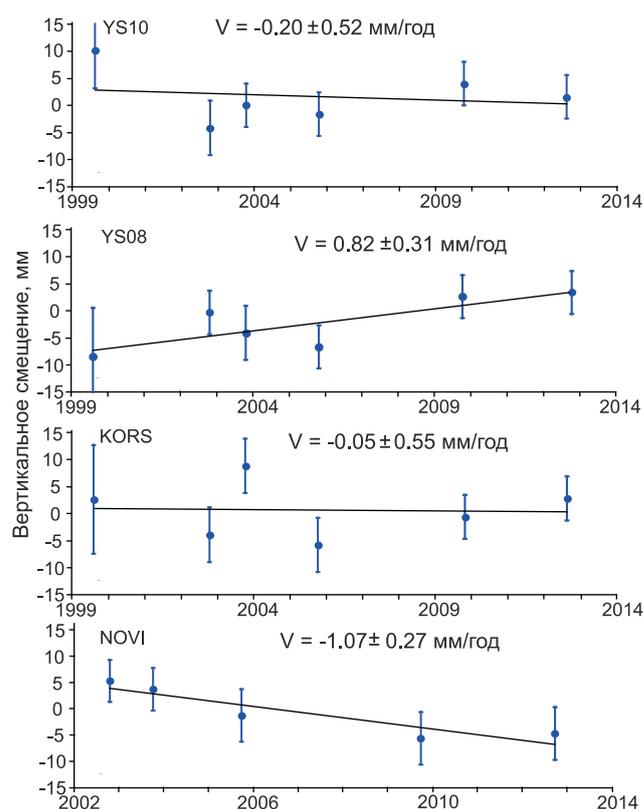


Рис. 3. Временной ряд изменения высот пунктов YS10, YS08, KORS и NOVI относительно станции YSSK.

Вертикальными линиями вверх-вниз от каждой точки показана априорная оценка точности периодических наблюдений, линией – линейная аппроксимация временного ряда.

тем усреднения скоростей пунктов, расположенных в этих структурах, с весами, обратно пропорциональными квадратам их среднеквадратических ошибок.

Схема вертикальных скоростей GNSS пунктов приведена на рис. 4. Главной тенденцией современных движений Южно-Сахалинского неотектонического района являются поднятия земной поверхности, которые проявляются как в пределах новейших поднятий, так и в прогибах. С максимальными скоростями, практически одинаковыми в пределах точности, воздымаются Западно-Сахалинское (1.6 мм/год) и Тонино-Анивское (1.5 мм/год) поднятия, с относительно меньшими скоростями – Сусунайско-Корсаковское поднятие (1.0 мм/год), Сусунайский (0.7 мм/год) и Муравьевский (0.6 мм/год) прогибы (табл.).

В прогибах вертикальные движения земной поверхности неоднородны. Центральная часть Сусунайского прогиба (станция YSSK и пункты YS03, YS05 и YS09) поднимается со скоростью 0.4–0.9 мм/год, в то время как западная его окраина (пункты YS07 и YS33, расположенные непосредственно вблизи Апрель-

Таблица. Межсейсмические вертикальные скорости GNSS пунктов юга о. Сахалин в системе координат ITRF2014.

Пункт	Долгота о	Широта о	Высота м	Период наблюдений	Кол-во циклов	V мм/год	σ мм/год
Западно-Сахалинское поднятие							
SHBN	141.848	46.429	36	2002–2009	4	1.3	0.5
YS10	142.119	46.750	458	1999–2012	6	0.9	0.6
HOLS	142.130	47.057	403	1999–2012	6	1.1	0.8
YS27	142.266	47.015	173	2005–2012	3	1.8	0.5
VISO	142.308	46.814	99	2003–2012	3	1.9	0.4
YS36	142.327	46.755	82	2005–2012	3	1.3	1.2
URYM	142.359	46.477	32	2002–2012	5	2.1	0.6
YS11	142.392	47.030	256	2002–2012	4	2.0	0.5
YS40	142.498	47.029	645	2005–2012	3	1.0	1.4
YS04	142.552	46.889	174	1999–2012	5	1.1	1.1
YS08	142.600	46.984	202	1999–2012	6	1.6	0.4
Среднее: 1.6 ± 0.2 мм/год							
Сусунайский прогиб							
YS33	142.452	46.726	109	2005–2012	3	-0.2	1.2
YS09	142.568	46.827	49	1999–2012	5	0.6	0.3
YS07	142.657	46.972	72	1999–2009	5	-0.4	1.1
YSSK	142.717	47.030	91	1999–2012	непр.	0.88	0.14
YS03	142.676	46.898	44	1999–2012	5	0.4	0.7
YS05	142.657	46.741	28	1999–2012	6	0.7	0.4
Среднее: 0.7 ± 0.2 мм/год							
Сусунайско-Корсаковское поднятие							
KORS	142.824	46.633	103	1999–2012	6	0.9	0.7
YS12	142.846	46.969	490	1999–2012	6	0.8	0.4
YS29	142.883	46.629	50	2005–2012	3	1.0	0.5
YS28	142.941	46.619	64	2005–2012	3	0.8	0.5
PODO	142.970	46.833	84	2003–2012	3	1.3	0.6
YS34	143.077	46.611	288	2005–2012	3	1.4	0.7
Среднее: 1.0 ± 0.2 мм/год							
Муравьевский прогиб							
ОНОТ	143.222	46.825	32	1999–2012	6	0.9	0.3
АРАК	143.226	46.572	30	2002–2012	5	1.3	0.6
YS31	143.317	46.624	81	2005–2012	3	0.1	0.6
NOVI	143.358	46.359	36	2002–2012	5	-0.1	0.4
Среднее: 0.6 ± 0.3 мм/год							
Тонино-Анивское поднятие							
SVOB	143.434	46.848	50	2002–2012	5	1.3	0.5
YS30	143.511	46.638	35	2005–2012	3	2.4	1.0
EVST	143.542	46.229	29	2002–2009	3	0.6	2.3
Среднее: 1.5 ± 0.4 мм/год							
Южно-Сахалинский неотектонический район в целом: 1.1 ± 0.2 мм/год							

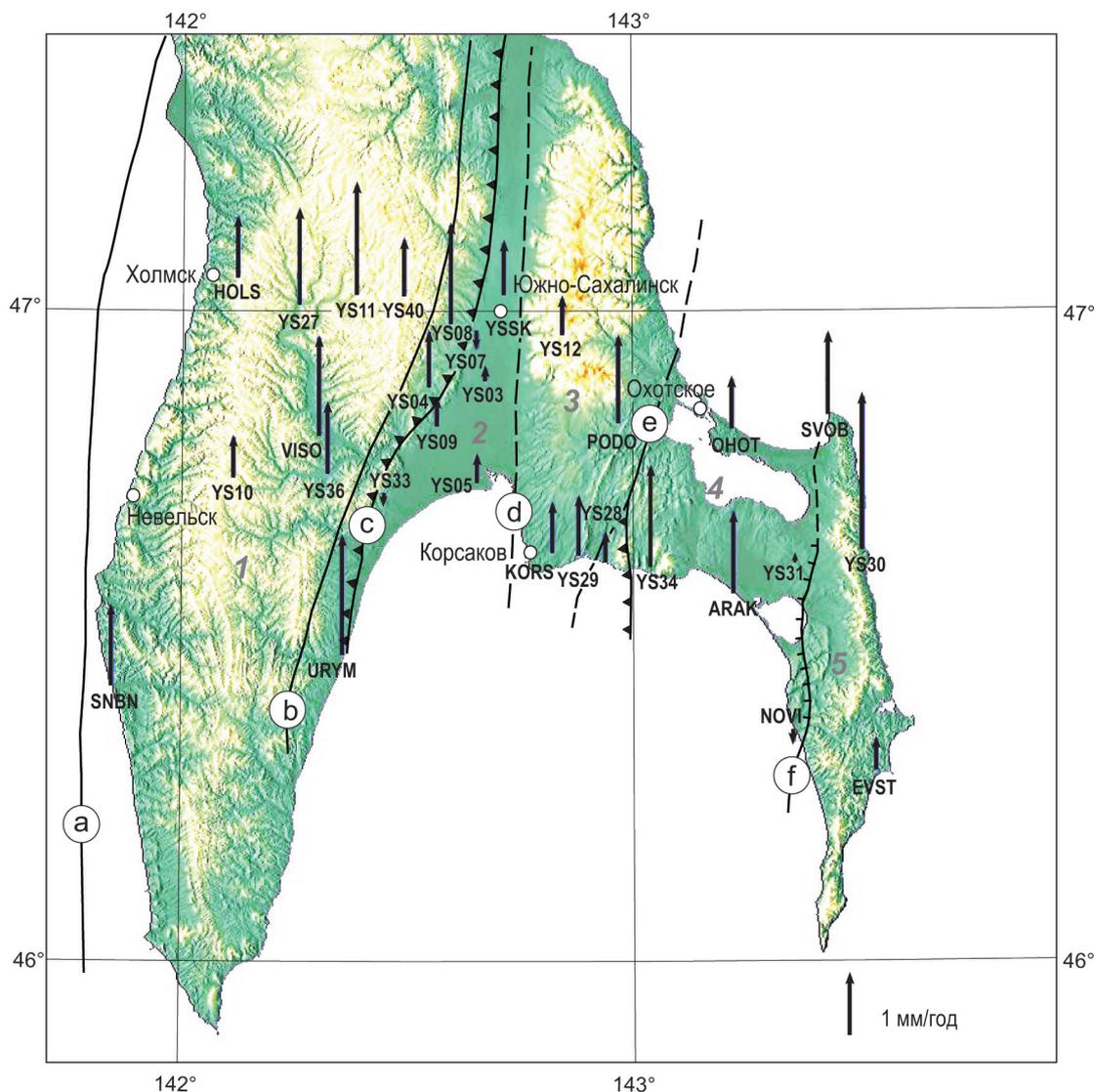


Рис. 4. Схема межсейсмических вертикальных скоростей GNSS пунктов.

Масштаб скоростей приведен в нижней правой части рисунка. Условные обозначения аналогичны рис. 1.

ского разлома), опускается со скоростью ~ 0.3 мм/год. Центральная часть Муравьевского прогиба (пункты ОНОТ и АРАК) поднимается со средней скоростью ~ 1 мм/год, а скорости пунктов NOVI и YS31 в его юго-восточной части пренебрежимо малы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для неотектонического этапа развития о. Сахалин на основе геолого-геоморфологических исследований установлено, что наиболее характерной чертой современных движений является направленное воздымание поднятий, на фоне которых лишь некоторые районы испытывают относительное (относительно поднятий) погружение [2]. Однако количественные

оценки этих движений практически отсутствуют. Только для западного побережья острова скорость поднятия оценена величиной 2.5–3 мм/год.

Вертикальные движения земной поверхности юга острова по данным GNSS наблюдений подтверждают общую тенденцию неотектонических движений и, в отличие от геолого-геоморфологических данных, дают количественную оценку их современных скоростей. Положительные новейшие структуры воздымаются с большими скоростями, чем прогибы, то есть прогибы в среднем опускаются относительно поднятий. В целом, скорость поднятия всего Южно-Сахалинского неотектонического района составляет ~ 1.1 мм/год.

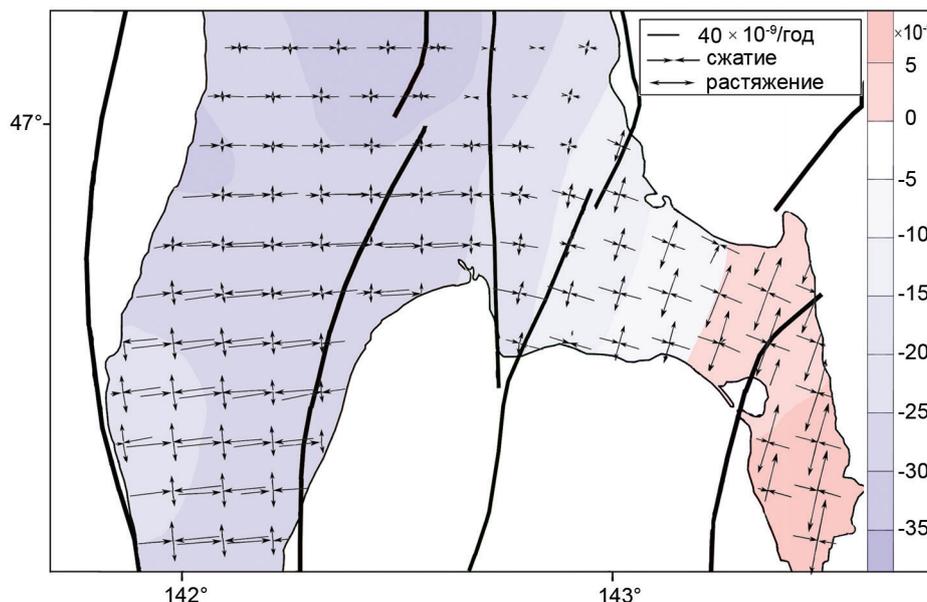


Рис. 5. Скорости дилатации и горизонтальных деформаций земной поверхности юга о. Сахалин за период 1999–2009 гг. Стрелками показаны направления главных осей тензора деформаций. Масштаб деформаций приведен в верхней правой части рисунка. Цветовой гаммой показан масштаб скоростей дилатации. Остальные условные обозначения аналогичны рис. 1.

Неоднородности скоростей вертикальных движений земной поверхности в Сусунайском и Муравьевском прогибах находят отражение в региональном поле горизонтальных деформаций и кинематике разломов, ограничивающих прогибы. Современное деформированное состояние южной части острова, отражающее процессы, протекающие в земной коре, детально рассмотрено в работе [11]. На основе анализа горизонтальных скоростей пунктов геодинимической GNSS сети выявлена сложная и неоднородная картина современных горизонтальных деформаций в окрестностях рассматриваемых неотектонических структур (рис. 5).

Интенсивное деформирование земной поверхности с доминирующей скоростью субширотного сжатия величиной до -7×10^{-8} в год происходит в зонах Западно-Сахалинского поднятия и Сусунайского прогиба, разграниченных активным Апрельским взбросо-надвигом западного падения. В условиях интенсивного сжатия происходит медленный асейсмичный подвиг восточного крыла этого разлома, который отражается в опускании (~ 0.3 мм/год) ближайших пунктов YS07 и YS33 по сравнению со средней (~ 0.7 мм/год) скоростью поднятия пунктов, расположенных в центральной части Сусунайского прогиба (станция YSSK, пункты YS03, YS05 и YS09).

В зонах Сусунайско-Корсаковского поднятия и Муравьевского прогиба происходит изменение деформационного состояния. Преобладающим режи-

мом деформирования становится растяжение земной поверхности. В районе Тонино-Анивского поднятия скорость дилатации достигает 1×10^{-8} в год. Тонино-Анивский разлом, отделяющий одноименное поднятие от Муравьевского прогиба, по данным работ [1, 15], является сбросом западного падения. В условиях растяжения ближайшие к разлому пункты NOVI и YS31, расположенные на сброшенном крыле, испытывают опускание как относительно центральной части Муравьевского прогиба (пункты ОНОТ и АРАК), так и относительно Тонино-Анивского поднятия (табл.).

Полученные оценки вертикальных скоростей неотектонических структур юга острова отличаются от карты СВДЗК [4]. Характерной чертой современных движений является поднятие всего Южно-Сахалинского неотектонического района, тогда как согласно карте большая часть юга острова испытывает опускание, скорость которого увеличивается в восточном направлении до 7–8 мм/год. Только вдоль западного побережья выделяется узкая полоса поднятий земной поверхности со скоростью до 1.7 мм/год (рис. 6). Опускания, которые интерпретировались как вековые, проявлялись инверсионно по отношению к положительным неотектоническим структурам и имели унаследованный характер в пределах новейших прогибов [10, 14].

Унаследованность современных движений позволяет считать, что их скорости присущи тектоническим движениям геологического прошлого. В современных

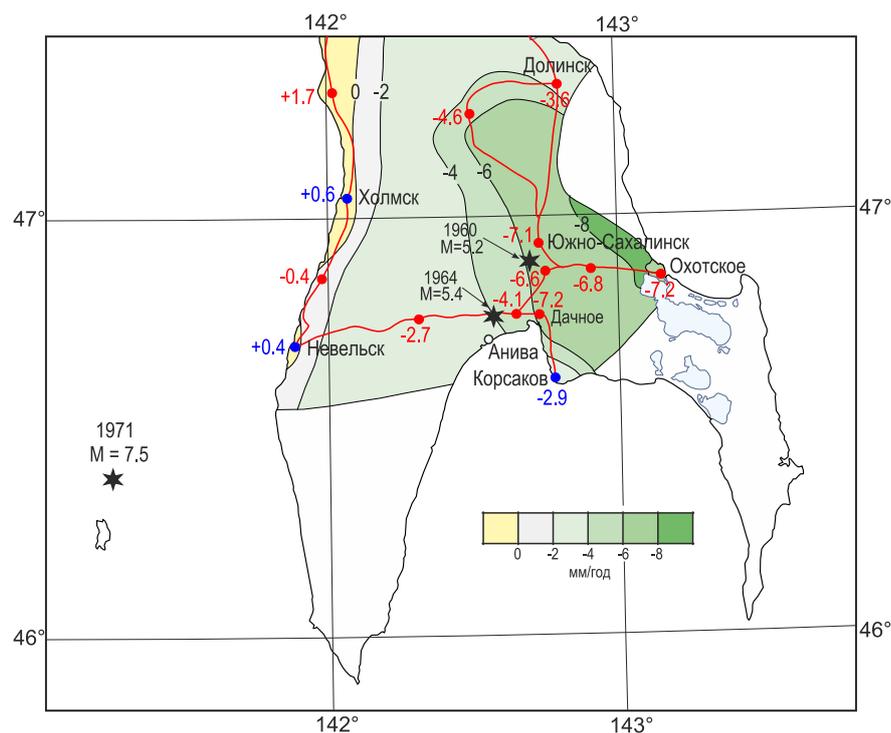


Рис. 6. Фрагмент карты СВДЗК юга о. Сахалин [4].

Цифрами показаны скорости отдельных нивелирных знаков и постов наблюдений за уровнем моря. Изолинии скоростей проведены с учетом качественной связи современных движений с неотектоническими структурами. Градация скоростей показана цветовой гаммой. Сильнейшие землетрясения, произошедшие в период повторного нивелирования, показаны звездочкой. Белым цветом показаны территории, не обеспеченные линиями повторного нивелирования.

движениях следует различать собственно тектонические (вековые) движения, представляющие собой общий тренд, и движения, имеющие причины разного рода [6]. Среди последних особое место занимают сейсмогенные движения. В зависимости от магнитуды землетрясений по своему проявлению они могут быть как локальными, так и охватывать значительные территории, соразмерные с площадями распространения вековых движений того или иного знака.

Геодезическая основа карты СВДЗК включала данные повторного (1959–1977 гг.) нивелирования всей сети юга острова и результаты многократных измерений отдельных ее фрагментов в зоне Западно-Сахалинского поднятия [10]. Период между повторными измерениями характеризовался повышенным уровнем сейсмической активности [12]. В непосредственной близости от нивелирных линий произошли коровые (на глубине 8–10 км) землетрясения: Владимирское 1960 г. $M = 5.2$ и Анивское 1964 г. $M = 5.4$ (рис. 6). В 1971 г. на юге Татарского пролива произошло одно из сильнейших зарегистрированных на Сахалине землетрясений – Монеронское землетрясение $M = 7.5$.

Монеронское землетрясение оказало непосредственное влияние на скорости постов наблюдений

за уровнем моря [16]. Для карты СВДЗК в качестве исходных на юге острова приняты скорости постов в г. Холмске (0.6 мм/год) и г. Невельске (0.4 мм/год), тогда как перед землетрясением и после него скорость поднятия западного побережья составляла около 1 мм/год. С подобной скоростью поднимаются ближайшие к побережью GNSS пункты HOLS и SHBN (1.1 и 1.3 мм/год, соответственно).

В работах [10, 16] составители карты СВДЗК анализируют разнонаправленный характер вертикальных движений островной суши в период 1959–1977 гг., связывая его с Монеронским землетрясением, и приходят к выводу, что аномальными движениями были охвачены не только береговые районы, но и Западно-Сахалинское поднятие. При этом совершенно не рассматривается Анивское землетрясение, которое произошло в окрестности нивелирной сети вблизи границы этого поднятия и Сусунайского прогиба (рис. 6).

Сложный характер вертикальных движений, выявленный при повторных нивелированиях в зоне Западно-Сахалинского поднятия, привел к некорректному выделению его опускания в качестве векового тренда [10]. Скорости абсолютных движений карты

СВДЗК вычислялись относительно постов наблюдений за уровнем моря, расположенных на западном побережье острова, путем вставки уравненных скоростей повторного нивелирования между узловыми пунктами. Поэтому превалирующие опускания в зоне Западно-Сахалинского поднятия распространились на весь юг острова и исказили карту. Можно только отметить, что к востоку от Западно-Сахалинского поднятия, где влияние его опускания после уравнивания скоростей СВДЗК существенно уменьшается, относительные скорости вертикальных движений (рис. 6) достаточно хорошо согласуются с полученными оценками GNSS скоростей неотектонических структур (табл.):

– в пределах ошибок определения совпадают относительные средние скорости вертикальных движений в Сусунайском прогибе, на Сусунайско-Корсаковском поднятии и в северной части Муравьевского прогиба (пос. Охотское) – относительные скорости пунктов YSSK, YS12 и ОНОТ, расположенных в этих структурах и имеющих длительные периоды наблюдений, согласуются с нивелирными данными в пределах 0.4 мм/год;

– вариации нивелирных скоростей в восточной части Сусунайского прогиба (г. Южно-Сахалинск – пос. Дачное) не превышают 0.5 мм/год, в тех же пределах изменяются скорости пунктов YSSK, YS03 и YS05.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Периодические GNSS наблюдения, выполненные в 1999–2012 гг., позволили оценить вековые скорости вертикальных неотектонических движений южной части о. Сахалин.

Характерной чертой современных движений является поднятие Южного Сахалина со средней скоростью ~1.1 мм/год, что согласуется с результатами геолого-геоморфологических исследований неотектонического этапа развития острова. С максимальными скоростями, воздымаются Западно-Сахалинское (1.6 мм/год) и Тонино-Анивское (1.5 мм/год) поднятия. С относительно меньшими средними скоростями поднимаются Сусунайско-Корсаковское поднятие (1.0 мм/год), Сусунайский (0.7 мм/год) и Муравьевский (0.6 мм/год) прогибы. Неоднородный характер вертикальных движений в прогибах находит отражение в региональном поле горизонтальных деформаций и кинематике разломов, ограничивающих прогибы.

Полученные оценки вековых скоростей отличаются от карты СВДЗК, согласно которой Южно-Сахалинский неотектонический район, в основном, испытывает опускание земной поверхности. Сейсмические события, произошедшие в период повторных измере-

ний нивелирной сети, исказили карту СВДЗК как карту вековых тектонических движений юга острова.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИМГиГ ДВО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. Неотектоника и активные разрывы Сахалина. М.: Наука, 2007. 186 с.
2. Геология СССР. Том XXXIII. Остров Сахалин. Геологическое описание / В.Н. Верещагин, Ю.М. Ковтунович (ред.). М.: Недра, 1970. 432 с.
3. Единая геофизическая служба Российской академии наук. <https://www.gsr.ru/new/catalog>
4. Карта современных вертикальных движений земной коры о. Сахалин. 1:1 250 000. Хабаровск: ГУГК, 1980.
5. Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин. Владивосток: Дальнаука, 2014. 252 с.
6. Косыгин Ю.А. Тектоника. М.: Недра, 1988. 464 с.
7. Малкин З.М. Влияние атмосферной нагрузки на координаты и скорости ГНСС-станций // Геодезия и картография. 2008. № 4. С. 31–34.
8. Мельников О.А. Структура и динамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области. М.: Наука, 1987. 95 с.
9. Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 года, о. Сахалин / Б.В. Левин, И.Н. Тихонов (ред.). М.: Янус-К, 2009. 204 с.
10. Никитенко Ю.П., Сергеев К.Ф., Шульман В.А., Золотарская С.Б., Захаров В.К., Семакин В.П., Якушко Г.Г. Карта современных вертикальных движений земной поверхности Сахалина // Современные движения и деформации земной коры на геодинамических полигонах. М.: Наука, 1983. С. 95–99.
11. 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: <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0358>.
12. Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг. / Л.Н. Поплавская (ред.). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 103 с.
13. Рождественский В.С., Сапрыгин С.М. Структурные взаимоотношения неогеновых и четвертичных образований, активные разломы и сейсмичность на Южном Сахалине // Тихоокеан. геология. 1999. Т. 18, № 6. С. 59–70.
14. Сергеев К.Ф., Никитенко Ю.П., Шульман В.А., Золотарская С.Б., Захаров В.К., Семакин В.П., Якушко Г.Г. Современные вертикальные движения земной коры о. Сахалин // Докл. АН СССР. 1981. Т. 257, № 1. С. 202–204.
15. Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.
16. Якушко Г.Г. Аномальное изменение уровня моря перед Монеронским землетрясением 1971 г. // Обработка сейсмологических наблюдений и поиск предвестников землетрясений на Дальнем Востоке. Владивосток: Дальнаука, 1978. С. 105–110.
17. Altamimi Z., Metivier L., Rebischung P., Rouby H, Xavier C. ITRF2014 plate motion model // Geophys. J. International. 2017. V. 209, N 3. P. 1906–1912.

- DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggx136>
18. Heki K. Seasonal modulation of interseismic strain buildup in Northeastern Japan driven by snow loads. *Science*. 2001. V. 293. P. 89–92.
DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1061056>
19. GAMIT/GLOBK Documentation. <https://geoweb.mit.edu/gg/docs.php>
20. International GNSS Service. <https://igs.org>
21. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a halfspace // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1985. V. 75, N 4. 1135–1154.
DOI: <https://doi.org/10.1785/BSSA0750041135>
22. Scripps Orbit and Permanent Array Center. <http://sopac-csrc.ucsd.edu>
23. The United States Geological Survey, Earthquake Hazard Program. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>

Рекомендована к печати А.В. Коноваловым

после доработки 17.05.2024 г.

принята к печати 12.09.2024 г.

RECENT VERTICAL CRUSTAL MOVEMENTS IN SOUTHERN SAKHALIN FROM GNSS DATA

N.F. Vasilenko, A.S. Prytkov

Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia; e-mail: n.vasilenko@imgg.ru, a.prytkov@imgg.ru

In the regional structural-neotectonic aspect, the south of Sakhalin Island consists of three submeridional uplifts and two troughs separating them. The geodynamic GNSS (Global Navigation Satellite System) network installed in the south of the island made it possible to estimate secular vertical movements of the earth's surface based on interseismic velocities in the International Terrestrial Reference Frame. The interseismic vertical movements of neotectonic structures were determined from the data of 29 GNSS observation points where 3 to 6 periodic measurement cycles were completed from 1999 to 2012. A characteristic feature of interseismic movements of the earth's surface is the uplift of the entire Yuzhno-Sakhalinsk neotectonic region at an average rate of 1.1 mm/yr, which is in the agreement with the geological and geomorphological studies of the neotectonic evolution of Sakhalin. The highest velocities (1.0–1.6 mm/yr) are confined to uplifts, relatively lower velocities (0.6–0.7 mm/yr) occur in troughs. The revealed inhomogeneities of vertical velocities in the troughs are reflected in the regional field of horizontal deformations and kinematics of faults bounding the troughs. The obtained estimates of the secular neotectonic rates do not agree with the Map of recent vertical movements of the earth's crust of the Sakhalin Island (hereinafter referred to as the RVMEC Map) compiled in the late 1970s. Its geodetic justification was based on the lines of repeated high-precision leveling and the data of sea level observation posts. According to the RVMEC Map, the Yuzhno-Sakhalinsk neotectonic region, as a whole, was characterized by the subsidence of the earth's surface at rates up to 7–8 mm/yr both within the neotectonic uplifts and the troughs and were interpreted as secular tectonic movements. Strong seismic events that occurred during the period of repeated leveling (1959–1977) distorted the RVMEC Map as a map of secular tectonic movements in southern Sakhalin.

Key words: GNSS observations, vertical movements of the earth's surface, secular tectonic movements, Sakhalin.