

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОДИНАМИКИ ЗОНЫ СОПРЯЖЕНИЯ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА С ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМОЙ ПО ДАННЫМ ГНСС-НАБЛЮДЕНИЙ

*В. Л. Горшков<sup>2</sup>, А. В. Мохнаткин<sup>1</sup>, С. С. Смирнов<sup>1</sup>,  
С. Д. Петров<sup>1</sup>, Д. А. Трофимов<sup>1</sup>, Н. В. Щербакова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,

Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

<sup>2</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,

Российская Федерация, 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65/1

По данным наблюдений за период с 1993 по 2014 год на 27 перманентных ГНСС-станциях, охватывающих бассейн Финского залива, исследована геодинамика региона. Впервые были использованы данные с ведомственных станций Комитета по градостроительству и архитектуре города Санкт-Петербурга. Данный регион интересен с геодинамической точки зрения как зона сопряжения древнейших геологических форм Балтийского щита и осадочного чехла Восточно-Европейской платформы. Ряды положений ГНСС-станций были вычислены с помощью пакета GIPSY 6.3 с использованием стратегии PPP и исправлены за нагрузочные эффекты атмосферы. По этим рядам было получено поле скоростей станций, использованное в дальнейшем для оценки поля деформаций региона. Поле деформаций было оценено с помощью алгоритма, который рассматривает в заданных точках тензор деформаций как симметричную часть градиента скоростей. Компоненты деформации найдены на основе МНК и сглаживающей ковариационной функции. Векторы скоростей станций, полученные в результате обработки наблюдений, отнесенные к Балтийскому щиту, очевидным образом демонстрируют локальный поворот Балтийского щита в направлении против часовой стрелки относительно Восточно-Европейской платформы. Полученное поле деформаций характеризуется слабым, до 3 нанострейн в год, сжатием в направлении северо-запад — юго-восток. Библиогр. 14 назв. Ил. 2. Табл. 1.

*Ключевые слова:* ГНСС, геодинамика, Балтийский щит, Евразийская плита, поле деформаций, PPP, GIPSY-OASIS, МНК.

**Введение.** Современные представления о горизонтальных движениях литосферных плит основаны на данных середины прошлого века о полосовых магнитных аномалиях вдоль срединных океанических хребтов, вызванных периодическими сменами ориентации глобального магнитного поля и раздвиганием дна океана (спрединг). Тогда же возникло понимание динамики литосферы на основе глобального распределения сейсмических поясов в зонах субдукции и механизмов землетрясений в трансформных разломах. На основе этих данных были оконтурены крупные литосферные плиты и построены первые модели их движения [1, 2].

Развитие методов космической геодезии позволило с высокой точностью осуществить прямые измерения современных движений литосферных плит и деформаций на их границах. Плотные ГНСС-сети в областях, находящихся вблизи активных разломов и зон сопряжения тектонических плит, позволяют в режиме реального времени отслеживать динамику региональных деформационных процессов. Эти данные позволяют строить адекватные геодинамические модели, в том числе выделять все более мелкие структуры в литосферных плитах. В настоящее время количество разномасштабных литосферных блоков исчисляется десятками [3]. Выделяется дюжина крупных и несколько десятков средних плит с дальнейшей структуризацией до микроплит.

Евразийская плита (ЕА) состоит из многочисленных платформ и щитов разного геологического возраста. Сопряжению таких структур на северо-западе ЕА-плиты —

кристаллического Балтийского щита и осадочной Русской платформы — посвящено данное исследование. Граница этих геологических структур проходит по югу Финского залива и Ладожского озера. Здесь на протяжении 300 км сменяется несколько геологических эпох от Архея на северо-западе до позднего Палеозоя на юго-востоке Ленинградской области, что составляет почти 3 млрд лет геологической истории Земли [4]. Данный регион представляет геодинамический интерес как переходная зона между этими геологическими структурами.

До недавнего времени этот регион рассматривался как спокойный в сейсмическом отношении. Однако Осмуссаарское (1976.10.25,  $M=4.6$ ) и Калининградское (2004.9.21,  $M=5.0$ ) землетрясения значительно повысили интерес к его геодинамике [5, 6].

На предыдущем этапе исследований данного региона [7] по данным ГНСС-наблюдений на 6 перманентных станциях в районе Финского залива было исследовано поле современных деформаций ( $\Delta L/L$ ) земной коры. Анализ поля скоростей станций позволил предположить, что указанная выше граница отождествляется незначительным разворотом векторов скоростей по разные стороны Финского залива. В данной работе на основе значительно расширенного списка станций сделаны новые оценки деформаций для рассматриваемого региона.

**Данные и метод исследования.** Исходными данными для оценки скоростей станций в исследуемом регионе являлись ГНСС-наблюдения перманентных станций России, Финляндии и Эстонии за период 1993–2014 годов. Наблюдения на станциях (суточные RINEX файлы с 30 секундной дискретизацией), входящих в Европейскую международную глобальную сеть (EPN), были взяты из архивов (<ftp://igs.bkg.bund.de/EUREF/obs/>). На территории России помимо наблюдений на станциях EPN (SVTL и PULK) использовались наблюдения на станциях сети Комитета по градостроительству и архитектуре Санкт-Петербурга, а также наблюдения на других перманентных станциях Санкт-Петербурга и Ленинградской области ряда геодезических и научных организаций, любезно предоставленные авторам для данного исследования.

Ряды среднесуточных положений станций были вычислены с помощью пакета GIPSY версии 6.3, отнесены к эллипсоиду GRS80 и переведены в систему IGS08. Вычисления проводились с использованием стратегии PPP (Precise Point Positioning). При этом были учтены:

- абсолютная калибровка антенн,
- точные орбитальные параметры и поправки часов, вычисленные в системе IGS08 с использованием стандартов IERS2010 ([ftp://sidshow.jpl.nasa.gov/pub/JPL\\_GPS\\_Products/Final](ftp://sidshow.jpl.nasa.gov/pub/JPL_GPS_Products/Final)),
- параметры ориентации Земли из IERS решения CO4 (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>),
- тропосферная модель VMF1GRID (<http://mars.hg.tuwien.ac.at/~ecmwf1/GRID/>),
- океанические приливные нагрузки по модели GOT4.8 (<http://holt.oso.chalmers.se/loading/>) и все твердотельные приливы, включая соответствующие полюсные приливы,
- атмосферные нагрузки по модели MERRA из IMLS (<http://massloading.net/>, [8]).

Модельные нагрузки за грунтовые воды, имеющие исключительно сезонные вариации, в работе не использовались ввиду их неадекватности сезонным вариациям положений почти всех исследуемых станций. Как показывает опыт оценки линейных трендов при наличии сезонных вариаций в наблюдениях, последние практически не влияют на оценки скоростей станций при продолжительности наблюдений более трех лет и даже меньше при кратном целом годам периоде наблюдений.

Для обработки наблюдений использовались только полные суточные данные станций. Помимо этого были учтены все смещения в рядах положений, возникающие из-за смены антенн и других причин, а также удалены некачественные наблюдения по элементарным статистическим критериям. По полученным рядам координат были оценены скорости станций и их ошибки. Скорости были редуцированы за вращение плиты ЕА по модели ITRF2008-PMM [9].

Поле деформаций в узлах регулярной сетки вычислялось по скоростям станций по аналогии с работой [10]. Рассмотрим задачу нахождения поля деформаций для остаточных горизонтальных скоростей в двухмерном приближении. В результате ГНСС-наблюдений для  $n$  станций получим матрицу

$$v_{2 \times n} = \begin{pmatrix} v_{1N} & v_{2N} & \cdots \\ v_{1E} & v_{2E} & \cdots \end{pmatrix}, \quad (1)$$

образованную из компонент скорости в локальной системе координат север-восток. Для заданной точки поля деформаций можно записать

$$v = L\Delta x + v_0, \quad (2)$$

где

$$v_{02 \times n} = \begin{pmatrix} v_{0N} & v_{0N} & \cdots \\ v_{0E} & v_{0E} & \cdots \end{pmatrix} \quad (3)$$

— матрица, образованная компонентами скорости в точке;

$$\Delta x_{2 \times n} = \begin{pmatrix} \Delta x_{1N} & \Delta x_{2N} & \cdots \\ \Delta x_{1E} & \Delta x_{2E} & \cdots \end{pmatrix} \quad (4)$$

— матрица разностей координат между точкой и  $n$  станциями;

$$L = \begin{pmatrix} \frac{\partial v_N}{\partial x_N} & \frac{\partial v_N}{\partial x_E} \\ \frac{\partial v_E}{\partial x_N} & \frac{\partial v_E}{\partial x_E} \end{pmatrix} \quad (5)$$

— градиент вектора скорости.

Задача нахождения элементов матрицы  $L$  приближенно решается с помощью взвешенного МНК:

$$u^T = \{v_{0N}, v_{0E}, L_{11}, L_{12}, L_{21}, L_{22}\} \quad (6)$$

— искомый вектор,

$$\hat{u} = (A^T W A)^{-1} A^T W v, \quad (7)$$

где

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta x_{1N} & \Delta x_{1E} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x_{1N} & \Delta x_{1E} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & 0 & \Delta x_{nN} & \Delta x_{nE} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x_{nN} & \Delta x_{nE} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$v_{1 \times 2n}^T = \{v_{1N}, v_{1E}, \dots\}, \quad (9)$$

$$W_{2n \times 2n} = \text{diag} \left( f \left( \frac{d_1}{d_0} \right) \sigma_{v_{1N}}^{-2}, f \left( \frac{d_1}{d_0} \right) \sigma_{v_{1E}}^{-2}, \dots \right), \quad (10)$$

$f\left(\frac{d_i}{d_0}\right)$  — масштабирующая функция, характеризующая степень значимости  $i$ -й станции в зависимости от расстояния до заданной точки  $d_i$ ,  $d_0$  — масштабный параметр, который определяется как значение не менее среднего расстояния между станциями. Масштабирующая функция должна быстро убывать с увеличением расстояния свыше масштабного фактора. По примеру Шена и Джексона [11] для этого была выбрана функция  $\exp(-d_i/d_0)$ .

Квадратную матрицу градиента скоростей можно представить как сумму симметричной и антисимметричной матриц соответственно тензора деформации  $D$  и тензора вращения твердого тела  $\Omega$ :

$$L = D + \Omega, \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial v_N}{\partial x_N} & \frac{\partial v_N}{\partial x_E} \\ \frac{\partial v_E}{\partial x_N} & \frac{\partial v_E}{\partial x_E} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \frac{\partial v_N}{\partial x_N} & \frac{\partial v_N}{\partial x_E} + \frac{\partial v_E}{\partial x_N} \\ \frac{\partial v_E}{\partial x_N} + \frac{\partial v_N}{\partial x_E} & \frac{\partial v_E}{\partial x_E} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial v_N}{\partial x_N} & \frac{\partial v_N}{\partial x_E} - \frac{\partial v_E}{\partial x_N} \\ \frac{\partial v_E}{\partial x_N} - \frac{\partial v_N}{\partial x_E} & \frac{\partial v_E}{\partial x_E} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Наибольшее и наименьшее собственные числа тензора  $D$  характеризуют максимум и минимум величины напряжения в данной точке, а его собственные векторы, соответственно, — направления этих напряжений. Напряжение имеет размерность относительного удлинения за единицу времени.

При этом используется качественный критерий для оценки значимости напряжений. Напряжение считается значимым в данном узле, если хотя бы одна ГНСС-станция присутствует в окрестности  $d_0$  этого узла, в остальных случаях результат считается незначимым.

Одним из сложных моментов работы с исходными данными, ввиду его неформальности, является выбор подходящих для целей исследования станций. В некоторых случаях монтажки антенн вышеуказанных станций на крышах строений не соответствуют стандартам закрепления геодезических марок, т.е. не обеспечивают самого существенного для данной работы — их долговременной стабильности по отношению к земным маркам. К сожалению, не всегда это очевидно из фотографий, приведенных на сайтах соответствующих служб. В ряде случаев из-за грунтов сами здания могут иметь собственную, не обязательно вертикальную, динамику проседания, а иногда антенны могут быть неудачно закреплены.

Наиболее очевидно это проявилось на эстонских станциях SUUR, где антенна была перемещена на 63 см, и TORA, где антенна перенесена на 250 м на другое здание. Это привело к значительному изменению направлений векторов скоростей: на станции TORA — на 75 градусов, а на станции SUUR направление изменилось на 30

градусов, при этом в разы увеличилась скорость. На территории Пулковской обсерватории работают 3 перманентных станции, на одной из которых также был осуществлен перенос антенны на 8 м, и один полевой пункт с историей наблюдений с 1993 года. Все данные этого полигона (размером 350 × 400 м) незначительно различаются по величине скорости, но по направлению охватывают почти 80 градусов.

Такой разброс векторов скоростей, относящихся к одному и тому же месту, ставит определенные ограничения на выбор станций и в целом на геодинамические выводы. Фактически это означает, что эллипсы ошибок векторов скоростей, полученные по оценкам линейных трендов на каждой станции, существенно занижены по сравнению с реальными ошибками. В нашем исследовании ошибок скоростей станций на полигоне Пулковской обсерватории [12] показано, что их тип распределения близок к фликкер-шумам и, следовательно, ошибки, вычисленные по методу наименьших квадратов, должны быть увеличены в 5–8 раз. Это почти совпадает с ошибками, вычисленными по сходимости скоростей всех станций на полигоне.

В итоге нами были отклонены данные некоторых городских станций с непродолжительной историей и сильно уклоняющимися векторами скоростей. Для станций,

**Скорости станций редуцированные за движение ЕА плиты**

станции	$\varphi$	$\lambda$	$V_E$ (мм/год)	$V_N$ (мм/год)	период	дни
SVTL RU	60.533	29.781	0.37 ± 0.007	-0.93 ± 0.007	1997–2014	6276
PULK RU	59.772	30.328	0.34 0.008	-0.86 0.009	2002–2014	4398
PULJ RU	59.772	30.328	0.02 0.052	-0.90 0.056	2008–2012	1130
SPTR RU	59.772	30.328	0.05 0.020	-0.34 0.023	2006–2014	2456
PUL1 RU	59.772	30.328	-0.10 0.053	-0.43 0.073	1993–2011	71
SPBU RU	59.942	30.295	-0.25 0.016	-1.23 0.019	2006–2014	2486
BNTA RU	59.922	30.282	-0.95 0.128	-1.36 0.134	2012–2014	738
TL60 RU	59.538	30.884	-0.53 0.121	-2.77 0.143	2012–2014	747
GOGL RU	60.086	26.974	0.18 0.046	-1.00 0.214	1994–2012	11
VYBO RU	60.725	28.696	-0.18 0.594	-0.84 0.354	1993–1997	14
VASO RU	59.943	30.273	-0.61 0.093	0.27 0.083	2012–2014	794
PETR RU	59.891	29.842	-0.44 0.082	-1.32 0.091	2012–2014	724
FONT RU	59.919	30.309	0.53 0.093	-1.42 0.112	2012–2014	636
LOM2 RU	59.891	29.786	-0.26 0.126	0.18 0.138	2012–2014	624
PRV2 RU	60.173	29.455	0.51 0.136	-0.92 0.125	2012–2014	613
SEST RU	60.120	29.952	-0.85 0.139	0.30 0.126	2012–2014	648
PUSH RU	59.739	30.390	-0.24 0.117	-0.55 0.126	2012–2014	669
SVED RU	59.792	30.675	-0.20 0.119	-0.16 0.126	2012–2014	702
MURN RU	60.058	30.454	-0.86 0.143	-0.53 0.133	2012–2014	600
KUP2 RU	59.888	30.375	-0.96 0.132	-0.93 0.123	2012–2014	699
GORN RU	59.931	30.267	-0.94 0.117	0.27 0.117	2012–2014	682
METS FI	60.217	24.395	0.45 0.005	-1.00 0.005	1993–2014	7352
VIRO FI	60.539	27.555	0.36 0.016	-1.20 0.018	1999–2013	1839
TUOR FI	60.462	22.358	0.56 0.020	-1.22 0.019	2006–2013	2543
SUUR ES	59.464	24.367	-0.01 0.006	-0.98 0.008	1996–2014	6060
KURE ES	58.256	22.510	0.05 0.022	-1.17 0.018	2008–2014	2325
TOIL ES	59.422	27.537	0.07 0.021	-0.60 0.024	2008–2014	2329
TORA ES	58.265	26.466	-0.12 0.025	-1.18 0.021	2008–2014	2163

где были произведены переносы антенн, мы сочли возможным объединить их ряды наблюдений, так как при вычислении деформаций их данные фактически используются как средневзвешенные в данной точке.

**Геодинамика региона.** В таблице приведены данные обо всех использованных в исследовании станциях. На рис. 1 приведена карта скоростей исследованных

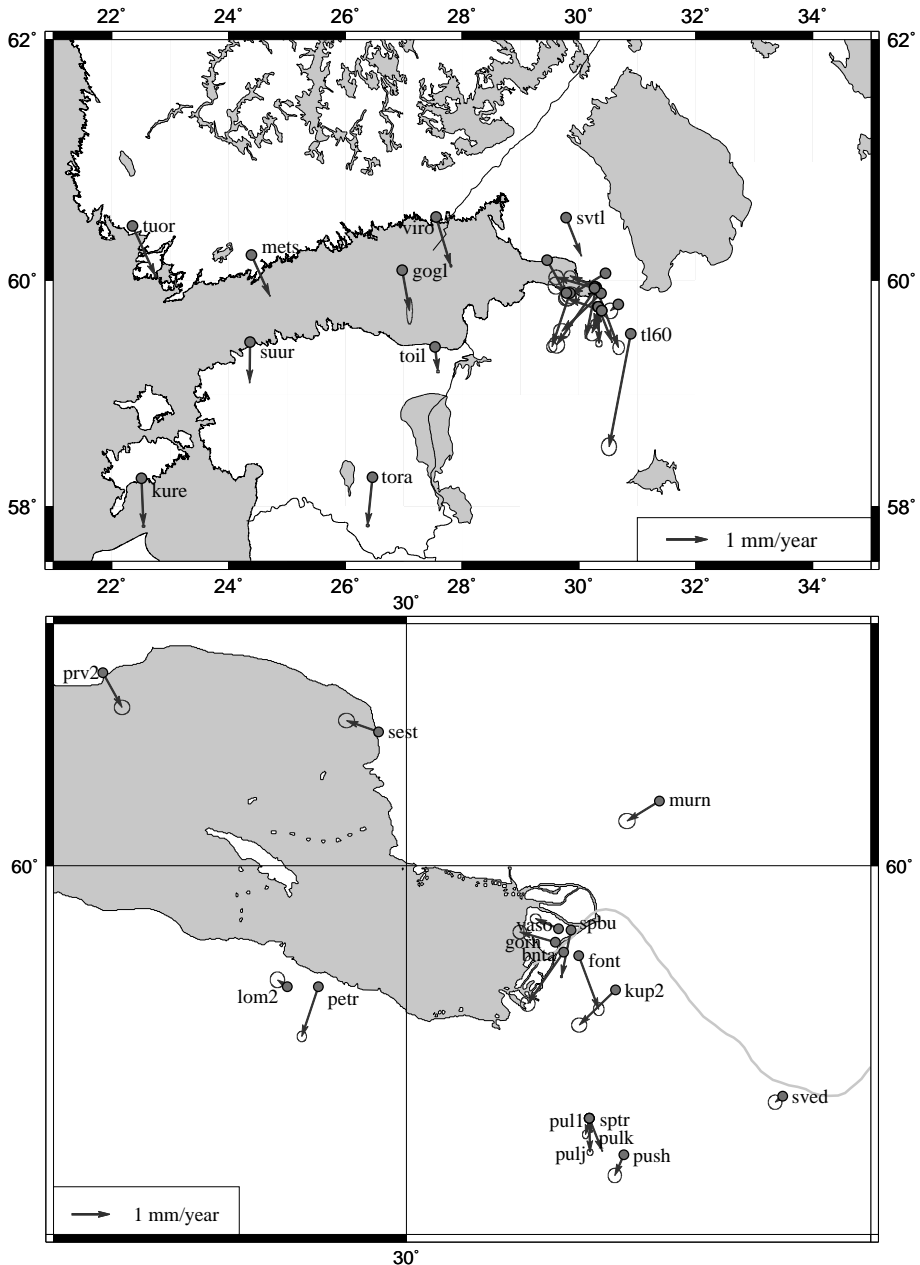


Рис. 1. Векторы скоростей станций.

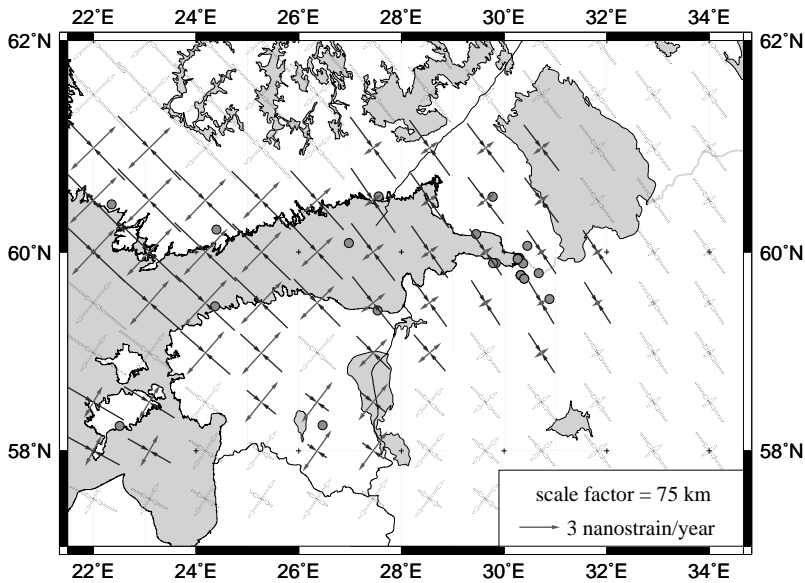


Рис. 2. Поле деформаций региона.

станций. Можно заметить некоторые особенности в характере поля остаточных скоростей исследуемого региона: 1) заметен разворот по часовой стрелке (к западу) скоростей станций на южном берегу Финского залива по отношению к северным станциям, 2) скорости станций в непосредственной близости к Петербургу в среднем в еще большей степени отклоняются к западу, 3) эти станции имеют большой разброс направлений скоростей. Последняя особенность может объясняться проявлением дополнительных нагрузок из-за городских застроек, искажающих естественную динамику грунтов. Тем не менее, и в этом разбросе существует некоторая систематика. Так, скорости станций, расположенных на Васильевском острове (VASO, GORN) и в Сестрорецке практически совпадают по направлению, при этом резко отличаясь от всех остальных. Этот факт очень интересен и требует дополнительных наблюдений на уплотненной сети.

Искомый взаимный разворот исследуемых блоков коры, Балтийского щита (В) и Русской платформы (R), может быть определен посредством вычисления пары эйлеровых полюсов вращения по векторам скоростей станций соответствующей принадлежности. Вычисление их мгновенных угловых скоростей  $\omega_B$  и  $\omega_R$  и оценка значимости их разности является предметом отдельного исследования. Для решения этой задачи необходимо использовать максимально возможное количество станций из этих регионов, предварительно исключив систематику в скоростях станций Балтийского щита, обусловленную послеледниковым поднятием.

Заметим, что при вычислении эйлеровых полюсов для ЕА-плиты ни одна из исследуемых в этой работе станций не использовалась, и вообще не использовалась ни одна станция в этом регионе с широтой более  $55^\circ$  с. ш. Поэтому скорости станций Балтийского щита и близких к ним станций Русской платформы имеют видимую систематику относительно ЕА-плиты, отражающую, по всей вероятности, эффект послеледникового поднятия данного региона [13].

На рис. 2 представлена карта деформаций региона, вычисленная по вышеприведенному алгоритму. Использован масштабный параметр  $d_0=75$  км. Видно слабое

( $\Delta L/L = 3$  нанострейна в год) сжатие региона в направлении с северо-запада на юго-восток. Именно в этом регионе в 2013 году в один день, 4 февраля, произошли два землетрясения на разных бортах Финского залива — в 20 км к востоку от станции METS с магнитудой 1.3 и в 70 км к западу от станции SUUR с магнитудой 1.0. И, хотя сигнал землетрясений практически не был замечен в записях координат станций [14], эти события несомненно подтверждают геодинамическую активность региона, отражающуюся в полученном нами деформационном поле.

**Выводы.** На интервале с 1993 по 2014 год с помощью пакета GIPSY 6.3 вычислены ряды положений 27 перманентных ГНСС-станций России, Эстонии и Финляндии, окружающих регион Финского залива. При этом были также учтены нагрузочные атмосферные поправки. Проведен анализ полученного по этим рядам поля остаточных (после исключения вращения ЕА-плиты) скоростей станций региона. Обнаружено незначительное различие векторов скоростей станций по разные стороны Финского залива. Для окончательного суждения о различии геодинамических характеристик этих областей необходимо привлечение большего количества данных как на Балтийском шите, так и на Восточно-Европейской равнине. Оценено поле деформаций региона, характеризующееся слабым сжатием в направлении с северо-запада на юго-восток.

## Литература

1. *Ле Пилион К.* Спрединг океанического дна и дрейф континентов // Новая глобальная тектоника. М.: Мир, 1974. С. 93–132.
2. *Morgan W. P.* Plate motion and deep mantle convection // Hess Volume, Shagam R. (ed), Geol. Soc. Am., Mem. 1971. С. 132.
3. *Bird P.* An updated digital model of plate boundaries // Geochemistry Geophysics Geosystems, 2003 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.
4. *Исаченко И. А.* Путешествие длиной в 300 километров и 3 миллиарда лет // География, 2003, № 3.
5. *Ассиновская Б. А., Горшков В. Л., Щербакова Н. В., Панас Н. М.* Активные разломы, установленные по данным геодинамических наблюдений в Балтийском море // Инженерные изыскания. № 2, 2013. С. 50–55.
6. *Assinovskaya B., Shchukin J., Gorshkov V., Shcherbakova N.* On recent geodynamics of the Eastern Baltic Sea region // Baltica, 2011, 24 (2). P. 61–70.
7. *Горшков В. Л., Смирнов С. С., Щербакова Н. В.* Нагрузочные эффекты в ГНСС-наблюдениях при исследовании региональной геодинамики // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Серия 1, 2012. Вып. 2. С. 148–156.
8. *Petrov L., Boy J.-P.* Study of the atmospheric pressure loading signal in VLBI observations // J. Geophys. Res., 2004, 10.1029/2003JB002500. Vol. 109, N B03405.
9. *Altamimi Z., Metivier L., Collilieux X.* ITRF2008 plate motion model // J. Geophys. Res., 2012. Vol. 117, Issue B7, DOI: 10.1029/2011JB008930.
10. *Teza G., Pesci A., Galgano A.* Grid\_strain and grid\_strain3: Soft-ware packages for strain field computation in 2D and 3D environments. Computers & Geosciences, 2008, 34, 9. С. 1142–1153.
11. *Shen Z. K., Jackson D. D.* Optimal estimation of geodetic strain rates from GPS data // EOS Transactions of the American Geophysical Union 2000, 81 (19), S406.
12. *Горшков В. Л., Щербакова Н. В.* Исследование случайных и систематических ошибок GPS-наблюдений на территории Пулковской обсерватории // Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле». № 4. 2012. С. 12–22. URL: <http://geo-science.ru/>
13. *Lidberg M., Jonsson J. M., Scherneck H. G., Milne G. A.* Recent results base on continuous GPS observations of the GIA process in Fenno-scandia from BIFROST // J.Geodyn, 2010, doi:10.1016/j.jog.2009.11.010.



14. Горшков В. Л., Щербакова Н. В., Ассиновская Б. А. Влияние слабых или далеких землетрясений на GPS-кинематику // Изыскательский вестник. С.-Петерб. о-во геодезии и картографии. 2013, №2(17). С. 34–39.

Статья поступила в редакцию 26 марта 2015 г.

#### Сведения об авторах

Горшков Виктор Леонидович — кандидат физико-математических наук; vigor@gao.spb.ru

Мокнаткин Артём Витальевич — студент; artspace3@mail.ru

Петров Сергей Дмитриевич — кандидат физико-математических наук, доцент; petr0v@mail.ru

Смирнов Сергей Сергеевич — инженер-программист; Microsoft-SUXX@mail.ru

Трофимов Дмитрий Александрович — старший преподаватель; dm.trofimov@gmail.com

Щербакова Наталья Васильевна — научный сотрудник; coper@gao.spb.ru

### STUDY OF GEODYNAMICS OF BOUNDARY ZONE BETWEEN BALTIC SHIELD AND EAST EUROPEAN PLATFORM BY USING GNSS OBSERVATIONS

Viktor L. Gorshkov<sup>2</sup>, Artem V. Mokhnatkin<sup>1</sup>, Sergei D. Petrov<sup>1</sup>,  
Sergei S. Smirnov<sup>1</sup>, Dmitry A. Trofimov<sup>1</sup>, Natalia V. Scherbakova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> St.Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7/9, St.Petersburg, 199034, Russian Federation; artspace3@mail.ru, petr0v@mail.ru, Microsoft-SUXX@mail.ru, dm.trofimov@gmail.com

<sup>2</sup> Pulkovo Observatory of RAS, Pulkovskoe chaussee, 65/1, St.Petersburg, 196140, Russian Federation; vigor@gao.spb.ru, coper@gao.spb.ru

The data of 27 permanent GNSS-stations around the Gulf of Finland for 1993–2014 years were used to study the geodynamics of this region. For the first time the data was used from the stations of the Committee on Urban Planning and Architecture of St.Petersburg. The geodynamics of this region is interesting as that of a transition zone between the Baltic Shield and the East European Platform. The PPP strategy of GIPSY 6.3 was used for calculation of station position time series and reduced for atmospheric loadings. The station velocities corrected for loading effects were used to assess the strain field of this region. For these series were obtained velocity field used in the future to evaluate the deformation field in the region. The strain field was estimated by the algorithm that considers at predetermined points the strain tensor as the symmetric part of the velocity gradient. Strain components were found on the basis of Least square method and the smoothing covariance function. Velocity vectors of stations obtained by processing the observations, referred to the Baltic shield, obviously demonstrate a local rotation of the Baltic Shield in the counterclockwise direction with respect to the East-European platform. The strain field has the weak (up to 3 nanostrain/year) compression in direction from north-west to south-east. Refs 14. Figs 2. Tables 1.

*Keywords:* GNSS, geodynamics, Baltic shield, Euro-Asian plate, Strain field, PPP, GIPSY-OASIS, LSM.

#### References

1. Le Pichon X., “Sea-floor spreading and continental drift”, *J. Geophys. Res.* **73**, 3661–3697 (1968).
2. Morgan W. P., “Plate motion and deep mantle convection” (ed. by R. Shagam), *Hess Volume, Geol. Soc. Am., Mem.* 132 (1971).
3. Bird P., “An updated digital model of plate boundaries”, *Geochemistry Geophysics Geosystems* **4**(3), 1027 (2003), doi:10.1029/2001GC000252.
4. Isachenko I. A., “Trip in 300 km and 3 billion years”, *Geografiya* (3) 2003.
5. Assinovskaya B. A., Gorshkov V. L., Shcherbakova N. V., Panas N. M., “Active faults revealed in the Baltic Sea using geodynamic observation data”, *Injenernye iziskaniya* (2), 50–55 (2013).
6. Assinovskaya B., Shchukin J., Gorshkov V., Shcherbakova N., “On recent geodynamics of the Eastern Baltic Sea region”, *Baltica* **24**(2), 61–70 (2011).
7. Gorshkov V. L., Smirnov S. S., Shcherbakova N. V., “GNSS loadings effect in regional geodynamics study”, *Vestn. S.-Peterb. un-ta. Series 1: Mathematics. Mechanics. Astronomy* Issue 2, 148–156 (2012).
8. Petrov L., Boy J.-P., “Study of the atmospheric pressure loading signal in VLBI observations”, *J. Geophys. Res.* 10.1029/2003JB002500, **109**(B03405), 2004.

9. Altamimi Z., Metivier L., Collilieux X., "ITRF2008 plate motion model", *J. Geophys. Res.* **117**, Issue B7 (2012), DOI: 10.1029/2011JB008930.
10. Teza G., Pesci A., Galgaro A., "Grid\_strain and grid\_strain3: Soft-ware packages for strain field computation in 2D and 3D environments", *Computers & Geosciences* **34**(9), 1142–1153 (2008).
11. Shen Z. K., Jackson D. D., "Optimal estimation of geodetic strain rates from GPS data", *EOS Transactions of the American Geophysical Union* **81**(19), S406 (2000).
12. Gorshkov V. L., Shcherbakova N. V., "The investigation of the noise and systematic errors of GPS observations inside the Pulkovo observatory territory", *International science and product e-journal «Nauki o Zemle»* (4), 12–22 (2012), URL: <http://geo-science.ru/>
13. Lidberg M., Jonsson J. M., Scherneck H. G., Milne G. A., "Recent results base on continuous GPS observations of the GIA process in Fenno-scandia from BIFROST", *J. Geodyn* (2010), doi:10.1016/j.jog.2009.11.010.
14. Gorshkov V. L., Shcherbakova N. V., Assinovskaya B. A., "Influence of weak and distant earthquakes on GPS-kinematics", *Izyskatelsky vestnik. Sankt-Peterburgskoe obshestvo geodezii and kartografii* N 2(17), 34–39 (2013).