

НАГРУЗОЧНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГНСС-НАБЛЮДЕНИЯХ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РЕГИОНАЛЬНОЙ ГЕОДИНАМИКИ

В. Л. Горшков¹, С. С. Смирнов², Н. В. Щербакова³

1. С.-Петербургский государственный университет,
канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., vigor@gao.spb.ru

2. С.-Петербургский государственный университет,
мл. науч. сотр., Microsoft-SUXX@mail.ru

3. С.-Петербургский государственный университет,
науч. сотр., copper@gao.spb.ru

Введение. В последние годы на южном побережье Финского залива (в Эстонии) и в Санкт-Петербурге появился ряд перманентных станций глобальной навигационной системы (ГНСС), позволяющих более детально изучать геодинамику этого региона. Эти станции имеют пока непродолжительную историю наблюдений и поэтому не вошли в последние результаты по программе исследования постледникового поднятия Фенноскандии (BIFROST) [1]. Тем не менее, ввиду достаточно высокой точности современных ГНСС-наблюдений можно получить оценки скоростей смещения станций, приемлемые для геодинамических исследований. Учет всех возможных систематических поправок в этих наблюдениях позволяет корректно оценить и учесть сезонные вариации наблюдений. Исследование возникающих из-за этих факторов нагрузочных возмущений на GPS-наблюдения является одной из основных задач данной работы.

Одной из актуальных проблем геодинамики северо-запада Европы является исследование постледникового поднятия этого региона. Балтийский щит — одна из древнейших геологических структур — продолжает свой «подъем» после схода мощного ледника, покрывавшего этот регион в течение тысяч лет. Многочисленные геодезические, гравиметрические и гидрологические (уровень моря) исследования в странах Скандинавии позволили создать карту этого поднятия. Максимальный подъем (до 1 см в год) наблюдается на севере Ботнического залива, который плавно спадает к границам Балтийского щита. В частности, через Ленинградскую область проходит граница этого поднятия, сменяющаяся далее на юго-восток слабой депрессией.

С этим переходным регионом, рассеченным долиной Невы и Финским заливом, могут быть связаны зоны внутриплитовой нестабильности и разломов. Так, например, район северной части Финского залива представляет собой сложную картину из микроплит и разломов с элементами сейсмической активности [2]. Аналогичные исследования южной части Балтики [3] стали особенно актуальны в связи с прокладкой газопровода по дну Финского залива, наличием АЭС и произошедшим в сентябре 2004 года Калининградским землетрясением.

В работе исследована геодинамика этого региона по GPS-измерениям с учетом нагрузочных возмущений. Исследование динамики взаимных положений станций этого региона целесообразно также в связи с размещением в последние годы постоянно действующих трехкомпонентных сейсмических станций регионального типа в г. Выборге, на о-ве Валаам и др., что дает возможность последующей совместной обра-

ботки этих независимых наблюдений для извлечения синхронной геодинимической информации.

Данные наблюдений. Большинство исследуемых в работе станций (METS, SUUR, TOIL, SVTL, PULK) включены в Европейскую ГНСС-сеть (EPN), поэтому данные их наблюдений и их характеристики доступны (<http://epncb.oma.be/>) для общего пользования. Станция VIRO входит в национальную геодезическую сеть Финляндии. Часть данных VIRO была любезно предоставлена нам финскими коллегами, а также использовалось решение для этой станции из работы [1].

Станция Астрономического института СПбГУ (SPBU) функционирует в перманентном режиме с мая 2006 года, но пока не входит в сеть EPN. На этой станции используется прецизионный двухчастотный приемник Javad Lexion GGD (JPS E_GGD) с антенной JNS Choke Ring (JAVRINGANT_DM), оснащенной защитным кожухом (JVDM). Антенна установлена на двухметровом геодезическом столбе, выстроенном, в свою очередь, на фундаментальной стене здания Службы Времени АИ СПбГУ. Видимость спутников у горизонта постоянно перекрыта зданием (300–30 градусов по азимуту и до 10 градусов по высоте) и деревьями в летний период наблюдений (30–110 градусов по азимуту и до 20 по высоте).

Методы обработки и анализа. Обработка наблюдений с помощью пакета GIPSY-OASIS II (5.0 версия) была произведена в ГАО РАН с использованием стратегии PPP (точное определение положения станции). Координаты отнесены к эллипсоиду WGS84 и переведены в систему IGS05. Необходимые для обработки точные орбиты спутников, поправки часов и параметры вращения Земли, были взяты из <ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/>. Для разрешения фазовых неоднозначностей использовался пакет AMBIZAP-2 [4]. Использовалась абсолютная калибровка антенн и модель тропосферы (картирующая функция) GMF. Океанические приливные нагрузки учитывались по данным соответствующей службы [5]. Для обработки наблюдений использовались только полные суточные данные всех станций. Помимо этого были удалены некачественные наблюдения по элементарным статистическим критериям.

Для анализа временных рядов положений станций и выделения в них низкочастотной составляющей использовался сингулярный спектральный анализ (ССА), детально описанный в [6] и программно реализованный в СПбГУ под названием «Гусеница». Метод наиболее адекватен для выделения информативных компонентов в рядах нестационарной природы. При этом хорошо выделяются трендовые и квазигармонические компоненты, что особенно ценно для анализа положений станций, поскольку именно трендовые и сезонные составляющие являются основными исследуемыми характеристиками в структуре этих рядов. Метод требует равномерного временного распределения данных, поэтому необходима предварительная интерполяция пропущенных наблюдений.

Процедура исследования одномерного временного ряда длины N начинается с преобразования его в многомерный. Задавшись основным параметром метода (окно или длина «гусеницы») $M < N/2$, значениями исходного ряда последовательно заполняют строки траекторной матрицы \mathbf{X} . При этом первая строка содержит первые M элементов ряда, вторая — со второго элемента по $M + 1$ и так далее до исчерпания ряда. После центрирования по столбцам и соответствующей нормировки вычисляется корреляционная матрица $\mathbf{R} = \mathbf{X}\mathbf{X}^T$, сингулярное разложение которой $\mathbf{R} = \mathbf{P}\mathbf{L}\mathbf{P}^T$ дает диагональную матрицу собственных чисел \mathbf{L} и ортогональную матрицу собствен-

ных векторов \mathbf{P} матрицы \mathbf{R} . Таким образом, базисные функции метода порождаются самим исследуемым рядом, формируя оптимальный базис разложения, так как являются собственными векторами корреляционной матрицы \mathbf{R} . Ввиду ортогональности матрицы \mathbf{P} можно восстановить матрицу $\mathbf{X} = \mathbf{Y}\mathbf{P}^T$, используя выбранные главные компоненты \mathbf{Y}_i .

Собственные вектора корреляционной матрицы выступают в роли передаточных функций соответствующих фильтров. Чем больше M , тем уже полоса фильтра. Выбор нескольких главных компонент эквивалентен параллельному соединению соответствующих фильтров, что позволяет управлять формой спектральной характеристики.

Таким образом, любые гармонические или квазигармонические колебания исходного ряда обуславливаются парой близких собственных значений, парой собственных векторов и парой главных компонент, что дает возможность восстановить ряд по информативным компонентам, исследовать структуру исходного ряда и изолировать отдельные, интересующие исследователя, трендовые, периодические или квазипериодические компоненты и шум. При этом возможно выделение даже слабых, но значимых трендов, в том числе, нелинейных.

Анализ и учет нагрузочных эффектов. Большинство рядов положений станций обнаруживают нестационарные сезонные вариации, особенно значительные в вертикальных компонентах (до ± 25 мм в исследуемом регионе). Таким образом, оценки линейных (вековых) трендов, необходимые в геодинамических исследованиях, могут быть искаженными. В принципе, по метеорологическим и гидрологическим данным, собранным в близком к станции районе, можно построить простую регрессионную модель этих сезонных вариаций [7]. Однако далеко не для всех станций можно найти соответствующие немодельные данные, и, главное, такой подход не является достаточно строгим с геофизической точки зрения. Изменения координат станций из-за различных геофизических нагрузок требуют учета упругих свойств деформируемой под нагрузками Земли. Для этого необходима свертка вариаций поля поверхностного давления, окружающего данную географическую точку, с соответствующей для вертикальных или горизонтальных смещений функцией Грина [8]. При этом численная оценка функций Грина требует вычисления достаточно большого количества членов разложения нагрузочных числа Лява для принятой модели Земли.

В работе [9] проанализированы разнообразные факторы, ответственные за сезонные вариации в GPS-наблюдениях. Часть из них (полюсной и океанической приливы) учитывается при обработке в самом пакете GIPSY-OASIS. Влияния неприливных океанических нагрузок (стерических, из-за сезонных вариаций плотности воды, и нестерических — ветровые воздействия, обменная с атмосферой гидродинамика и т. д.) для исследуемого региона не превышают 1 мм в вертикальных и долей миллиметра в горизонтальных компонентах станций. Термическое влияние на элементы конструкции антенных опор также не превышает долей миллиметра в вертикальных компонентах станций, т. к. подверженные влиянию сезонных термических вариаций внешние элементы антенных опор не превышают 1.5 м. Таким образом, основными факторами сезонных вариаций в координатах ГНСС-станций являются нагрузочные эффекты атмосферного и гидрологического характера.

На рис. 1 приведены не исправленные за эти нагрузки вариации положений исследуемых станций в вертикальных составляющих как наиболее чувствительных к сезонным нагрузкам. Для всех станций в зимний сезон происходит уменьшение высо-

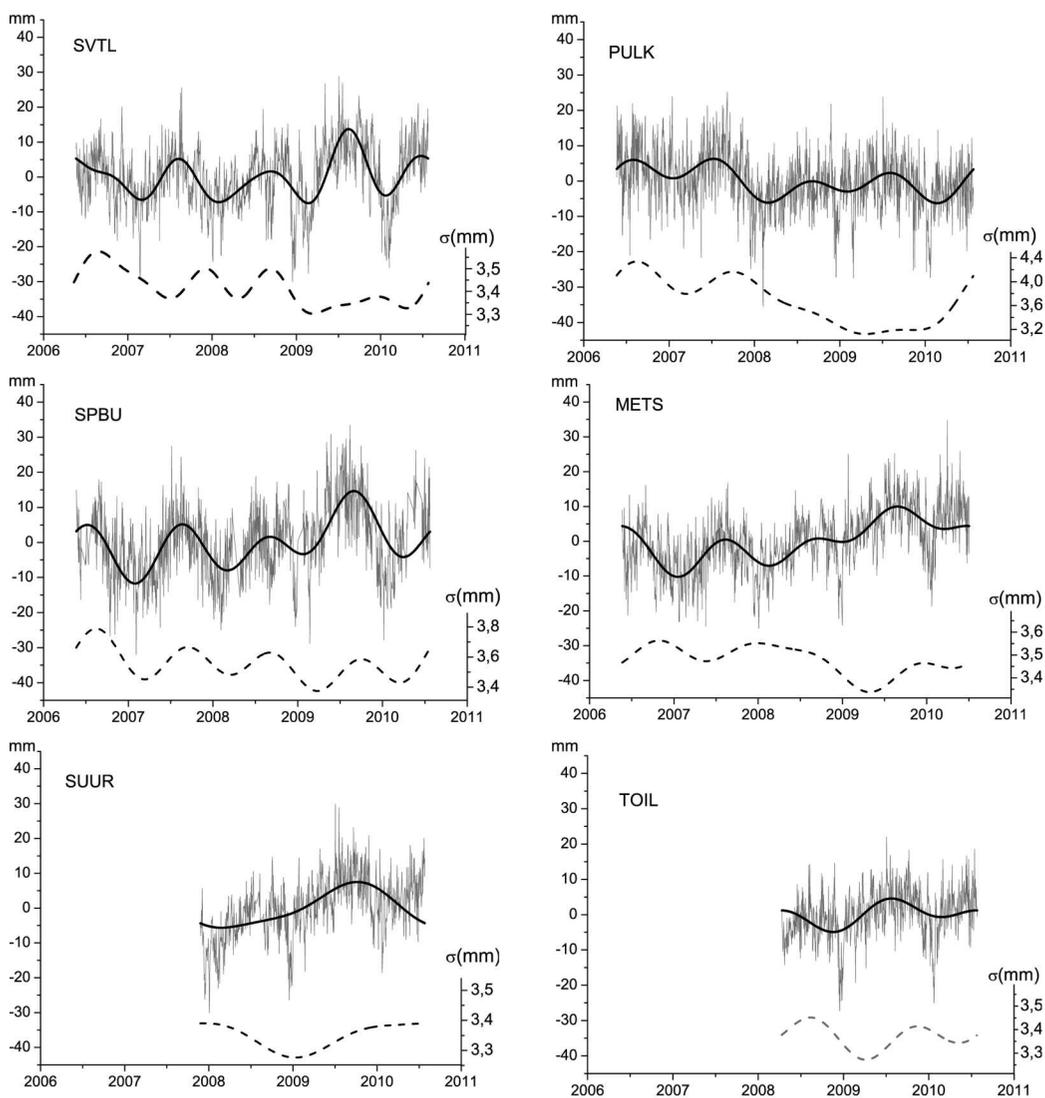


Рис. 1. Вариации вертикальных компонентов станций. Приведены оценки сезонных вариаций с помощью ССА, а также сглаженные вариации суточных ошибок σ_H (штриховая линия, шкала справа).

ты, т. е. нагрузки в этот период максимальны. Это естественно для станций северных широт с продолжительным периодом снежного покрова.

Проявление сезонности заметно не только в положениях станций, но и в вариациях их суточных ошибок, главным образом, ошибок вертикальной составляющей. При этом сезонность в ошибках вертикальных составляющих менее выражена и различна для разных станций вплоть до противоположного проявления. Наиболее ярко выражена сезонность и коррелированность этих величин на станции SPBU, что, вероятно, связано с расположением станции в центре города, в окружении высоких зданий и деревьев. В частности, отмеченная выше сезонность в распределении спутников кор-

релирует с вариациями ошибок определения координат. А именно, уменьшение числа наблюдаемых спутников в летний период из-за экранирования их листвой деревьев приводит к увеличению ошибок наблюдений.

Атмосферные нагрузки. Поправки за атмосферные нагрузки для всех станций интерполировались по данным службы VLBI NASA [10] (<http://gemini.gsfc.nasa.gov/aplo/>). Эти поправки вычислены с использованием поля атмосферного давления по данным модели NCEP Reanalysis (<ftp://ftp.cdc.noaa.gov>) на сетке 2.5×2.5 градуса с разрешением 6 часов. Для исследуемых станций эти поправки в пиковых значениях достигали 20 мм в вертикальных компонентах станций и 2 мм в горизонтальных.

Вариации атмосферных нагрузок определяются, в основном, циклональной атмосферной деятельностью, и, следовательно, помимо сезонной составляющей имеют существенную составляющую на частотах погодных вариаций барических полей. Поэтому учет этих поправок незначительно уменьшает шумовые характеристики вертикальной составляющей в рядах положений, как это видно по оценкам линейных трендов V_U в таблице.

Вертикальные скорости станций в зависимости от учитываемых нагрузок

стан. нагр.	V_N (мм/год)			V_E (мм/год)			V_U (мм/год)		
	б/н	атм	атм+гв	б/н	атм	атм+гв	б/н	атм	атм+гв
SPBU	11.49 ± 0.07	11.49 ± 0.07	11.56 ± 0.07	20.63 ± 0.06	20.59 ± 0.07	20.60 ± 0.07	2.34 ± 0.24	3.24 ± 0.21	4.50 ± 0.19
PULK	11.96 ± 0.06	11.94 ± 0.06	12.01 ± 0.06	21.37 ± 0.06	21.35 ± 0.06	21.33 ± 0.07	-1.86 ± 0.17	-1.23 ± 0.16	0.21 ± 0.17
SVTL	11.50 ± 0.06	11.55 ± 0.06	11.54 ± 0.06	21.39 ± 0.06	21.46 ± 0.06	21.29 ± 0.06	1.18 ± 0.19	1.85 ± 0.17	2.71 ± 0.15
TOIL	12.30 ± 0.16	— —	12.52 ± 0.16	20.30 ± 0.15	— —	20.18 ± 0.15	3.20 ± 0.35	— —	4.46 ± 0.35
SUUR	12.61 ± 0.11	12.43 ± 0.12	12.77 ± 0.11	19.67 ± 0.12	19.64 ± 0.12	19.76 ± 0.11	6.13 ± 0.31	6.36 ± 0.29	6.06 ± 0.29
METS	12.76 ± 0.06	12.73 ± 0.06	12.76 ± 0.06	19.92 ± 0.07	19.93 ± 0.07	19.79 ± 0.07	3.66 ± 0.16	4.33 ± 0.15	5.42 ± 0.14

Видно также, что учет атмосферных нагрузок приводит почти для всех станций, ввиду их региональной близости, к значимому увеличению оценки скорости V_U . Действительно, в соответствии с вышеупомянутыми данными тренд поправок за эти нагрузки для исследуемого региона и анализируемого периода (2006–2010 гг.) изменяется в пределах от -0.86 ± 0.14 мм/год для станции SPBU (рис. 2, слева) до -0.09 ± 0.23 мм/год для станции SUUR. Если использовать период с 1999 года для этого же региона, то этот тренд, естественно, уменьшается до случайной величины -0.04 ± 0.06 мм/год. Это свидетельствует о региональной тенденции в исследуемый период к преобладанию пониженного атмосферного давления, т. е. о нарастании циклонального атмосферного режима в регионе.

Нагрузки за вариации уровня воды в Ладоге. Для станций SVTL, как наиболее близкой к бассейну Ладожского озера, были учтены также поправки за нагрузки, возникающие вследствие вариаций уровня воды в озере, любезно вычисленные по нашей просьбе  Воу по аналогичной атмосферным нагрузкам методике. Эти поправки в вертикальной компоненте составили для станции SVTL 2.1 мм на 1 метр вариаций уровня воды в Ладоге и приведены на рис. 2 (справа). Для остальных станций они не превосходили 1 мм. Вариации уровня воды в Ладоге интерполировались нами

по данным спутниковой альтиметрии (<http://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/>).

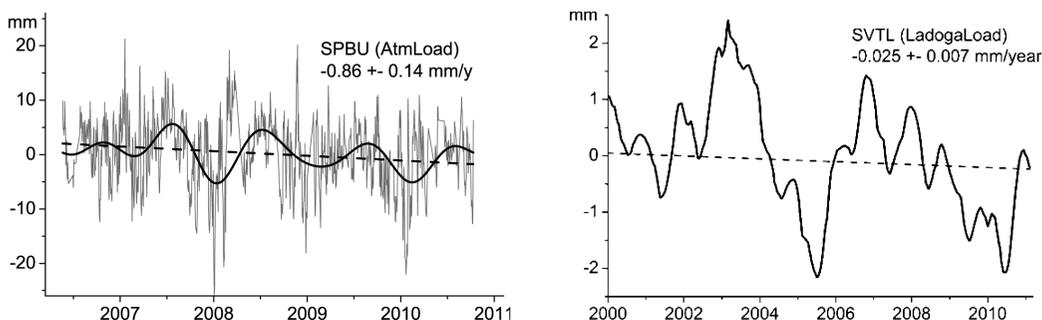


Рис. 2. Слева — для станции SPBU вариации атмосферных нагрузок, их линейный (штриховая линия) и сезонный (выделенный с помощью ССА) тренды. Справа — для станции SVTL вариации нагрузок, вызванные вариациями уровня воды в оз. Ладога и их линейный тренд за последние 15 лет.

Нагрузки за вариации уровня грунтовых вод. Уровень грунтовых вод (GW) в конкретном месте складывается из остающихся в верхнем слое почвы осадков (P) после того как часть их испарится (E) или стечет по поверхности или по внутрипочвенным стокам (R):

$$GW = P - R(T) - E(T).$$

Механизмы стока и испарения функционируют, главным образом, в сезоны с положительными температурами (T) с некоторыми задержками после выпадения осадков. Кроме того, скорость испарения зависит также от влажности и силы ветра, а сток существенно зависит от характера грунтов и растительного покрова в районе наблюдения. Осадки, в свою очередь, также имеют иногда значительную региональную сезонность. Снежные осадки не подвержены стоку и испарению в такой мере, как дождевые осадки, особенно в холодные зимы и, поэтому, менее переменны и доминируют в величине нагрузок. На рис. 3 (слева) по архивным данным из <http://rp5.ru/> приведены сглаженная скорость осадконакопления и величина снежного покрова для региона станций SPBU и PULK, демонстрирующие их выраженный сезонный характер.

Механизм осадконакопления приводит к отчетливому сезонному нагрузочному эффекту в ГНСС наблюдениях, доходящему до 20 мм в вертикальных составляющих и до 5 мм в горизонтальных. Нагрузочные поправки за динамику грунтовых вод для всех станций интерполировались нами по данным (<http://astrogeo.org/hydlo/>), вычисленным Л. Петровым по аналогичной методике с использованием глобальной модели грунтовых вод GLDAS NOAH10 на сетке 1×1 градус с разрешением 3 часа [<http://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/>].

В отличие от атмосферных нагрузок в гидрологических нагрузках, которые имеют в механизме своего образования демпфирующие и накопительные элементы, практически отсутствует высокочастотная составляющая, как это видно из рис. 3 (справа).

Гидрологические нагрузки повторяют тренд атмосферных нагрузок для исследуемого региона и анализируемого периода (2006–2010 гг.). Он мало изменяется от станции к станции ввиду их близости и модельного характера данных о грунтовых водах и в среднем для станций оказался равным -1.12 ± 0.08 мм/год, что привело к дополнительному увеличению оценок скоростей V_U , как это видно из таблицы.

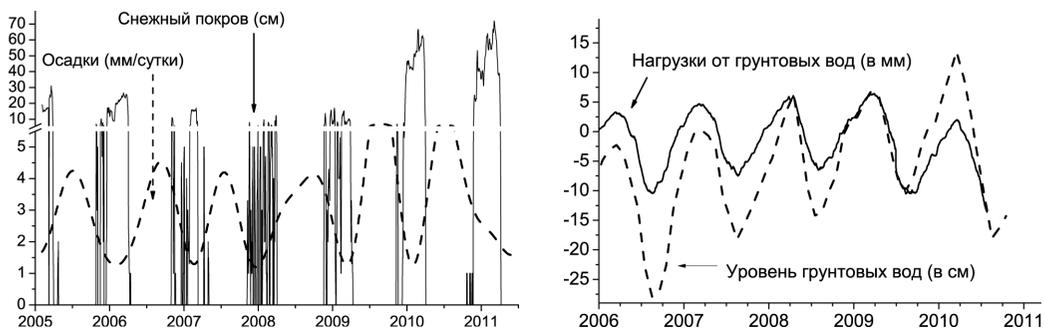


Рис. 3. Слева — средняя скорость осадконакопления (штриховая линия) и величина снежного покрова для региона станций SPBU и PULK по архивным данным из <http://гп5.ru/>. Справа — для местоположения станции SVTL модельные данные (GLDAS) уровня грунтовых вод за вычетом среднего за 1979–2010 гг. (штрих) и соответствующие нагрузки по данным <http://astrogeo.org/hydro/>.

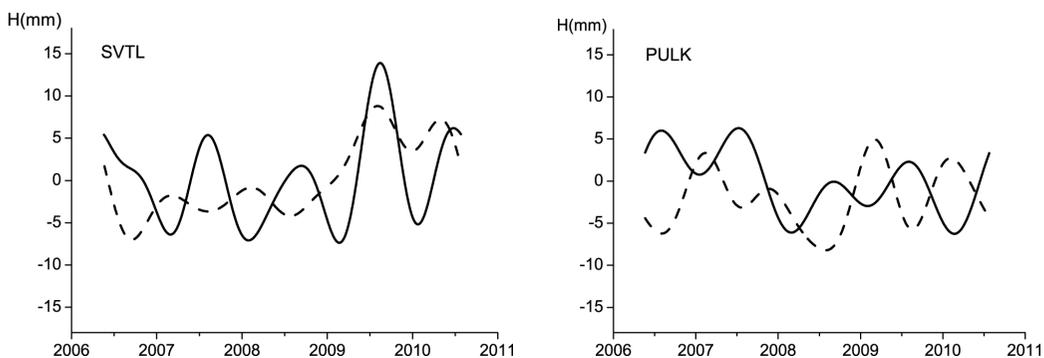


Рис. 4. Сезонный компонент в вертикальной составляющей станций SVTL и PULK до учета нагрузок (сплошная линия) и после учета всех нагрузок (штриховая линия).

После учета гидрологических нагрузок в рядах практически исчезает сезонный компонент. Однако остаточная сезонность, часто даже с обратным знаком, как это видно из рис. 4, все же присутствует в рядах положений из-за неадекватности модельных данных конкретным гидрологическим особенностям места наблюдения.

Геодинамика региона. После учета перечисленных нагрузочных поправок методом наименьших квадратов были оценены скорости станций по широте, долготе и высоте (таблица). Оценки горизонтальных скоростей станций и их ошибки практически не изменяются при учете нагрузочных поправок, что естественно ввиду природы их проявления. Вертикальные скорости значительно меняются при учете этих поправок, а их ошибки, как уже упоминалось, уменьшаются незначительно. Заметим, что остаточная сезонность в рядах не столь существенна для оценки скоростей, так как ряды достаточно продолжительны и, в основном, содержат целое количество лет наблюдения.

Несмотря на немногочисленность перманентных станций, окружающих Финский залив, по взаимным горизонтальным скоростям этих станций можно оценить геодинамику региона. Предварительно горизонтальные скорости станций были редуцированы за движение Евразийской (ЕА) плиты в системе ITRF2005 [11]. На рис. 5. (слева) приведены остаточные скорости, использованные для оценки локальных дефор-

мадий ($\Delta L/L$, в нанострейнах за год) с помощью программного обеспечения GRID-STRAIN [12].

Данное ПО представляет структуру деформационного поля как набор главных компонент напряжений для получения приемлемого уровня точности решения, вычисленных на регулярной сетке. Естественно, что выбор масштаба сетки для получения приемлемого уровня точности решения должен быть соотнесен с характерным расстоянием между станциями региона. Для этих целей в GRID-STRAIN используется масштабная функция $\exp(d(n)/d0)$, где $d(n)$ — расстояние между n -й GPS-станцией и выбранным узлом сетки, а $d0$ — задаваемый пользователем масштабный фактор. Таким образом, только станции внутри радиуса $d0$ от узла сетки дают значимый вклад в оценку напряжения на этом узле сетки. Отсюда вытекает качественный критерий для оценки значимости оцениваемых напряжений. Плоскость сетки разбивается на три равных сектора с центром в каждом узле. Напряжение в узле считается высоко значимым, если хотя бы одна ГНСС-станция присутствует в каждом секторе на расстоянии менее $d0$ от этого узла. Если только два сектора содержат ГНСС-станции, удовлетворяющие данному условию, результат рассматривается как средне значимый. В остальных случаях результат считается не значимым.

На правом рис. 5 жирные стрелки обозначают высоко значимые величины деформаций (сжатия-растяжения), пунктирные — средне значимые в узлах сетки 55×55 км. Видно, что регион испытывает слабое субмеридиональное сжатие в районе Финского залива и Невской губы, что в целом отражает ситуацию на южных окраинах Фенноскандии, испытывающей постгляциологическое поднятие.

Таким образом, опираясь на данные наблюдений за последние годы на имеющихся перманентных ГНСС-станциях в районе Финского залива, можно заключить, что в данном регионе отсутствуют существенные горизонтальные деформации земной коры.

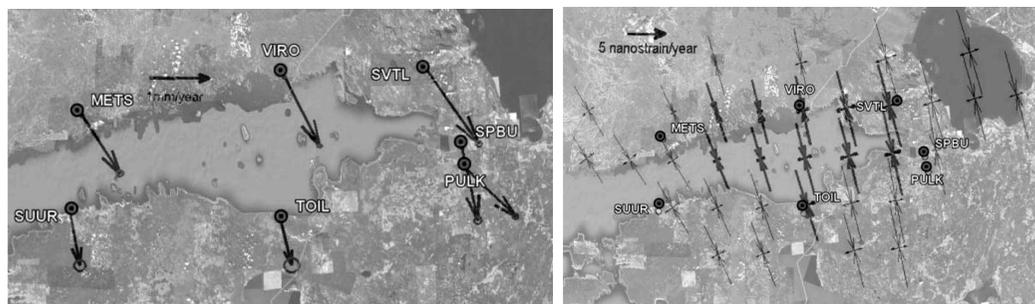


Рис. 5. Слева — поле остаточных горизонтальных скоростей исследуемых станций после учета модельного движения ЕА-плиты в ITRF2005. Справа — поле деформаций ($\Delta L/L$, нанострейны/год), порожденное полем взаимных скоростей станций, вычисленное с помощью пакета GRID-STRAIN.

Выводы. Вычислены положения ГНСС станций в районе Финского залива на временном интервале 2006–2010 гг. с учетом нагрузочных эффектов атмосферного и гидрологического характера. Учет этих нагрузок приводит почти для всех станций, ввиду их региональной близости, к значительному увеличению оценки скорости вертикальной компоненты в период 2006–2010 гг.

Анализ вариаций уровня грунтовых вод и соответствующих им нагрузок показал, что вариации этой нагрузки почти полностью объясняют сезонный компонент в исследуемых рядах наблюдений.

Горизонтальные скорости исследуемых станций использованы для оценки поля горизонтальных деформаций. Показано, что в районе Финского залива и Невской губы присутствует слабое субмеридиональное сжатие, что в целом отражает ситуацию на южных окраинах Фенноскандии, испытывающей постгляциологическое поднятие.

Литература

1. *Lidberg M., Johansson J. M., Scherneck H.-G., Milne G. A.* Recent results base on continuous GPS observations of the GIA process in Fennoscandia from BIFROST // *J. Geodyn.* 2010. Vol. 50. Issue 1. P. 8–18.
2. *Ассиновская Б. А.* Сейсмические события на Ладоге в XX веке. Известия РГО. 2005. Т. 137. Вып. 4. С. 70–76.
3. *Щербакова Н. В., Горшков В. Л.* Динамика взаимных положений ряда GPS-станций северо-западного региона Европы. Геодезия и Картография. 2007. № 11. С. 15–18.
4. *Blewitt G.* Fixed point theorems of GPS carrier phase ambiguity resolution and their application to massive network processing: Ambizap. // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113, B12410, doi:10.1029/2008JB005736.
5. *Scherneck H. G.* A parameterized solid Earth tide model and ocean tide loading effects for global geodetic baseline measurement // *Geoph. J. Int.* 1991. Vol. 106. P. 677–694.
6. *Golyandina N., Nekrutkin V., Zhigljavsky A.* Analysis of Time Series Structure: SSA and Related Techniques. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2001. 305 p.
7. *Tervo M., Virtanen H., Bilker-Koivula M.* Environmental loading effects on GPS time series // *Bull. d'Inf. Mar. Terr.* 2006. Vol. 142. P. 11407–11416.
8. *Farrell W. E.* Deformation of the Earth by surface loads // *Rev. Geophys.* 1972. Vol. 10. P. 751–797.
9. *Dong D., Fang P., Bock Y., Cheng M. K., Miyazaki S.* Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107. NB4. 10.1029/2001JB000573.
10. *Petrov L., Boy J.-P.* Study of the atmospheric pressure loading signal in VLBI observations // *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. NB03405, 10.1029/2003JB002500.
11. *Altamimi Z., Collilieux X., Legrand J., Garayt B., Boucher C.* ITRF2005: A new release of the international terrestrial reference frame based on time series of station positions and earth orientation parameters // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112, B09401. doi:10.1029/2007JB004949
12. *Teza G., Pesci A., Galgaro A.* Grid_strain and grid_strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments // *Computers & Geosciences.* 2008. Vol. 34, N9. P. 1142–1153.

Статья поступила в редакцию 26 октября 2011 г.