

Современные движения земной коры Ладого-Онежского региона по данным спутниковых и наземных измерений

О.Н. Галаганов ¹, В.Л. Горшков ², Т.В. Гусева ¹, Н.К. Розенберг ¹,
В.П. Передерин ¹, Н.В. Щербакова ²

¹Учреждение Российской академии наук институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН),
123995 Москва, Б. Грузинская, 10

E-mails: galagan@ifz.ru, guseva@ifz.ru, rosenna@ifz.ru

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория (ГАО),
196140 Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65, корп. 1

E-mails: vigor@gao.spb.ru

Для оценки особенностей современных движений территории Ладого-Онежского региона рассмотрены данные GPS измерений, проведённые силами сотрудников ИФЗ РАН и ГАО РАН, а также последние результаты государственного нивелирования I и II классов, наблюдений за уровнем воды в озерах и данных спутниковой альтиметрии. Определены скорости горизонтальных и вертикальных движений в Ладого-Онежском регионе. Достоверность результатов подтверждается контрольными определениями скоростей горизонтальных и вертикальных движений как ближайших пунктов европейской сети, так и российских пунктов, практически совпадающих со стандартными скоростями в рамках Евразийской плиты. Обнаруженное поднятие пунктов в Карелии по данным GPS отличается как от результатов нивелирования, так и от значений скоростей депрессии Ладоги по данным уровнемерных наблюдений и особенно спутниковой альтиметрии.

Ключевые слова: Балтийский щит, Ладога, Онега, спутниковые технологии, современные движения, горизонтальные, вертикальные, деформации, скорости

Введение

Развитие эффективных спутниковых методов координатных определений на основе применения глобальных навигационных систем GPS и ГЛОНАСС позволяет расширять их внедрение для решения различных геодинамических задач в комплексе с традиционными геодезическими, гравиметрическими методами и измерениями уровня воды морей и озёр. Актуальной проблемой геодинамики северо-запада Европы является исследование послеледникового поднятия, а также горизонтальных движений и деформаций этого региона. Балтийский щит – одна из древнейших геологических структур. После схода мощного ледника, покрывавшего этот регион в течение десятков тысяч лет, началось изостатическое поднятие региона, которое продолжается и в современную эпоху. Предметом наших исследований является юго-восточная часть Балтийского щита, где локально распространены палеозойские породы. Гетерогенные докембрийские комплексы расчленяются на два крупнейших подразделения: архей и протерозой с возрастной границей между ними в 2600 ± 100 млн. лет.

Изучение вертикальных движений

Комплексное изучение послеледникового поднятия геодезическими и гравиметрическими методами в совокупности с метеорологическими наблюдениями активно ведется в странах Скандинавии и на его части в России по мере современных возможностей. На основе много-

летних геодезических (с учетом российских данных), гравиметрических измерений и наблюдений за уровнем моря в конце прошлого века была создана карта современных вертикальных движений Фенноскандии (Kakkuri, Routanen, 1997). Карта отражала куполовидное поднятие с максимальной скоростью на севере Ботнического залива и постепенным уменьшением скоростей к границам щита. На севере Ладожского озера на карте отражено аномальное изменение в изолиниях скоростей вертикальных движений до 4 мм в год (рис. 1).

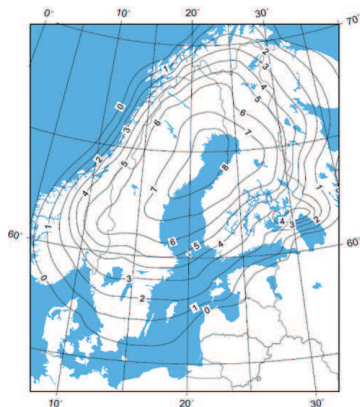


Рис. 1. Историческая карта Фенноскандинавского поднятия, созданная по данным повторного точного нивелирования и футиточным наблюдениям (Kakkuri, Routanen, 1997)

На последней «Карте современных вертикальных движений земной поверхности Северо-запада России и Финляндии», составленной по данным повторного нивелирования I и II классов и наблюдениям за уровнем моря, уточнено распределение изолиний скоростей вертикальных движений: максимальный подъем присущ восточной части Ботнического залива. Его величина составляет до 8 мм/год и постепенно уменьшается на восток к границам Балтийского щита. Изолинии скоростей движений более детальны, чем на предыдущей карте. Выделена очень локальная аномалия до 2,1 мм/год на севере Ладожского озера в районе г. Сортавала. Условная граница между поднятием и опусканием проведена по территории Ленинградской области и Карелии. На рис. 2 представлена часть этой карты, где расположены пункты GPS измерений, движения которых являются объектом наших исследований. По данным повторного нивелирования скорости вертикальных движений в районе расположения пунктов составляют от 2 мм/год до –3 мм/год.

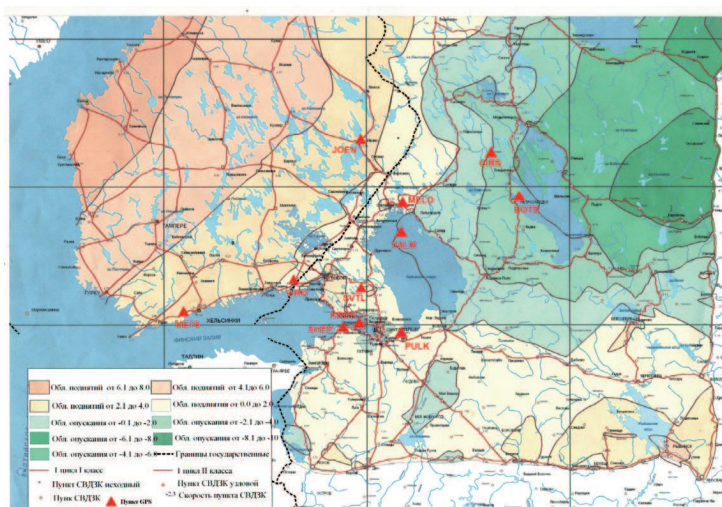


Рис. 2. Карта вертикальных движений земной поверхности по данным многолетних высокоточных и точных нивелировок. Треугольниками обозначены пункты GPS

GPS измерения

Развитие повторных измерений на сети пунктов GPS на территории Карелии с использованием спутниковых технологий начато в 1999 г. Целью проекта было увеличение сети международных европейских станций и отечественных пунктов спутниковых наблюдений, определение количественных характеристик горизонтальных движений и уточнения данных повторных нивелировок в регионе Ладожского и Онежского озер (Прилепин и др., 2002). Измерения GPS на пунктах SHEP (Шепелево), KRON (Кронштадт), PULK1 (Пулкovo) в Ленинградской области ведутся с 1993 г. (Галаганов и др., 2004).

Пункты GPS в Карелии расположены на древних скальных породах острова Валаам (VALM), на прибрежном возвышенном массиве вблизи г. Сортавала (MELO), на побережье Онежского озера в ботаническом саду г. Петрозаводска (BOTS) и в районе расположения древнейших вулканов на территории пос. Гирвас (GIRS). Наблюдения на пунктах проводились в летний период сериями по 4-20 суток с помощью двухчастотных приемников Trimble 4000 и Javad Махор. В результате выполнения ежегодных повторных GPS измерений и обработки по программе GAMIT/GLOBK были определены скорости горизонтальных и вертикальных движений за разные временные интервалы до 2003 г. в системе координат ITRF2000. Международная земная система координат ITRF реализуется сетью закрепленных пунктов наблюдений, которым приписаны конкретные числовые значения координат на определенную эпоху и скорости их изменения. Скорость вертикальных перемещений определяется по изменениям высоты пункта GPS над референц-эллипсоидом между двумя эпохами наблюдений. По данным обработки были рассчитаны горизонтальные и вертикальные перемещения и их скорости для разных временных интервалов. Значения скоростей имеют большие различия в зависимости от временного интервала осреднения между эпохами измерений. По данным совместного уравнивания ежегодных эпох измерений с 1999 г. по 2003 г. было получено, что горизонтальное перемещение пунктов происходило со скоростью от 23 до 27 мм/год на северо-восток, что все пункты испытывали подъем с разной скоростью от 1,5 мм/год до 18,7 мм/год (Галаганов и др., 2004).

Результаты ежегодных полевых измерений сотрудниками ИФЗ РАН 1999-2009 гг. были обработаны сотрудниками ГАО РАН с помощью программ GIPSY/OASIS (JPL). В расчетах использованы данные высокоточного позиционирования пунктов постоянно действующих GPS станций METS, JOEN, VIRO в Финляндии и PULK, SVTL в России, точные орбиты спутников, поправки часов, параметры вращения земли, абсолютная коррекция фазовых центров антенн (<http://sideshow.jpl.nasa.gov/pub>), тропосферная модель GMF, модель океанического слоя FES_2004 (<http://www.oso.chalmers.se/~loading/>); атмосферная модель для геодезических станций (<http://vlbi.gsfc.nasa.gov/aplo>, JPL, Л. Петров). Дополнительная нагрузка на поверхность коры вызванная изменением уровня озера, была определена с использованием данных спутниковой альтиметрии и учитывалась при анализе данных. По данным этой обработки в табл. 1 приведены средние скорости горизонтальных и вертикальных смещений пунктов в ITRF2005, а также для сравнения скорости перемещений по данным предыдущей обработки. Обозначения в таблице: $(V_N \pm \sigma)$ – среднегодовая скорость горизонтального смещения по направлению север-юг и ее ошибка, $(V_E \pm \sigma)$ – среднегодовая скорость горизонтального смещения на восток-запад и ее ошибка, $(V_U \pm \sigma)$ – среднегодовая скорость изменения эллипсоидальной высоты и ее ошибка, V_S – модуль скорости горизонтального смещения по азимуту A (от оси направленной на север по часовой стрелке), V_H

– скорость вертикальных движений места расположения пункта по карте современных вертикальных движений, представленной на рис. 2.

Таблица 1. Сводка средних скоростей горизонтальных и вертикальных смещений и их ошибки

Пункт GPS	Годы измерений	$V_N \pm \sigma$ мм/год	$V_E \pm \sigma$ мм/год	$V_U \pm \sigma$ мм/год	V_S мм/год	A° град	V_H мм/год
VALM	1999-2009	$10,89 \pm 0,14$	$22,47 \pm 0,31$	$3,3 \pm 0,4$	24,97	64	0÷1
	1999-2003*	$9,7 \pm 0,1$	$25,0 \pm 0,2$	$18,7 \pm 0,7$	26,8	69	
MELO	1999-2009	$10,26 \pm 0,15$	$21,91 \pm 0,26$	$4,2 \pm 0,4$	24,19	65	2,1
	2001-2003*	$8,6 \pm 0,1$	$23,8 \pm 0,1$	$15,7 \pm 0,6$	25,3	70	
BOTS	2001-2009	$10,72 \pm 0,16$	$20,31 \pm 0,17$	$1,4 \pm 0,4$	22,97	62	-2,9
	2001-2003*	$7,3 \pm 0,3$	$22,5 \pm 0,4$	$1,5 \pm 1,4$	23,7	71	
GIRS	2001-2009	$10,00 \pm 0,20$	$22,28 \pm 0,31$	$5,6 \pm 0,8$	24,42	66	-2,0
	2001-2003*	$7,3 \pm 0,3$	$22,0 \pm 0,5$	$15,5 \pm 1,6$	23,6	72	
PULK	2002-2009	$11,86 \pm 0,05$	$21,27 \pm 0,06$	$1,6 \pm 0,1$	24,35	61	0÷1
SVTL	2005-2009	$11,46 \pm 0,11$	$21,38 \pm 0,12$	$5,9 \pm 0,3$	24,26	62	2
JOEN	2002-2009	$11,84 \pm 0,05$	$20,25 \pm 0,05$	$5,1 \pm 0,1$	23,46	60	3.1
METS	2002-2009	$12,74 \pm 0,05$	$19,60 \pm 0,06$	$5,3 \pm 0,1$	23,38	57	2,6
VIRO	1999-2008	$11,90 \pm 0,14$	$19,95 \pm 0,16$	$3,9 \pm 0,4$	23,23	59	1,7

*- данные обработаны по программе GAMIT/GLOBK

Горизонтальные перемещения российских пунктов, согласно данным последней обработки, происходили со средней скоростью около 24 мм/год в направлении 61° – 66° на северо-восток, и их отличие от одноименных скоростей близких станций EPN в Финляндии составляет около 2 мм/год. Вектора скоростей горизонтальных смещений в ITRF показаны на рис. 3. Вектора скоростей для пунктов KRON (Кронштадт), SHEP (Шепелево) приведены по результатам обработки программой GAMIT/GLOBK в ITRF за 1999-2003 гг. Так как значения модулей векторов скоростей горизонтальных смещений пунктов в ITRF мало отличаются между собой, сделан пересчет их значений в локальной системе относительно станции JOEN, скорость смещения которой принята за нулевую. Распределение векторов скоростей горизонтальных перемещений относительно пункта JOEN представлено на рис. 4. В исследуемом регионе относительные горизонтальные движение происходили со скоростью 1,1-2,7 мм/год при ориентировке их на юго-восток и восток. Наблюдалось растяжение относительно пунктов в Финляндии с преобладанием сжатия внутри локального построения в Карелии при скорости деформаций до 2×10^{-8} в год.

Как показывает анализ изменений эллипсоидальных высот пунктов по данным повторных GPS наблюдений, вертикальные смещения пунктов не постоянны: на фоне линейного тренда проявляются сложные вариации изменений высоты, их среднесуточные значения в цикле могут отличаться до 4 см, средние значения скоростей разнятся в зависимости от временного интервала между эпохами повторных измерений и алгоритма обработки. Временной ход изменения среднесуточных значений эллипсоидальной высоты относительно начальной эпохи измерений на четырех пунктах дискретных измерений в Карелии приведен на рис. 5. Всем этим пунктам были свойственны положительные скорости изменения эллипсоидальной высоты за период исследований: наибольшая для пункта GIRS (5,6 мм/год), наименьшая для пункта BOTS (1,4 мм/год) на побережье Онеги, а в регионе Северной Ладogi средняя скорость поднятия пунктов составляет 3-4 мм/год.

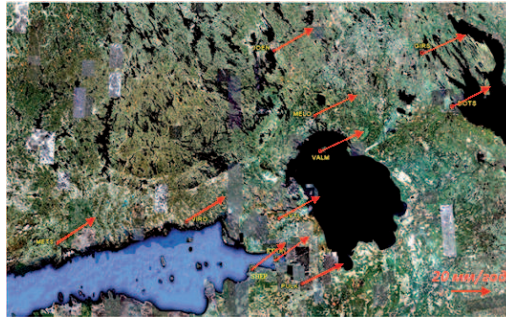


Рис. 3. Вектора скоростей горизонтальных движений пунктов GPS в ITRF. Масштаб вектора в правом нижнем углу

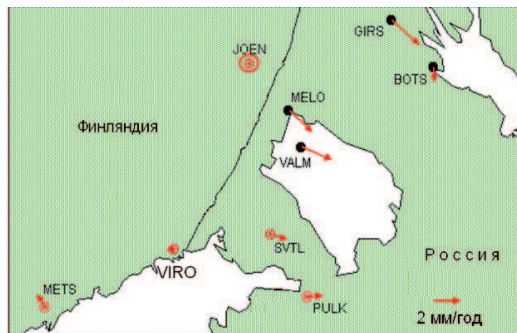


Рис. 4. Вектора скоростей горизонтальных движений пунктов GPS относительно постоянно действующей станции JOEN за период 1999-2009 гг.

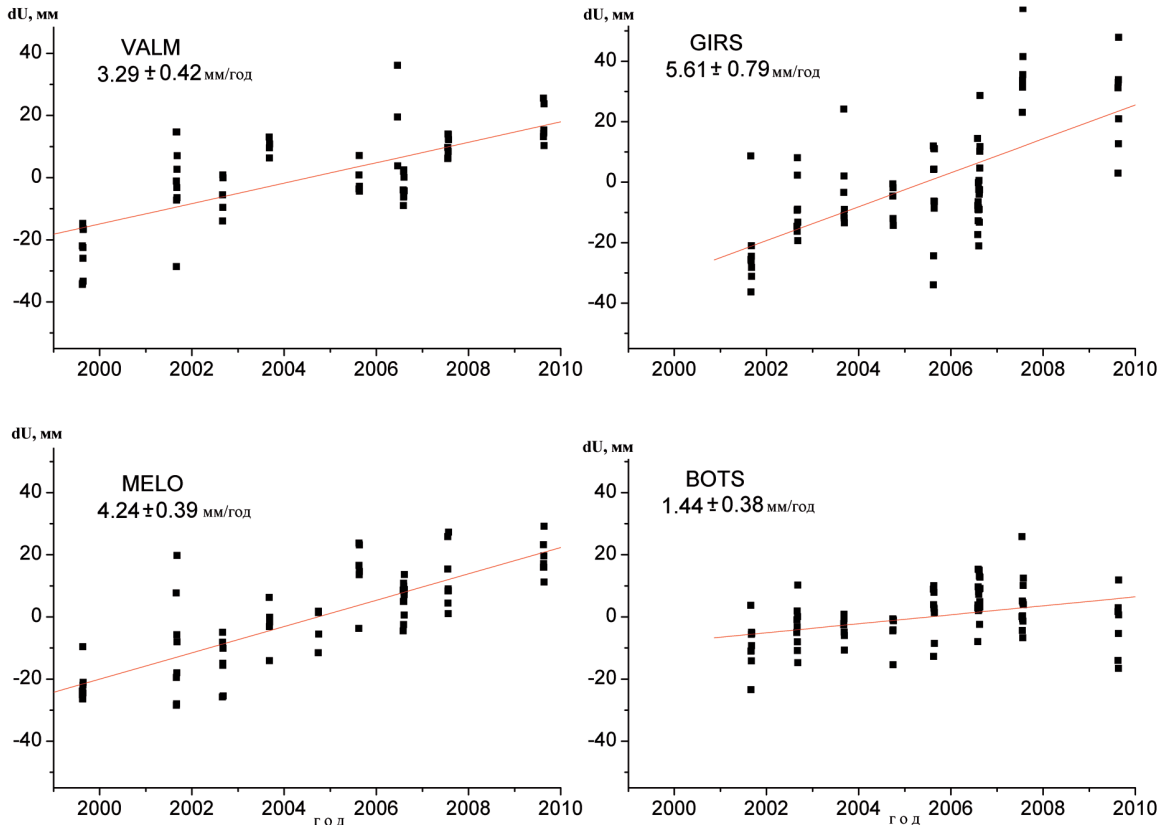


Рис. 5. Графики изменений эллипсоидальных высот по данным среднесуточных значений GPS измерений за период 1999-2009 гг. В верхнем левом углу скорости по результатам линейного аппроксимирования

Сравнение скоростей вертикальных движений, полученных разными методами, показывает, что все GPS скорости имеют положительные значения и их отличие от скоростей по данным геометрического нивелирования составляют от 2 мм/год до 8 мм/год, в среднем около 2,7 мм/год (см. табл. 1). Частично этот эффект можно объяснить тем, что нет непосредственного соответствия между закрепленными пунктами наблюдений разными методами. Подобное желание оценить стабильность во времени координатных систем по вертикальной компоненте, для чего проведено сравнение скорости подъема Фенноскандии различными геодезическими методами (классическими и GPS), было показано в работе (Прилепин и др., 2002). Однако замеченное расхождение оказалось незначительным и составляло в среднем 0,6 мм/год.

Если полученное многолетнее вертикальное перемещение считать поднятием острова, то оно должно отразиться в соответствующем опускании уровня воды в Ладоге. Футшточные измерения уровня воды в Ладоге долгое время велись Валаамскими монахами. Эти измерения были собраны и проанализированы в работе (Богданов и др., 2002). Согласно этим данным, скорость депрессии Ладоги по среднегодовым данным составляет $-4,24$ мм/год (по среднемесячным $-4,0$ мм/год) за период 1859-2001 гг. На эту вековую тенденцию понижения уровня воды в Ладоге накладываются квазипериодические вариации в 25-32 года и 5-7 лет. Средняя скорость понижения уровня воды в озере, выявленное по полторавековым футшточным данным, достаточно близко к скорости поднятия пункта VALM ($3,3$ мм/год), вычисленной по результатам аппроксимации линейным трендом данных GPS измерений 1999-2009 гг. Тенденция к уменьшению уровня Ладоги со средней скоростью до $-10,1$ мм/год и Онеги со средней скоростью $-2,5$ мм/год за период 1993-2009 гг., определяемой по данным спутниковой альтиметрии (http://www,pecad,fas,usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/), менее сопоставимы с нашими результатами GPS измерений.

Таким образом, определены скорости горизонтальных и вертикальных движений в Ладого-Онежском регионе. Достоверность результатов подтверждается контрольными определениями скоростей горизонтальных и вертикальных движений как ближайших пунктов европейской сети, так и российских пунктов, практически совпадающих со стандартными скоростями в рамках Евразийской плиты. Обнаруженное поднятие пунктов в Карелии по данным GPS отличается как от результатов нивелирования, так и от значений скоростей депрессии Ладоги по данным уровнемерных наблюдений и особенно спутниковой альтиметрии. Исследование этого парадокса должно быть продолжено.

Литература

1. *Kakkuri J. Poutanen M.* Geodetic determination of the surface topography of the Baltic Sea // *Marine Geodesy*. 1997. Vol. 20. No 4. P. 1-10.
2. *Прилепин М.Т., Мишин А.В., Кабан М.К., Баранова С.М.* GPS изучение геодинамики Балтийского щита // *Физика Земли*. 2002. № 9. С. 49-58.
3. *Галаганов О.Н., Гусева Т.В., Мишин А.В., Передерин В.П.* Исследование деформационных процессов земной коры с использованием спутниковых технологий // *Исследования в области геофизики. К 75-летию ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта*. М.:ОИФЗ РАН. 2004. С. 336-343.
4. *Галаганов О., Горшков В., Гусева Т.* и др. Парадокс отличий в вертикальных движениях по данным определений разными методами // *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. Випуск 71. Львів, 2009. ISSN 0130-1039. УДК 528. С. 241-248.
5. *Богданов В.И., Кравченкова Т.Г., Малова Т.И., Маринич М.А.* Изменения уровня Ладожского озера по наблюдениям 1859-2001 гг. на Валааме // *Докл. РАН*. 2002. Т. 386. № 5. С. 672-675.

Recent crustal motion of Ladoga-Onega Region revealed from satellite and ground measurements

O.N. Galaganov¹, V.L. Gorshkov², T.V. Guseva¹, N.K. Rosenberg¹,
V.P. Perederin¹, N.V. Shcherbakova²

¹ *Establishment of Russian Academy of Sciences Institute of Physics of the Earth*

Named by O.Y. Schmidt, RAS (IPE RAS)

123995 Moscow, B. Gruzinskaya, 10

E-mail: galagan@ifz.ru, guseva@ifz.ru, rosenna@ifz.ru

² *The Main (Pulkovo) Astronomical Observatory (GAO),*

196,140 of St.-Petersburg, Pulkovskoye Shosse 65, Bldg. 1

E-mail: vigor@gao.spb.ru

To assess the characteristics of recent movements of territory of Ladoga-Onega region here we considered GPS measurements carried out by the staff of IPE RAS and GAO RAS, as well as recent results of I and II classes leveling, water level observations in lakes and satellite altimetry data. The velocities of horizontal and vertical movements in Ladoga-Onega region are revealed. Reliability of the results is confirmed by the control velocities of horizontal and vertical motion as the nearest points of a European network, and the Russian network, that coincide with the standard rates in the frames of the Eurasian plate. The observed elevation of points in Karelia by the GPS data differs from the results of leveling and the values of the velocities of depression, according to the water level observations of Ladoga lake and, especially, satellite altimetry.

Keywords: Baltic Shield, Ladoga, Onega, satellite technology, recent movements, horizontal velocity, vertical velocity, strain, velocity.