

О. Галаганов, В. Горшков, Т. Гусева, Ю. Кузнецов,
Н. Розенберг, В. Передерин, Н. Щербакова
ГАО РАН, ИФЗ РАН, ЦНИИГАиК

ПАРАДОКС ОТЛИЧИЙ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЯХ ПО ДАНЫМ ОПРЕДЕЛЕНИЙ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ

© Галаганов О., Горшков В., Гусева Т., Кузнецов Ю.,
Розенберг Н., Передерин В., Щербакова Н., 2009 г.

Для оценки особенностей вертикальных движений территории Ладожско-Онежского региона рассмотрены данные GPS измерений в течение 1999-2007 годов, проведенные силами сотрудников ИФЗ РАН и ГАО РАН, а также последние результаты нивелирования I и II классов, равномерных наблюдений и данных спутниковой альтиметрии. В районе северной Ладоги обнаружено аномальное поднятие до 6 мм в год, хотя по данным нивелирования скорости вертикальных движений не превышают ± 2 мм в год. По данным GPS измерений на ближайших пунктах IGS сети в Финляндии и на пунктах в Карелии (Онежский регион) скорость поднятия составляет 2-6 мм в год, что характерно для скорости послеледникового поднятия района. Аномальному поднятию соответствует близкое по абсолютной величине изменение среднего уровня воды Ладоги по данным спутниковой альтиметрии в соответствующий период.

For estimating features of vertical movements on the territory of Ladoga – Onega region we used data of 1999-2007 GPS measurements, carried out by employees of Institute of physics of the Earth and Pulkovo Astronomic Observatory of Russian Academy of Sciences, and also the last results of I and II class geometric leveling, data of water-level measurement and satellite altimetry. In the Northern Ladoga area the abnormal uplift up to 6 mm a year is revealed, although, according to the data of geometrical leveling, rate of vertical movements do not exceed ± 2 mm a year. GPS measurements on the nearest IGS points in Finland and Kareliya (Onega region) show uplift rate of 2-6 mm a year that is agreed to postglacial uplift rate. Satellite altimetry data for the same period also show changes of average water level in Ladoga Lake close to an abnormal uplift.

Одной из актуальных проблем геодинамики северо-запада Европы является исследование послеледниковое поднятия этого региона. Балтийский щит — одна из древнейших геологических структур — продолжает свой «подъем» после схода мощного ледника, покрывавшего этот регион в течение десятков тысяч лет. На фоне гляциоизостатического подъема проявляются локальные блоковые тектонические движения (Никонов, 1973). Это зона валлообразных поднятий и крупных озерных впадин. Определение скорости изостатического поднятия позволяет, в частности, оценить вязкость верхней мантии Земли. На последней «Карте современных вертикальных движений земной поверхности Северо-запада России и Финляндии», составленной по данным повторного нивелирования I и II классов и равномерных наблюдений, уточнено распределение изолиний скоростей вертикальных движений: максимальный подъем до 8 мм/год присущ восточной части Ботнического залива, который постепенно уменьшается на восток к границам Балтийского щита. Условная граница между поднятием и опусканием проходит по Ленинградской области и Карелии. На рис.1 представлена часть этой карты, где расположены пункты GPS измерений, движения на которых будут исследованы. Скорости вертикальных движений в районе расположения пунктов составляют от 2 мм/год до –3 мм/год.

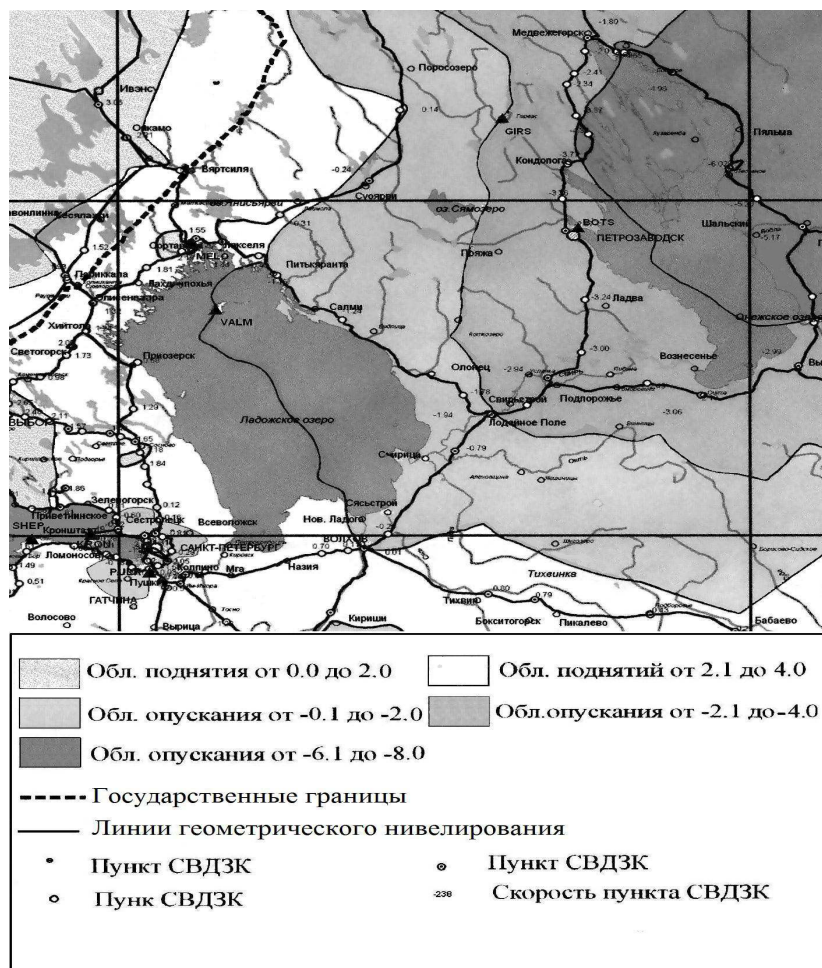


Рис.1. Карта вертикальных движений земной поверхности по данным многолетних высокоточных и точных нивелировок. Красными треугольниками обозначены пункты GPS

Исследования современных вертикальных движений земной поверхности Карельского перешейка, выполненные С.В. Энман (2006) по данным повторного нивелирования до 1993 г. и равномерных наблюдений, показывают, что данной территории в основном свойственны поднятия со скоростями до 4 мм/год, а скорости опускания до -2 мм/год. На карте СВДЗП по данным этой работы скорости поднятия составляют следующие значения: для острова Валаам — 2 мм/год, для Ладожского побережья возле г. Сортавала — 4 мм/год, для Пулково — до 1 мм/год.

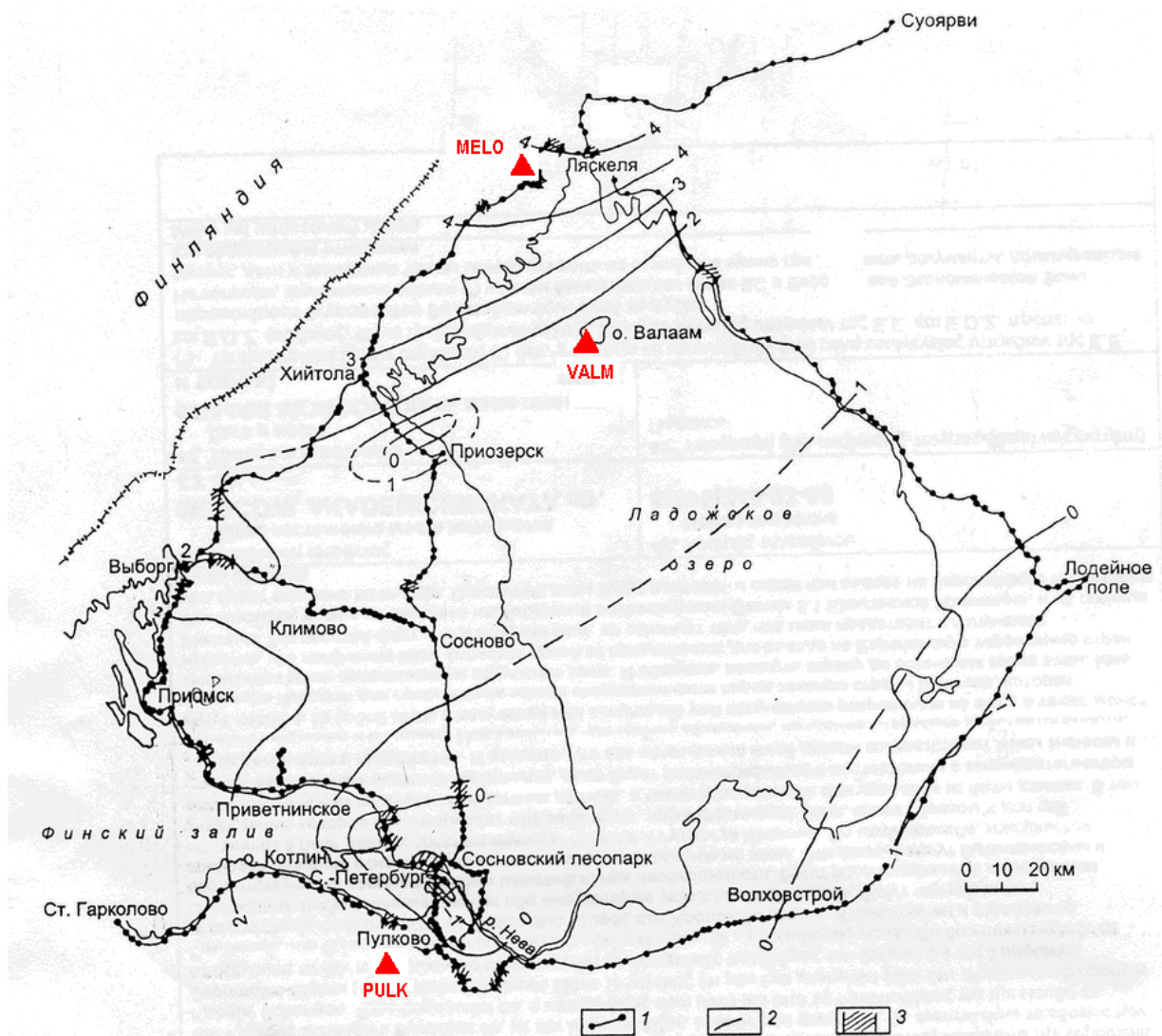


Рис. 2. Схема нивелирной сети и карта современных вертикальных движений земной поверхности Карельского перешейка: 1 — нивелирные линии и репера, 2 — изолинии скоростей и мм/год, 3 — зоны контрастных движений (Энман, 2006). Красными треугольниками показаны GPS пункты

Развитие повторных измерений на сети пунктов GPS на территории Карелии было начато в 1999 г. и преследовало цель расширения сети международных европейских станций и отечественных пунктов спутниковых наблюдений (начатых в Ленинградской области в 1993 г.) и уточнения данных повторных нивелировок в регионе Ладожского и Онежского озер (Прилепин, 2002; Галаганов и др., 2004, 2005). Пункты наблюдений 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 палеовулканов на территории пос. Гирвас (GIRS). Конструкция пунктов, кроме пункта GIRS, предусматривает принудительное центрирование антенны на постаменте высотой около 1,6 м. Наблюдения проводились в летний период сериями по 4-20 суток с помощью двухчастотных приемников Trimble (4000SSi и 4000SSE) с антеннами TR GEOD L1/L2 GP. В 2007 году на пунктах MELO, GIRS, VALM использовались приемники TPS Махор с антеннами MarAnt+.

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. По данным этой обработки было рассчитаны горизонтальные и вертикальные перемещения для разных временных интервалов, скорости 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, см. табл., (Галаганов и др., 2004, 2005).

В данной работе продолжено исследование кинематики движений Ладожско-Онежского региона по данным дискретных GPS наблюдений на вышеупомянутых пунктах, проведенных силами сотрудников ИФЗ РАН в течение летних полевых сезонов 1999-2007 гг., а также на пункте постоянной регистрации на территории Пулковской Астрономической обсерватории (PULK) 2002-2007 гг., ведущихся ГАО РАН. Наблюдения были обработаны пакетом GIPSY-OASIS II с использованием стратегии точного определения положения станций (PPP), с учетом поправок за неоднозначность пути, атмосферные и гидрологические нагрузки.

Внутренняя точность полевых наблюдений изменялась в пределах от ± 4.9 до ± 6.1 мм для вертикальной компоненты и от ± 1.2 до ± 1.6 мм для горизонтальных компонент. Наихудшая точность характеризует данные на пункте GIRS — единственной, где для наблюдений использовался штатив. Несмотря на достаточно хорошую оценку вертикальной компоненты в течение суток (по внутренней сходимости), среднесуточные значения могут отличаться на несколько сантиметров.

Для разрешения фазовых неоднозначностей при обработке этих наблюдений использовались данные перманентных станций IGS и EPN сетей: METS, JOEN, SVTL (с 2005 г.), а также данные станции в Пулково, с 2002 г. функционирующей в перманентном режиме и включенной в Европейскую сеть EPN. В этой связи в работе приведен анализ наблюдений PULK за весь период наблюдений.

Стратегия PPP (точное определение положения станции) использовалась при обработке наблюдений в ГАО РАН с помощью пакета GIPSY-OASIS II (4.03 версия). Необходимые для обработки точные орбиты спутников, поправки часов и параметры вращения Земли были взяты из <ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/>. Океанические приливные нагрузки вычислялись с помощью соответствующей службы (<http://www.oso.chalmers.se/~loading/>).

Поправки за атмосферные нагрузки для полевых станций интерполировались по данным VLBI службы <http://vlbi.gsfc.nasa.gov/aplo> (Petrov, Boy, 2004) и составляли от -7 до $+12$ мм. Для полевых станций были учтены также поправки за нагрузки, вызываемые значительными вариациями уровня воды в Ладожском и Онежском озёрах. Эти поправки, вычисленные и любезно предоставленные нам (Boy, 2008), достигали для Ладожского озера 7,8 мм при изменении уровня на 1 м, и 2,4 мм/м — для Онежского озера. Полученные таким образом координаты отнесены к эллипсоиду WGS84, которые затем были переведены в систему ITRF2005. Необходимые для обработки точные орбиты спутников, поправки часов и параметры вращения Земли были взяты из <ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/>. Океанические приливные нагрузки также вычислялись с помощью соответствующей службы (<http://www.oso.chalmers.se/~loading/>).

Так как данных наблюдений на PULK, использованных в данном исследовании, в службе EPN пока нет, то приведём их краткий статистический анализ. На рис. 3 показаны все компоненты станции PULK за вычетом линейных трендов и их низкочастотные составляющие (частоты более 2 циклов в год обрезаны). Увеличение ошибок вертикальной компоненты в 2006 году объясняется проводившимся в летне-осенний период ремонтом крыши, где установлена антенна. Вертикальной компоненте свойственны сезонные вариации с амплитудой 2–3 мм, особенно после замены антенны в 2004 году. Горизонтальные компоненты имеют небольшие нерегулярные вариации.

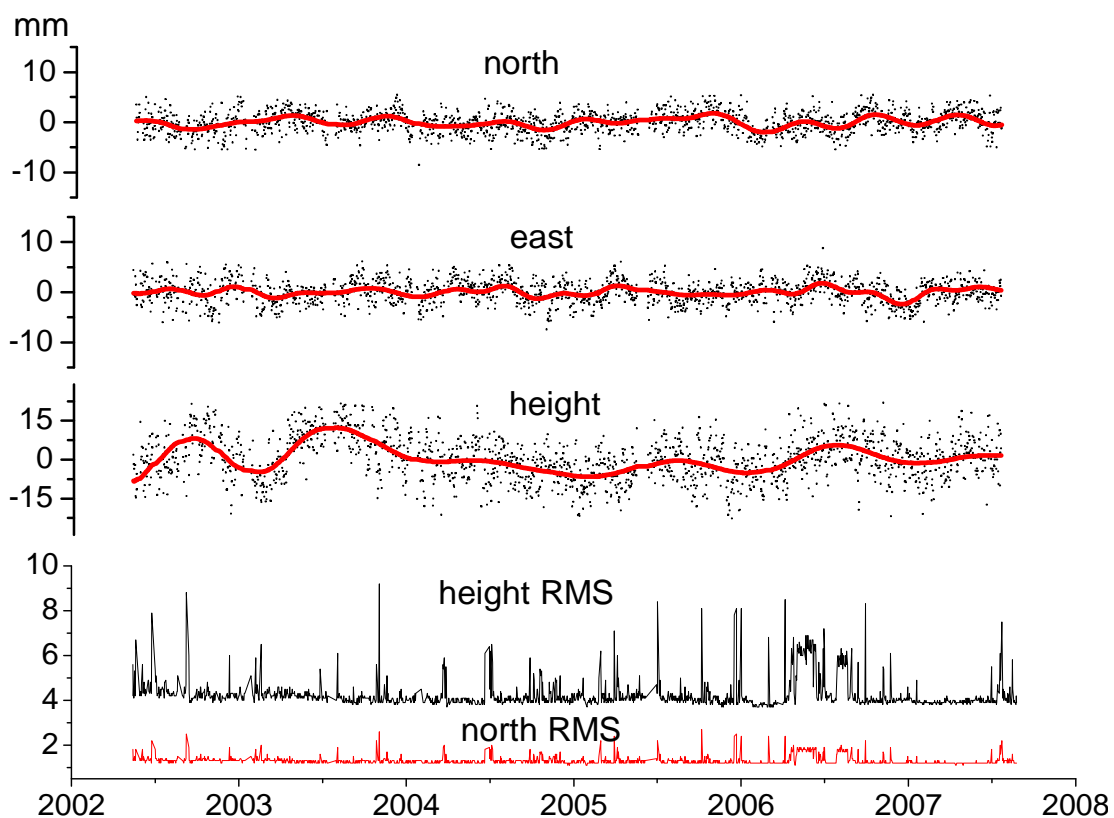


Рис. 3. Временной ход значений среднесуточных компонент станции PULK и их ошибки

Статистическое сравнение данных российских пунктов с данными других ближайших EPN станций, расположенных в Финляндии, приведено в таблице, где $(V_N \pm \sigma)$ — среднегодовая скорость горизонтального смещения на север и ее ошибка, $(V_E \pm \sigma)$ — среднегодовая скорость горизонтального смещения на восток и ее ошибка, $(V_U \pm \sigma)$ — среднегодовая скорость изменения вертикального положения и его ошибка, V_S — модуль скорости горизонтального смещения по азимуту A . В таблице также приведены данные скоростей изменений компонент движений определенные с помощью разных программ за разные временные интервалы.

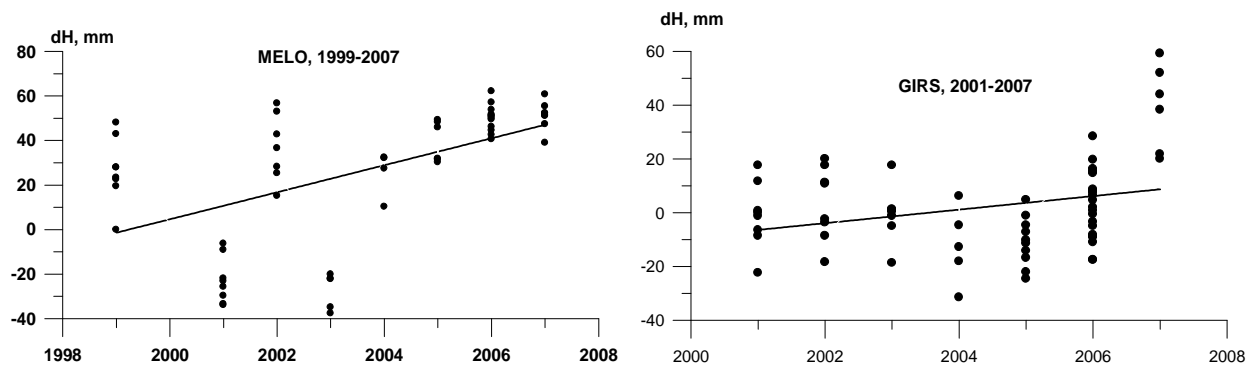
Горизонтальные перемещения российских пунктов по данным последней обработки происходили с достаточно одинаковой средней скоростью около 24 мм/год по направлению на северо-восток 60° – 63° , и их отличие от одноименных скоростей станций EPN составляет менее миллиметра. Значения скоростей изменения вертикального положения пунктов не постоянны, разнятся в зависимости от временного интервала между эпохами повторных измерений и алгоритма обработки.

Таблица 1. Скорости компонент исследованных станций

Пункты	Годы	Прогр.	$V_N \pm \sigma$ мм/год	$V_E \pm \sigma$ мм/год	$V_U \pm \sigma$ мм/год	V_S мм/год	A град
VALM	1999-2003	GLOBK	$9,7 \pm 0,1$	$25,0 \pm 0,2$	$18,7 \pm 0,7$	26,8	69
	1999-2007	GIPSY	$11,4 \pm 0,2$	$21,2 \pm 0,2$	5,6	24,0	62
	1999-2001	GIPSY			$19,4 \pm 3,2$		
	2002-2007	GIPSY			$22,2 \pm 1,7$		
	2003-2007	GIPSY			$15,7 \pm 2,2$		
	2005-2007	GIPSY			$14,9 \pm 2,2$		
MELO	1999-2003	GLOBK	$8,6 \pm 0,1$	$23,8 \pm 0,1$	$15,7 \pm 0,6$	25,3	70
	1999-2007	GIPSY	$11,8 \pm 0,1$	$20,8 \pm 0,2$	6,1	23,9	60

	2003-2007 2004-2007 2001-2007	GIPSY GIPSY GIPSY			25,0±2,2 13,2±2,0 14,4±1,0		
BOTS	2001-2003 2001-2007 2003-2007	GLOBK GIPSY GIPSY	7,2±0,3 11,3±0,1	22,5±0,4 21,2±0,2	1,5±1,4 -0,4 8,7±0,7	23,6 24,1	72 62
GIRS	2001-2003 2001-2007	GLOBK GIPSY	7,2±0,3 10,8±0,2	22,0±0,5 21,4±0,3	15,5±1,6 2,5	23,1 23,9	72 63
PULK	2002-2007	GIPSY	11,35±0,04	21,66±0,06	1,00 ± 0,14	24,45	62
JOEN	1999-2007 EPN	GIPSY	11,88± 0,02 11,68±0,00	11,88±0,02 11,68±0,00	5,12±0,06 5,22±0,14	23,55	60
METS	1999-2007 EPN	GIPSY	12,61±0,02 12,62± 0,00	19,68±0,02 19,61±0,00	5,27±0,05 5,17±0,10	23,37	57

Временной ход изменения вертикальной компоненты относительно начальной эпохи измерений на пунктах дискретных измерений приведен на рис. 4. Достоверность результатов подтверждается полученными в этом же решении контрольными определениями скоростей горизонтальных и вертикальных движений как пунктов EPN, так и российских пунктов, практически совпадающими со стандартными скоростями для них в рамках евроазиатской плиты. Кроме того, оценки скоростей для всех перманентных станций из нашего решения (по ежедневным данным) совпали с оценками, приведенными в решении EPN. На фоне линейного тренда зафиксированы сложные вариации движений. Значения скоростей осредненные за весь период наблюдений ближе к значениям скоростей по данным нивелирования. Наибольшая активность в изменении вертикальных перемещений, достигающая в отдельные временные интервалы больше 2 см в год, свойственна пунктам в регионе Северной Ладogi. Средняя скорость поднятия пунктов VALM (5,6 мм/год) и MELO (6,1 мм/год) и амплитуда вариаций оказались больше по сравнению с пунктами на Онежском озере (BOTS) и в Гирвасе (GIRS). Если полученное многолетнее вертикальное перемещение считать поднятием острова, то оно должно отразиться в соответствующем опускании уровня воды в Ладoge. Измерения уровня воды в Ладoge были начаты в 1859 г. Валаамскими монахами. Эти измерения были собраны и проанализированы в работе (Богданов и др., 2002).



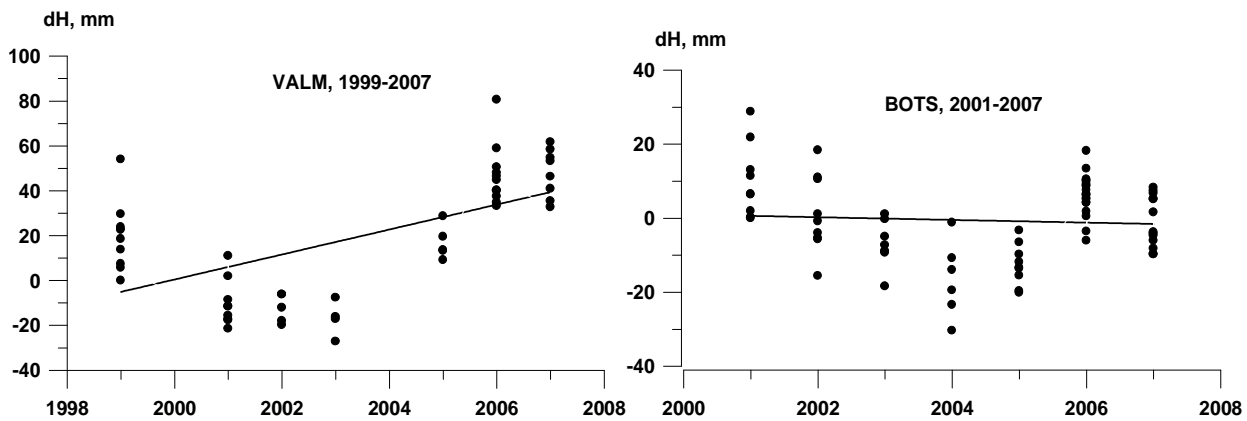


Рис.4. Временной ход среднесуточных значений изменения вертикального положения пунктов относительно начальной эпохи

Согласно этим данным, средняя скорость депрессии Ладоги с начала регистрации составляет $-4,1 \pm 0,8$ мм/год, на эту вековую тенденцию уменьшения уровня воды в Ладоге накладываются сильные периодические вариации в 25-32 года и 5-7 лет с амплитудой до 1,5 м, см. рис. 5. По абсолютной величине средняя скорость уменьшения уровня воды в озере меньше скоростей 6 мм/год поднятия северного Ладожья, вычисленным по результатам аппроксимации линейным трендом данных GPS измерений 1999-2007 гг. Тенденция к уменьшению уровня Ладоги со скоростью до $-11,7 \pm 4,1$ мм/год (1993-2008 гг.), определяемую по данным спутниковой альтиметрии (http://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/) возможно является парадоксальной и не отражает действительность.

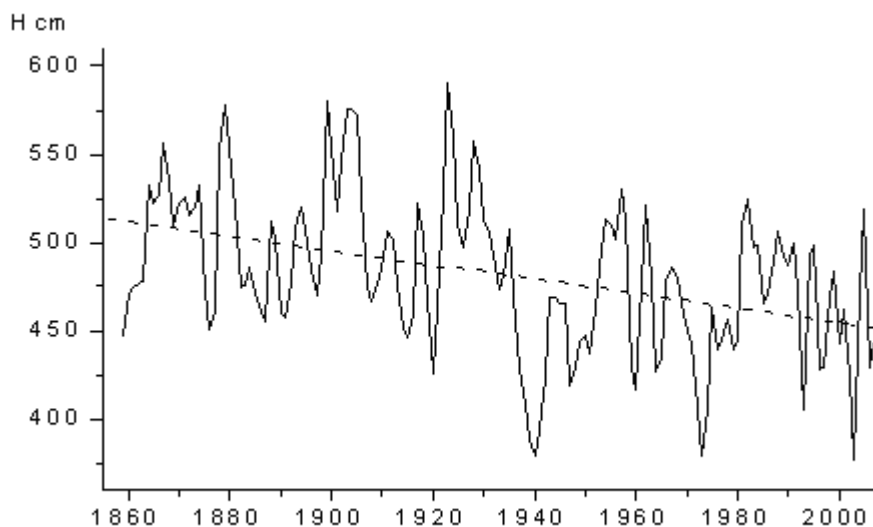


Рис. 5. Временное изменение уровня воды в Ладоге. Прямыми линиями показаны вековой (пунктир) и средний с 1990 года (сплошная линия) линейные тренды уровня воды в Ладоге.

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 совпадающими со стандартными скоростями в рамках евроазиатской плиты. Обнаруженное поднятие пунктов МЕЛО и VALM по данным GPS отличается, как от результатов нивелирования, так и от значений скоростей депрессии Ладоги по данным

уронемерных наблюдений и особенно спутниковой альтиметрии. Исследование этого парадокса должно быть продолжено.

1. Богданов В.И., Кравченкова Т.Г., Малова Т.И., Маринич М.А., 2002. Изменения уровня Ладожского озера по наблюдениям 1859- 2001 гг, на Валааме // Докл. РАН. Т.386, № 5. С. 672-675.
2. Галаганов О.Н., Гусева Т.В., Мишин А.В., Передерин В.П., 2004. Исследование деформационных процессов земной коры с использованием спутниковых технологий// Исследования в области геофизики. К 75-летию ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта. М.:ОИФЗ РАН. С. 336-343.
3. Галаганов О.Н., Гусева Т.В., Передерин В.П., 2005. Результаты изучения современных движений земной коры на территории Балтийско-Ладожского региона России// Геодезія, картографія і аэрофотознімання. № 66. Львів: «Львівська політехніка». с. 121-125.
4. Никонов А.А. Современные движения земной коры Фенноскандии // Совр. движ. земной коры № 5. Тарту, 1973. С. 66-71.
5. Прилепин М.Т., Мишин А.В., Кабан М.К., Баранова С.М., 2002. GPS изучение геодинамики Балтийского щита // Физика Земли, № 9. С. 49-58.
6. Энман С.В. Современные вертикальные движения земной поверхности на Карельском перешейке и близлежащих территориях// Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отделение геол., 2006. Т. 81. Вып. 6. С. 23- 32.
7. Boy J.-P., 2008. личное сообщение.
8. Petrov L., Boy J.-P., 2004. Study of the atmospheric pressure loading signal in VLBI observations// J. Geophys. Res., 10, 1029/2003. JB002500. Vol. 109. No. B03405.