

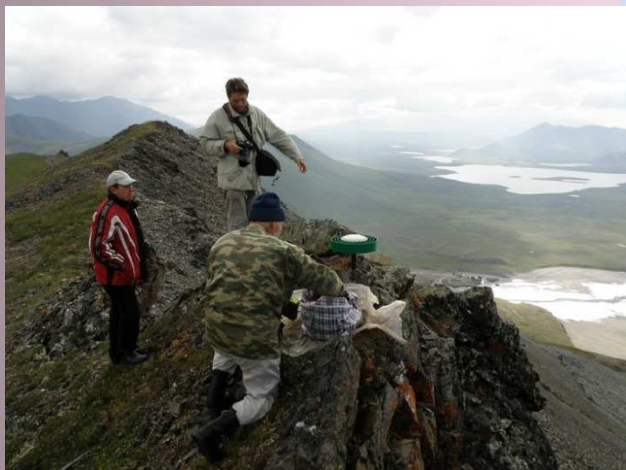
Современные движения земной коры Ладожско-Онежского региона по данным геодезических измерений

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

Учреждение Российской академии наук институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), г. Москва,
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН (ГАО)



В Институте физики Земли РАН традиционно ведутся инструментальные исследования современных движений и деформаций земной коры наземными и спутниковыми геодезическими методами. Внедрение спутниковых технологий при изучение геодинамических процессов начато с 1991 г. Когда совместно с американскими специалистами были начаты работы на Кавказе по Среднеземноморскому проекту. В последующим мы самостоятельно продолжали развитие системы измерений GPS на Северном Кавказе. При обработке и создание моделей движений Среднеземноморского региона используются и наши материалы. Кроме того нами ведутся повторные GPS измерения на Русской платформе, в Карелии, Прибалтике, в Сибири.



- Черский хребет



Магаданская область.
Установка репера



Дагестан, Ччиркейский
гидроузел

О работе в Прибалтийско-Ладожско-Онежском регионе

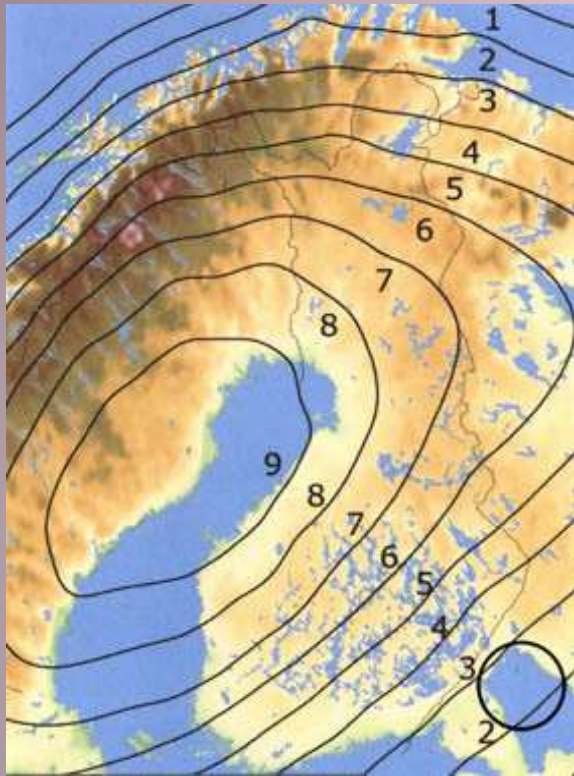


Рис.1. Карта вертикальных движений региона Фенноскандии комплексных геодезических и геофизических исследований

- Актуальной проблемой геодинамики северо-запада Европы является исследование послеледникового поднятия 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. Комплексное изучение послеледникового поднятия геодезическими и гравиметрическими методами в совокупности с метеорологическими наблюдениями активно ведется в странах Скандинавии, и по мере современных возможностей на его части в России. На основе многолетних геодезических, гравиметрических измерений и наблюдений за уровнем моря в конце прошлого века создана карта современных вертикальных движений Фенноскандии. Максимальный подъем зафиксирован на севере Ботнического залива и постепенно уменьшался к границам щита

.Дальнейшие исследования с привлечением футшточных измерений (Kakkuri, Routannen, 1997), был обнаружен максимум поднятия севере Ладожского озера . Рис.2

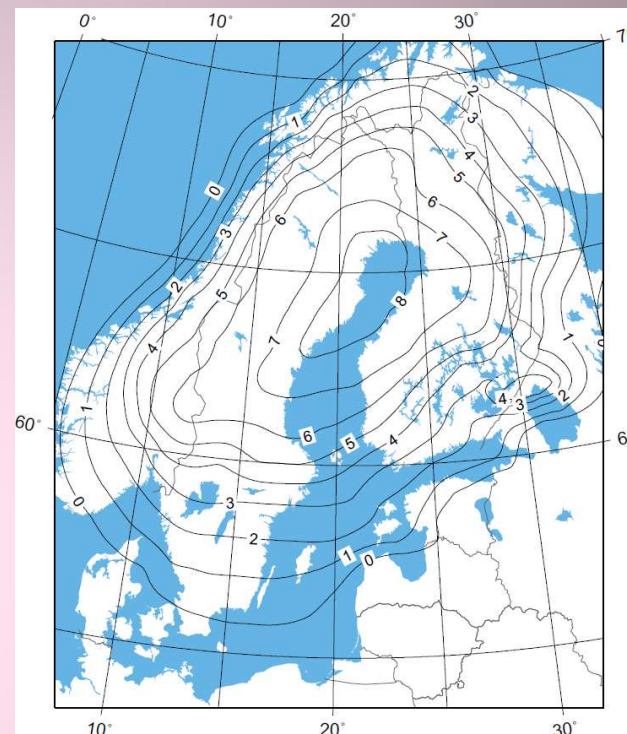


Рис.2. Историческая карта Фенноскандинавского поднятия, созданная по данным повторного точного нивелирования и футшточным наблюдениям

На последней «Карте современных вертикальных движений земной поверхности Северо-запада России и Финляндии», составленной по данным повторного нивелирования I и II классов и футшточным 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. Условная граница между поднятием и опусканием проходит по Ленинградской области и Карелии. Рис.3

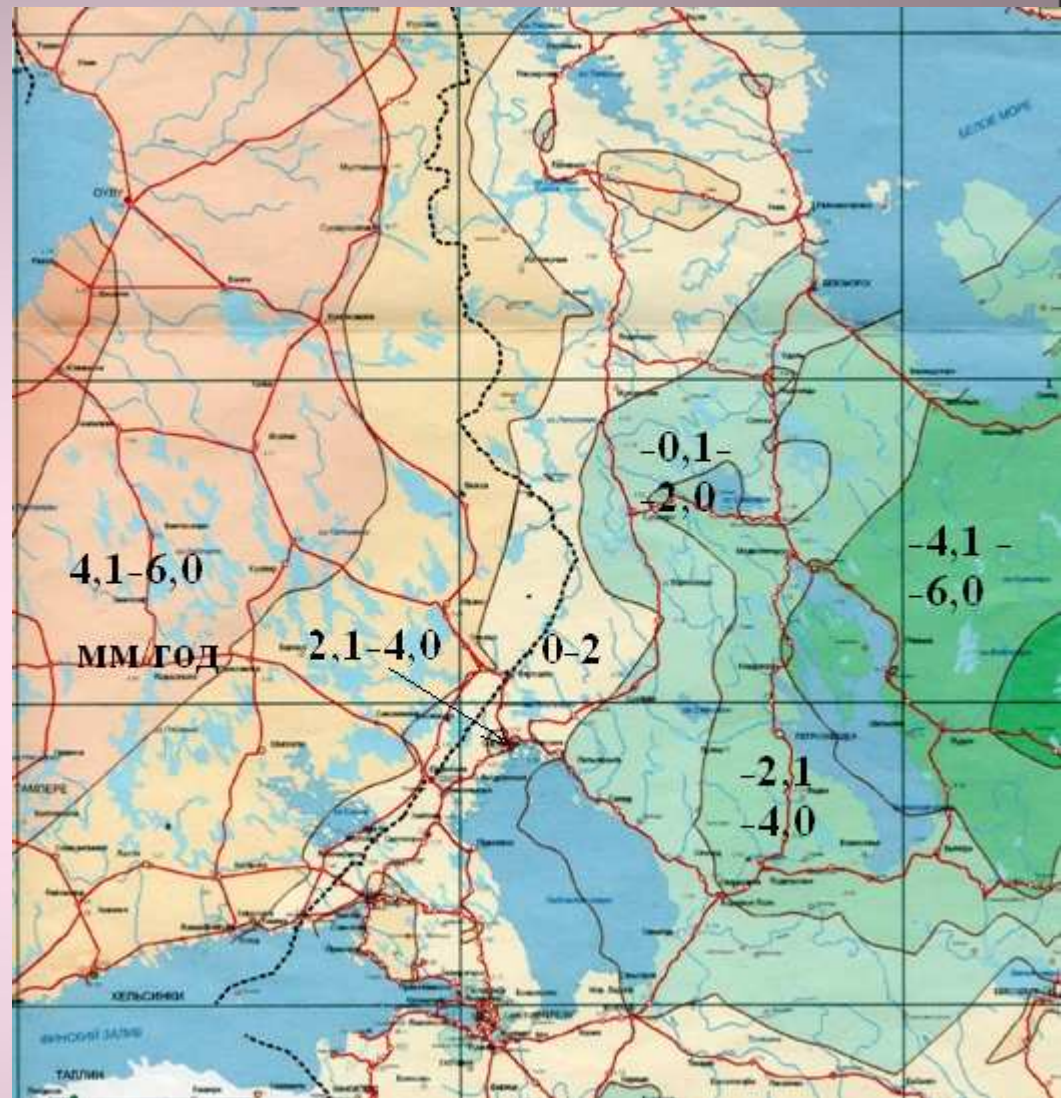


Рис.3

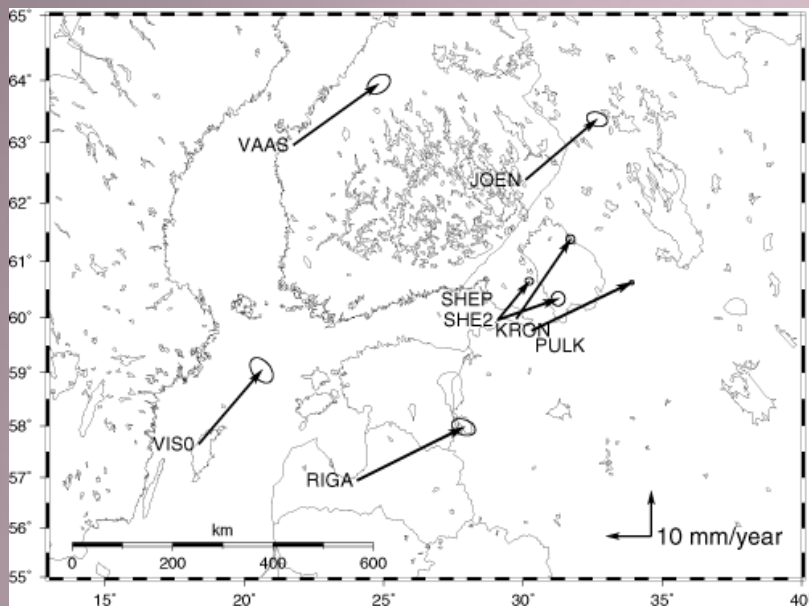
Развитие повторных измерений на сети пунктов GPS на территории Карелии было начато в 1999 г. и преследовало цель расширения сети международных европейских станций и отечественных пунктов спутниковых наблюдений (начатых в Ленинградской области в 1993 г.) и уточнения данных повторных нивелировок в регионе Ладожского и Онежского озер



На юге региона в Ленинградской области создана сеть наблюдений слежения и хранения Балтийской системы высот, включающая футшточные наблюдения за уровнем Финского залива и высокоточный нивелирный контроль в Кронштадте и на морской обсерватории в Шепелево. Кроме того на территории Главной астрономической обсерватории в Пулково, хранительница геодезической систему координат России и Советского Союза.

Пункты GPC наблюдений в Шепелево, Кронштадте, Пулково

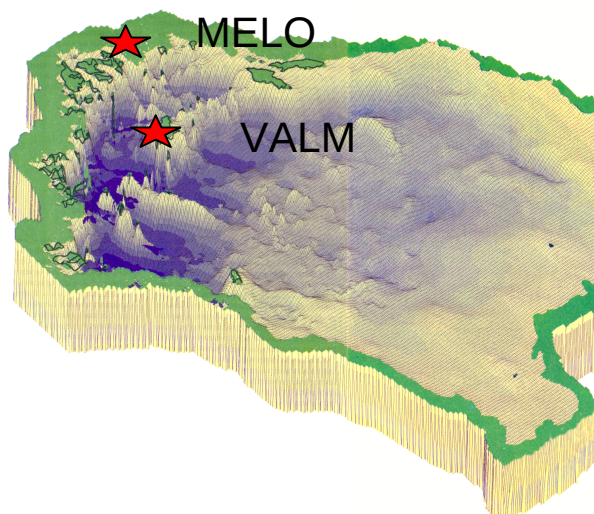




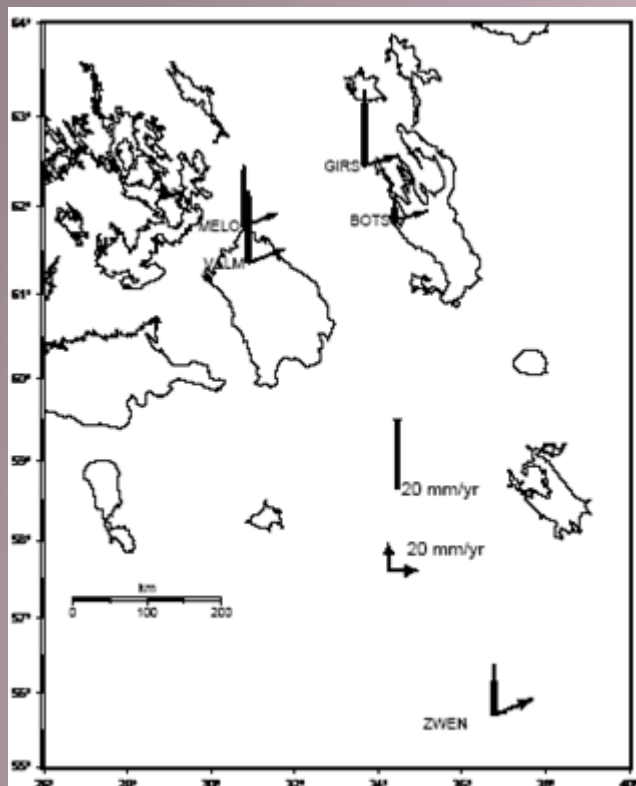
С 1995 г. специалистами ИФЗ РАН при участии сотрудников Главной астрономической обсерватории РАН выполняются измерения GPS на пунктах Пулково (PULK -1995, 1999, 2000, 2001, 2002 г.), Кронштадт (KRON – 2000, 2001, 2002 г.), Шепелево (SHEP – 2000, 2001, 2002 г.),. Обработка всех эпох измерений выполнялась с использованием пакета программ GAMIT/GLOBK в ITRF1997 и ITRF2000. В качестве опорных пунктов выбраны пункты IGS, имеющие многолетние ряды непрерывных GPS-измерений: JOEN, KIRO, METS, MDVO, ONSA, RIGA, TROM, VAAS, VIS0, ZWEN. Наиболее надежно скорости движений определены для пункта Пулково. Рис.4. Среднее значение горизонтального перемещения пункта Пулково происходит в системе IGS со средней скоростью (24.8 ± 1.9) мм/год по азимуту $(64 \pm 2)^\circ$ на северо-восток. Горизонтальные перемещения пунктов Шепелево и Кронштадт отличаются как по величинам скоростей, так и по направлению от общего положения в Прибалтийском регионе. Возможно, это вызвано неудачным закреплением центров пунктов и необходимо их заменить другими пунктами при последующих измерениях. Рис.4

- *GPS измерения в Карел*

- 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). Наблюдения проводились нами в летний период сериями по 4-20 суток с помощью двухчастотных приемников Trimble 4000 и Javad Maxor. 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. Рис.5.



По данным этой обработки было получено, что горизонтальные и вертикальные перемещения для разных временных интервалов, скорости имеют различия в зависимости от временного интервала осреднения между эпохами измерений. По данным совместного уравнивания ежегодных эпох измерений получено, что горизонтальное перемещение пунктов происходило со скоростью от 23 до 27 мм/год на северо-восток, что все пункты испытывали подъем что все пункты испытывали подъем с разной скоростью от 1,5 мм/год до 18,7 мм/год .

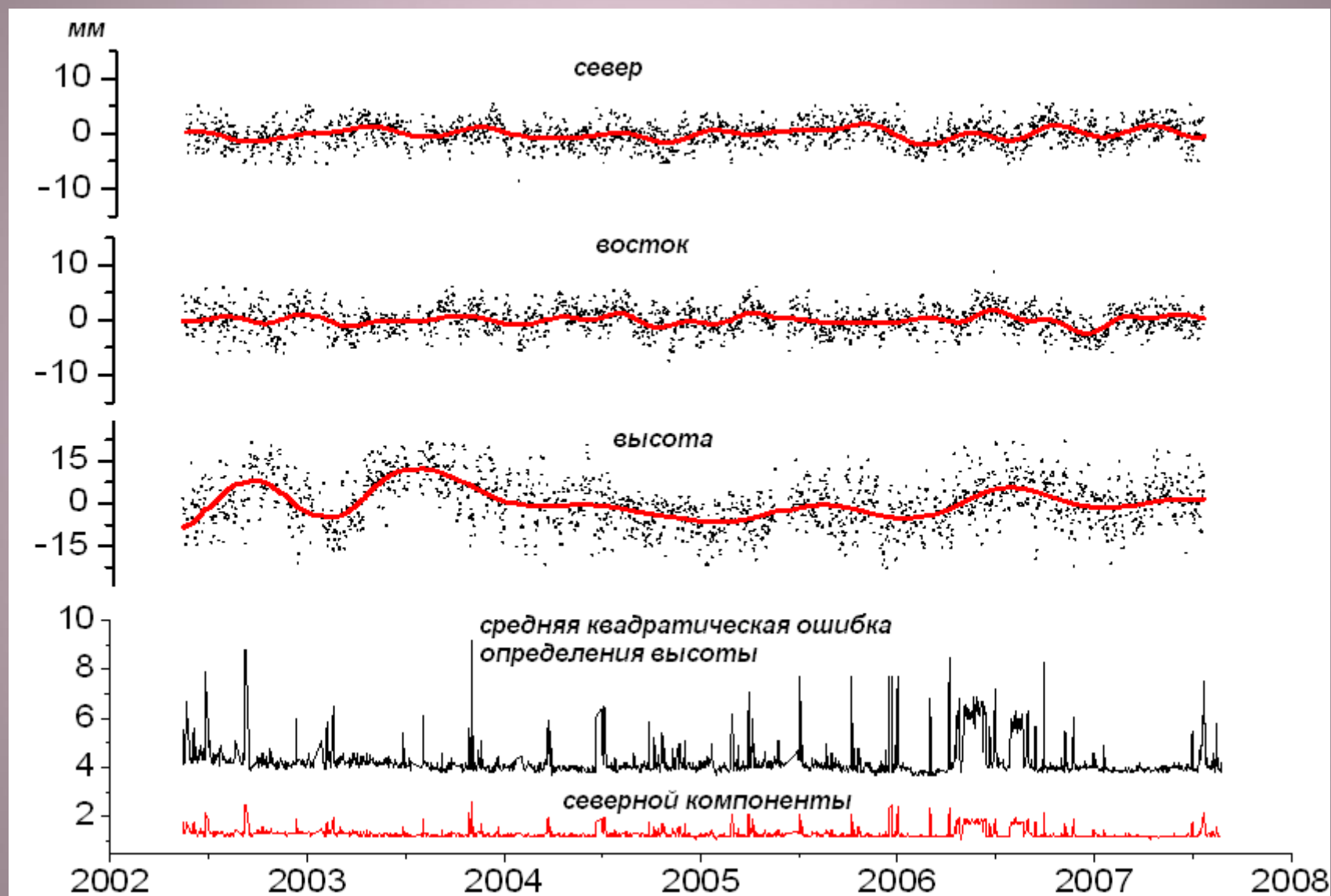
- Рис.5.
- Вектора скоростей горизонтальных перемещений с их эллипсами 95% вероятных ошибок пунктов GPS в ITRF2000 за период 1999-2002 г.г. За исходные пункты приняты пункты IGS: JOEN, KIRO, METS, MDVO, ONSA, RIGA, TROM, VAAS, VIS0, ZWEN. По данным этой обработки было рассчитаны горизонтальные и вертикальные 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

Результаты полевых измерений сотрудниками ИФЗ РАН 1999-2009 годов 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 и 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. Горизонтальные перемещения российских пунктов по данным последней обработки происходили с достаточно одинаковой средней скоростью около **24 мм/год по направлению 61°–66° на северо-восток**, 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.**

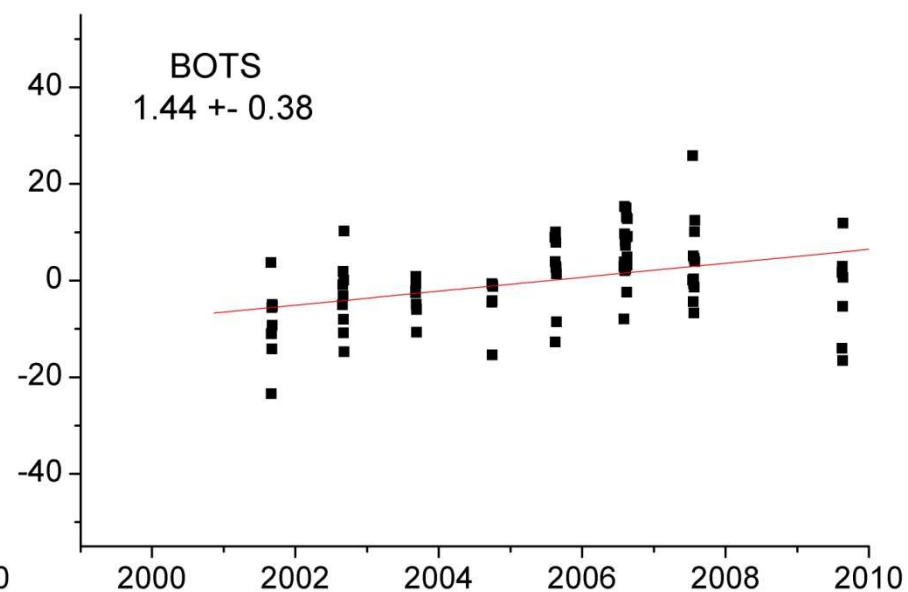
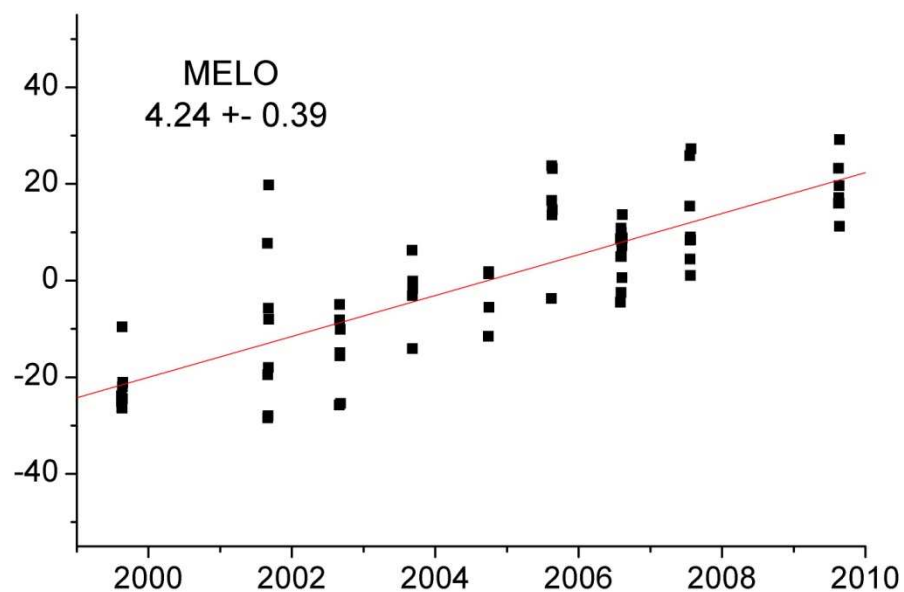
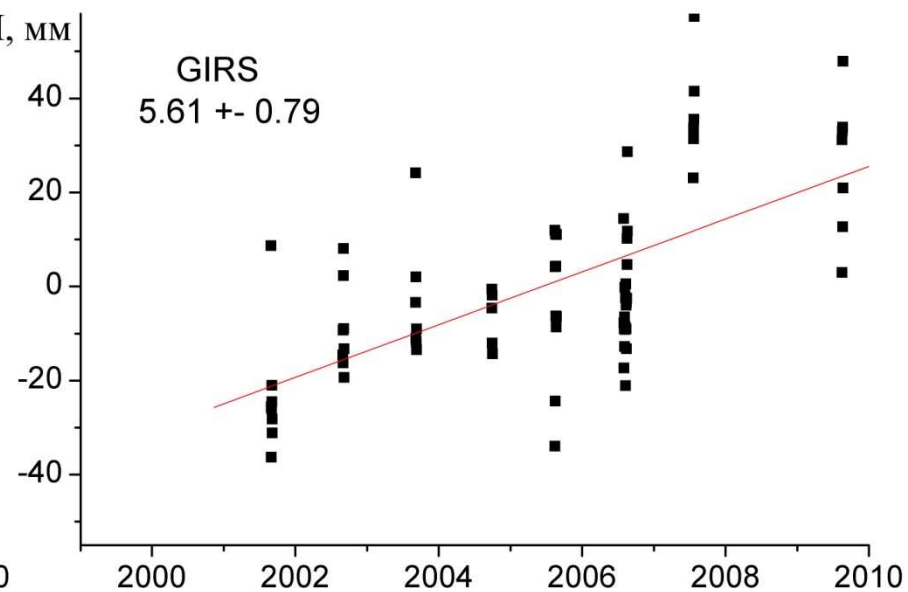
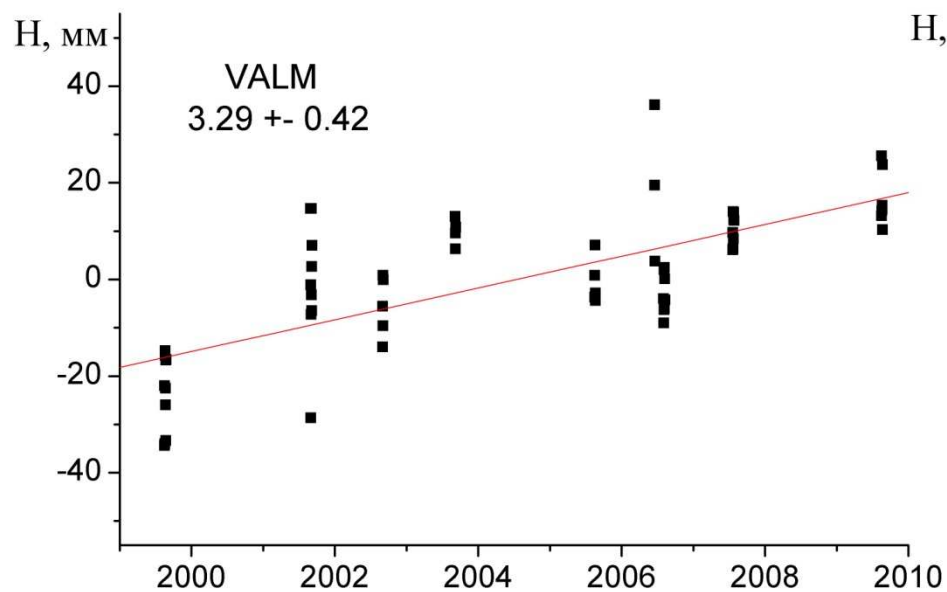
*Таблица 1. Сводка средних скоростей горизонтальных
и вертикальных смещений и их ошибки*

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
VALM	1999-2009	10.89 ± 0.14	22.47 ± 0.31	3.3 ± 0.4	24.97	64
MELO	1999-2009	10.26 ± 0.15	21.91 ± 0.26	4.2 ± 0.4	24.19	65
BOTS	2001-2009	10.72 ± 0.16	20.31 ± 0.17	1.4 ± 0.4	22.97	62
GIRS	2001-2009	10.00 ± 0.20	22.28 ± 0.31	5.6 ± 0.8	24.42	66
PULK	2002-2009	11.86 ± 0.05	21.27 ± 0.06	1.6 ± 0.1	24.35	61
SVTL	2005-2009	11.46 ± 0.11	21.38 ± 0.12	5.9 ± 0.3	24.26	62
JOEN	2002-2009	11.84 ± 0.05	20.25 ± 0.05	5.1 ± 0.1	23.46	60
METS	2002-2009	12.74 ± 0.05	19.60 ± 0.06	5.3 ± 0.1	23.38	57
VIRO	1999-2008	11.90 ± 0.14	19.95 ± 0.16	3.9 ± 0.4	23.23	59

**Среднеесуточные значения временного хода компонент станции PULK
и их ошибки после снятия трендов**



Временной ход изменения вертикальной компоненты относительно начальной эпохи измерений на пунктах дискретных измерений приведен на рис. 6



- На фоне линейного тренда зафиксированы сложные вариации движений. Значения скоростей, осредненные за весь период наблюдений, ближе к значениям скоростей по данным нивелирования. Средняя скорость поднятия пунктов VALM (3,3 мм/год) и MELO (4,2 мм/год) и амплитуда вариаций оказались больше по сравнению с пунктами на Онежском озере (BOTS) и в Пулковско (PULKS). Если полученное многолетнее вертикальное перемещение считать поднятием острова, то оно должно отразиться в соответствующем опускании уровня воды в Ладоге. Если полученное многолетнее вертикальное перемещение считать поднятием острова, то оно должно отразиться в соответствующем опускании уровня воды в Ладоге.
- Измерения уровня воды в Ладоге были начаты в 1859 г. Валаамскими монахами. Эти измерения были собраны и проанализированы в работе В.И. Богданова с соавторами. Согласно этим данным, средняя скорость депрессии Ладоги с начала регистрации составляет $-4,1 \pm 0,8$ мм/год, и 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 .

-

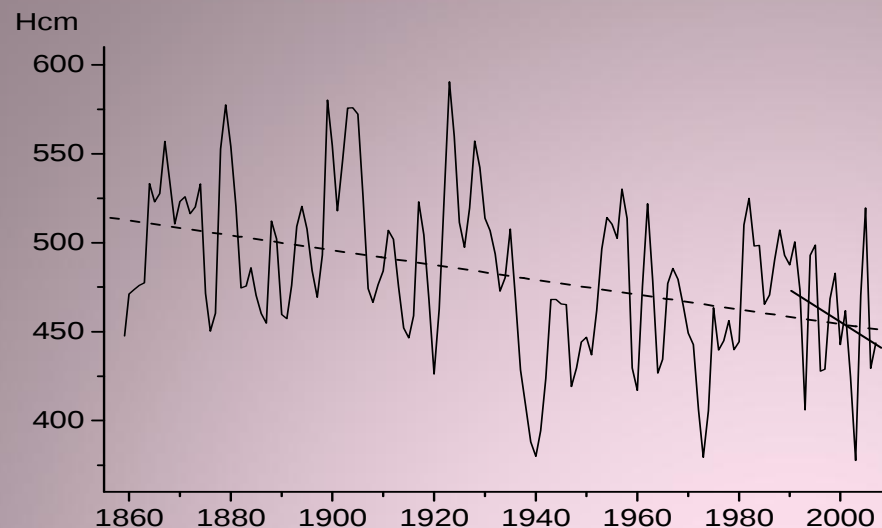


Рис.7. Временное изменение воды в Ладоге. Скорость уменьшения уровня воды в озере по абсолютной величине практически равна скорости поднятия северного Ладожья 3.3 мм/год (VALM) и 4.2 мм/год (MELO), вычисленным по результатам аппроксимации данных GPS измерений 1999-2009 гг. линейным трендом.

Тенденция к уменьшению уровня Ладоги со средней скоростью до $-10,1 \pm 3,9 \text{ мм/год}$ и Онеги со средней скоростью $-2.5 \pm 3,5 \text{ мм/год}$ за период 1993-2009 гг., определяемой по данным спутниковой альтиметрии, возможно является парадоксальной является парадоксальной и не отражает действительность.

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 MELO и VALM по данным GPS отличается как от результатов нивелирования, так и от значений скоростей депрессии Ладоги по данным уровнемерных наблюдений и особенно спутниковой альтиметрии.

Спасибо за внимание!