Геодезический спутниковый мониторинг и сейсмическая активность северо-запада России

Т.В. Гусева, И.С. Крупенникова, А.Н. Мокрова, В.П. Передерин

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН Москва, 123995, Россия E-mail: guseva@ifz.ru, irika 81@ifz.ru

Рассматриваются результаты изучения современной внутриплитовой геодинамики северо-запада России с применением спутниковых геодезических технологий, начатого специалистами РАН и зарубежными учеными в рамках международного сотрудничества в конце прошлого века. В данном исследовании мы определили, что сводообразное поднятие щита, продолжающееся со скоростью до 9 мм/год, в пределах российской части достигает 4 мм/год и плавно сменяется опусканием. Горизонтальные смещения пунктов GPS, вычисленные в координатной системе ITRF2008, имеют северо-восточное направление со средней скоростью от 21,6 мм/год на севере до 26,3 мм/год на юге. Полученные значения скоростей линейных деформаций лежат в пределах от -57·10⁻⁹ до 47·10⁻⁹. Обнаружены зоны аномального сжатия и растяжения севернее Ладожского и Онежского озер. На основе данных, полученных из регионального каталога землетрясений Кольского полуострова, рассчитана сейсмическая энергия, выделившаяся в результате тектонических землетрясений. В северо-западной части обнаруживается ряд упорядоченных структур, где суммарная сейсмическая энергия достигает значений порядка 10⁶-10⁸ Дж/км². Данные структуры ориентированы в пространстве с юго-запада на северо-восток. В то же время юго-восточная часть исследуемой территории в рассматриваемый период времени была асейсмична. Проведено сопоставление выделившейся сейсмической энергии с полем деформаций данного региона.

Ключевые слова: ГНСС, спутниковые измерения, сейсмичность, движения, деформации, мониторинг, Кольский полуостров, Ладожское, Онежское озеро

Одобрена к печати: 16.09.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-133-141

Введение

Представленное исследование является продолжением работ по изучению современной геодинамики Балтийского щита с применением спутниковых технологий, начатых сотрудниками ИФЗ РАН и ГАО РАН в рамках международного сотрудничествас зарубежными специалистами (Галаганов и др., 2009).

Исследуемая территория включает Балтийский щит с прилегающими территориями Восточно-Европейской платформы (ВЕП) северо-запада России. Балтийский щит – выступ докембрийского фундамента в северо-западной части ВЕП. После схода мощного ледника, покрывавшего этот регион в течение десятков тысяч лет, началось его изостатическое поднятие, которое считается продолжающимся и в современную эпоху. Комплексное изучение послеледникового поднятия региона геодезическими (наземными и космическими) и гравиметрическими методами в совокупности с метеорологическими наблюдениями активно ведется в скандинавских странах и – по мере современных возможностей – на его российской части (Kakkuri et al., 1997).

До недавнего времени считалось, что современная геодинамика Фенноскандии определяется только унаследованным изостатическим сводообразным поднятием щита, связанным с разгрузкой земной коры после стаивания ледника. Существует также предположение, что сводовое поднятие щита и достаточно высокий уровень горизонтальных сжимающих напряжений обусловлены наличием в нижних горизонтах земной коры астеносферной линзы и горизонтальным давлением со стороны раздвигающегося Срединно-Атлантического рифта (Юдахин и др., 2003; Землетрясения..., 2007).

Исследуемая территория считается зоной слабой сейсмичности, интенсивность землетрясений обычно не превышает нескольких баллов по MSK-64, в историческое время – до 8 баллов (Землетрясения..., 2007). Сейсмичность отражает тектоническую активность. Считается, что возникновение тектонической сейсмичности наблюдается на тех участках земной коры, которые испытывают интенсивное горизонтальное сжатие, достаточное для перехода массива в предельно-напряженное состояние (Землетрясения..., 2007). Изучение и анализ современных движений, деформаций и сейсмичности необходимо в связи с нахождением в исследуемом регионе ответственных инженерных объектов, в том числе действующих и строящихся АЭС (Кольских, Ленинградских, Тверских).

Задача исследований заключалась в выявлении современных движений и деформаций земной коры по данным спутниковых измерений в разных системах отсчета и временных интервалах и сопоставлении современных скоростей деформационного поля и местных сейсмогенерирующих структур.

Сеть спутниковых наблюдений включала пункты повторных спутниковых измерений геодинамической сети Карелии, расположенные 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), в районе расположения древнейших палеовулканов на территории пос. Гирвас (GIRS) и Кармасельга (KRMS) (Галаганов и др., 2009). Расположение и названия пунктов геодинамической сети Карелии и ближайших пунктов международной геодинамической сети приведены на *рис. 1*.

Методика спутниковых измерений и их обработка

Синхронные измерения GPS/ГЛОНАСС на геодинамической сети Карелии проводились ежегодно в июле–августе сериями по 7–13 суток с помощью двухчастотных приемников Javad Maxor с интервалом регистрации 30 с. В результате выполнения повторных измерений и обработки по программе Bernese 5.0 были определены среднесуточные и средние за эпоху геоцентрические и геодезические координаты пунктов в ITRF2008 в 2006, 2007, 2009, 2011 и 2013 годах, причем в качестве опорных (перемещаемых во времени с постоянной скоростью) были приняты пункты KIRU, SVTL, VIS0, ZWE2. Определены также скорости горизонтальных и вертикальных движений за разные временные интервалы в системе координат ITRF2008 относительно разных опорных пунктов. Для каждой эпохи измерений вычислены значения 120 длин линий и их изменения между эпохами и определены линейные деформации, отнесенные к середине расстояния между пунктами. Проведено сравнение полученных деформаций с распределением выделившейся сейсмической энергии.



Рис. 1. Расположение постоянно действующих пунктов Международной геодинамической сети и пунктов повторных измерений геодинамической сети Карелии

Движения

С использованием полученных кординат были рассчитаны скорости их изменения. В *табл. 1* приведены средние скорости горизонтальных и вертикальных смещений в ITRF2008 за наибольший временной интервал между первым и последним измерениями, (V_N — среднегодовая скорость горизонтального смещения на север, V_E — среднегодовая скорость горизонтального смещения на восток, V_H — среднегодовая скорость изменения вертикального положения, V_S – модуль скорости горизонтального смещения по азимуту *Az*).

Вычисления в международной референцной системе (по модели ITRF2008) показали, что горизонтальные перемещения пунктов GPS на исследуемой части Евразии имеют северо-восточное направление со средней скоростью от 21,6 мм/год на севере региона до 26,3 мм/год на юге, вертикальные движения отражают сводовое воздымание со скоростью до 8,9 мм/год (*табл. 1*), которое плавно сменяется опусканием на юге региона. Значения средних скоростей горизонтальных смещений в векторной форме (стрелки) и средние скорости вертикальных смещений в ITRF2008 в изолиниях за временной интервал 2006–2013 гг. представлены на *рис. 2*.

Значения скоростей горизонтальных движений в ITRF в значительной мере отражают движение Евразийской тектонической плиты. Чтобы оценить значения горизонтальных



Рис. 2. Карта скоростей вертикальных и горизонтальных движений за период 2006–2013 гг. в ITRF2008; изолинии скоростей вертикальных движений проведены через 1 мм/год, масштаб вектора горизонтальных движений приведен в левом нижнем углу

Таблица 1. Средние скорости горизонтальных и
вертикальных смещений в ITRF2008 на эллипсоиде
WGS-84 за временной интервал 2006-2013 гг.

Пункты	V _N мм/год	V _Е , мм/год	V _н , мм/год	V _s , мм/год	Аг, град
BOTS	11,8	21,0	-0,1	24,9	61
GIRS	14,9	18,5	4,3	23,8	51
MELO	16,0	18,4	5,0	24,4	49
KRMS	11,7	20,8	5,6	23,8	61
VALM	11,6	20,3	-2,4	23,2	60
JOEN	12,4	20,3	2,4	23,8	59
KIRU	14,8	15,8	7,6	21,6	47
MDVJ	12,0	22,8	-1,5	25,8	62
METS	13,9	19,7	0,9	24,1	55
RIGA	14,3	20,1	-0,6	24,7	54
SODA	13,7	17,8	2,6	22,5	52
SVTL	11,8	21,0	4,1	24,1	61
TRO1	15,9	14,9	3,9	21,8	43
VAAS	13,9	18,2	8,9	22,9	53
VARS	12,3	15,8	-3,3	20,0	52
VIS0	14,1	19,1	3,0	23,7	54
VLNS	14,2	21,0	-0,9	25,4	56
ZWE2	13,3	22,7	6,7	26,3	60

движений внутри исследуемого региона, выполнен расчет смещений относительно пункта KIRU, находящегося на северо-западе исследуемой территории (*табл. 2*). Значения скоростей изменяются от 1,43 мм/год на северо-западе до 7,6 мм/год на юго-востоке. По данным, приведенным в *табл. 2*, построена карта векторов скоростей относительных горизонтальных движений, приведенная на *рис. 3*.

Линейные деформации земной коры определялись за разные временные интервалы. Полученные значения скоростей деформаций лежат в пределах от -57·10⁻⁹ до 47·10⁻⁹ при среднем значении -0,02·10⁻⁹. На *рис. 4* приведены карты средних скоростей линейных деформаций за временные интервалы 2006–2009 гг. и 2006–2013 гг. В течение 2006–2009 гг. поле линейных деформаций было слабо возмущенным. Северо-западу Фенноскандии и участкам территории с Ладогой и Онегой свойственны удлинения со скоростью до 5·10⁻⁹ в год, укорочения испытали восточная и юго-восточная часть. К 2011 г. зона деформации удлинения увеличилась с образованием аномалии на севере Ладоги, которая к 2013 году сместилась на северо-запад Онежского озера. На прежнем месте возникла зона аномального укорочения.



Рис. 3. Векторы скоростей горизонтальных движений относительно пункта KIRU за период 2006–2013 гг.

Таблица 2. Средние скорости горизонтальных смещений относительно пункта KIRU за период 2006–2013 гг.

Пункт	dV _N , мм/год	dV _e , мм/год	dV _s , мм/год	Аz, град
BOTS	-3,00	5,25	6,05	120
GIRS	0,09	2,76	2,76	88
MELO	1,27	2,59	2,89	64
JOEN	-2,40	4,54	5,13	118
MDVJ	-2,80	7,07	7,60	112
RIGA	-0,42	4,30	4,32	96
SVTL	-2,95	5,23	6,00	119
VAAS	-0,82	2,40	2,53	109
VIS0	-0,71	3,29	3,36	102
VLNS	-0,61	5,27	5,30	97
KIRU	0	0	0	0
METS	-0,85	3,96	4,05	102
TRO1	1,14	-0,87	1,43	322
ZWE2	-1,49	6,90	7,06	102
SODA	-1,02	2,02	2,26	117
VARS	-2,45	0,01	2,45	180



Рис. 4. Карты скоростей линейных деформаций за разные временные интервалы: а) 2006–2009 гг.; б) 2006–2013 гг.

Расчет сейсмической энергии

Расчет сейсмической энергии, выделившейся в результате тектонических землетрясений, проводился для области, огранченной координатами 52° – 72° с.ш. и 16° – 43° в.д. Данные были взяты из регонального каталога землетрясений Кольского полуострова и прилегающх территорий, представленного на сайте Геофизческой службы РАН (http:// www.ceme.gsras.ru). Обработка данных производилась с помощью разработанного авторами программного обеспечения.

Всего за период 2000–2014 гг. на исследуемой территории и в ее окрестностях было зафиксированно 258 землетрясений с магнитудами (Ms) от 1,8 до 6,2. Из них только 50 событий произошло в исследуемой области, где большнство значений магнитуд лежало в пределах 2,5–4,0, а максимальное значение Ms составило 4,87. Для оценки энергии землетрясений (в системе единиц СИ) использовалось соотношение Гутенберга-Рихтера:

$$\lg E = 1,5Ms + 4,8.$$
 (1)

Исследуемая территория была разбита прямоугольной сеткой на 400 ячеек площадью по 16000 км², для каждой из которых проведено суммирование сейсмической энергии всех землетрясений, возникших в ее пределах за рассматриваемый период, а полученное значение присвоено центру ячейки, и построена карта распределения удельной сейсмической энергии E (Дж/км²) за разные временные интервалы (*puc. 5*).



Рис. 5. Карта распределения суммарной сейсмической энергии землетрясений северной части Европы за: а) 2000–2014 гг.; б) 2006–2013гг.

Распределение сейсмической энергии в пределах рассматриваемой области достаточно неоднородно. В северо-западной части обнаруживается ряд упорядоченных протяженных цепочек элементов активности, где суммарная сейсмическая энергия достигает значений порядка 10⁶-10⁸ Дж/км². Данные структуры ориентированы в пространстве с юго-запада на северо-восток. В то же время юго-восточная часть исследуемой территории в рассматриваемый период времени была асейсмична. За период 2006–2013 гг. на исследуемой территории произошло всего 15 землетрясений с магнитудой Ms до 3,5. Удельная сейсмическая энергия достигала 1·10⁶ Дж на 16000 км².

Сопоставление полученного распределения удельной сейсмической энергии с полем линейных деформаций приведено на *рис.* 6. В рассматриваемый временной интервал элементы сейсмической активности располагаются в районах малых деформаций.



Рис. 6. Распределение элементов удельной сейсмической энергии и поля линейных деформаций

Заключение

Результаты выполненных исследований с использованием спутниковых технологий и анализа сейсмичности позволяют оценить современную тектоническую активность Фенноскандии:

 продолжается сводообразное поднятие щита со скоростью до 9 мм/год, которое в пределах российской части достигает 4 мм/год, плавно переходящее в опускание до -3 мм/год на юге и юго-востоке; сравнение скоростей, определенных наземными (Галаганов и др., 2009; Kakkuri et al., 1997) и спутниковыми геодезическими методами, показывает их сопоставимость;

– горизонтальные смещения пунктов GPS на исследуемой территории, имеющие северо-восточное направление со средней скоростью от 21,6 мм/год на севере до 26,3 мм/год на юге, отражают характер движения Евразии по модели ITRF 2008; местные внутриплитовые горизонтальные перемещения происходят со скоростью от 1,4 мм/год на северо-западе до 7,6 мм/год на юго-востоке;

– использованная методика анализа деформирования земной коры выявила наличие зон удлинения, присущее в основном сводовому поднятию, и территорий укорочения на востоке и юго-востоке территории, обнаружены области с аномальными скоростями деформаций в пределах укорочения до -57·10⁻⁹ в год и удлинения до 47·10⁻⁹ в год;

 проявление сейсмичности в пределах рассматриваемой области достаточно неоднородно, основные сейсмогенерирующие структуры ориентированны в пространстве с юго-запада на северо-восток; удельная энергия землетрясений составляет 1·10⁶ Дж на 16000 км² в год;

 сопоставление скоростей движений, деформаций и сейсмичности определяет количественные характеристики современной геодинамики исследуемого региона.

Литература

- 1. Галаганов О.Н., Горшков В.Л., Гусева Т.В., Кузнецов Ю.И., Розенберг Н.К., Передерин В.П., Щербакова Н.В. Парадокс отличий в вертикальных движениях по данным определений разными методами // Геодезія, картографія і аэрофотознімання. Вып. 71. Львів. 2009. ISSN 0130-1039. УДК 528. С. 241–248.
- 2. Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. Кн. 1: Землетрясения. Ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина. Петрозаводск: Кар. НЦ РАН, 2007. 381 с.
- 3. *Юдахин Ф.Н., Щукин Ю.К., Макаров В.И.* Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 299 с.
- 4. *Kakkuri J., Poutanen M.* Geodetic determination of the surface topography of the Baltic Sea // Marine Geodesy. 1997. Vol. 20, No. 4. P. 1–10.

Geophysical satellite monitoring and seismic activity of the North-West of Russia

T.V. Guseva, I.S. Krupennikova, A.N., Mokrova, V.P. Perederin

O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS Moscow 123995, Russia E-mail: guseva@ifz.ru, irika_81@ifz.ru

Here we present the results of the study of modern intraplate geodynamics of Northwest Russia with the use of satellite geodetic technologies, started by specialists of the RAS and foreign scientists as international cooperation at the end of the last century. In this study we defined that dome-shaped uplift of the shield continuing at a speed up to 9 mm/ year, in the Russian part reaches 4 mm/year and gradually replaced by subsidence. Horizontal displacements of GPS points, calculated in ITRF2008 coordinate system, have a North-East direction and average speed of 21.6 mm/year

on the North and up to 26.3 mm/year on the South. The obtained values for linear and strain rate range from $-57 \cdot 10^{-9}$ to $47 \cdot 10^{-9}$. The anomalous zones of compression and stretching on the North of Ladoga and Onega lakes are discovered. Based on the data received from the regional catalog of earthquakes of the Kola Peninsula, we compute seismic energy released as a result of tectonic earthquakes. In the North-Western part a number of well-ordered structures are revealed, where the total seismic energy reaches values of the order of $10^{6} \cdot 10^{8}$ J/km². These structures are oriented from the South-East. At the same time, the South-Eastern part of the study area in the period under review was aseismic. Released seismic energy was compared with a deformation field of this region.

Keywords: GNSS, satellite measurements, seismic activity, motion, deformation, monitoring, Kola Peninsula, Ladoga, Onega

> *Accepted: 16.09.2016* DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-133-141

References

- 1. Galaganov O.N., Gorshkov V.L., Guseva T.V., Kuznetsov Yu.I., Rozenberg N.K., Perederin V.P., Shcherbakova N.V., Paradoks otlichii v vertikal'nykh dvizheniyakh po dannym opredelenii raznymi metodami (The paradox of differences in the vertical movements according to the definitions by different methods), *Geodeziya, kartografiya i aerofotoznimannya*, Issue 71, L'viv, 2009, ISSN 0130-1039, UDK 528, pp. 241–248.
- 2. Zemletryaseniya i mikroseismichnost' v zadachakh sovremennoi geodinamiki Vostochno-Evropeiskoi platformy, Kn. 1: Zemletryaseniya (Earthquakes and microseismicity in the problems of modern geodynamics of the East European platform, vol. 1: Earthquakes), Petrozavodsk: Kar. NTs RAN, 2007, 381 p.
- 3. Yudakhin F.N., Shchukin Yu.K., Makarov V.I., *Glubinnoe stroenie i sovremennye geodinamicheskie protsessy* v *litosfere Vostochno-Evropeiskoi platformy* (Deep structure and modern geodynamic processes in the lithosphere of the East European platform), Ekaterinburg: UrO RAN, 2003, 299 p.
- 4. Kakkuri J., Poutanen M., Geodetic determination of the surface topography of the Baltic Sea, *Marine Geodesy*, 1997, Vol. 20, No. 4, pp. 1–10.