

УДК 528.2; 550.34

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ

© 2020 г. Т.В. Гусева, И.С. Крупенникова, А.Н. Мокрова,
В.П. Передерин, Н.К. Розенберг

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Анализируются результаты ГНСС (GPS/ГЛОНАСС) наблюдений за период 2006–2018 гг., полученные в ходе изучения современной внутриплитной геодинамики северо-западной части территории России.

При исследовании современных движений и деформаций земной коры были использованы данные повторных спутниковых измерений, выполненных сотрудниками Института физики Земли РАН в Карелии, Ленинградской области, а также измерений с двадцати постоянно действующих станций Международной геодинамической сети. Также рассматриваются данные, полученные на новом расположенном в районе Кандалакшского залива геодинамическом полигоне, где с момента его заложения в 2015 г. проведено несколько циклов повторных измерений.

Полученные данные подтвердили, что сводообразное поднятие, приуроченное к Балтийскому щиту, продолжается со скоростью до 10.4 мм/год; в пределах российской части щита скорость поднятия достигает 6 мм/год. Горизонтальные смещения пунктов ГНСС, вычисленные в координатной системе ITRF, происходят в северо-восточном направлении при средней скорости по аппроксимированным данным за 2006–2018 гг. от 19.9 мм/год на севере до 23.9 мм/год на юге. Деформационное поле региона неравномерно, протяженные зоны сжатия и растяжения сменяют друг друга, со значениями от $(-0.8) \cdot 10^{-8}$ до $1.6 \cdot 10^{-8}$ в год.

С использованием данных каталога землетрясений за 2000–2018 гг. рассчитан поток сейсмической энергии, выделившейся в результате местных тектонических землетрясений. Распределение скоростей потока сейсмической энергии в пределах рассматриваемой территории неоднородно. В западной части территории прослеживается вытянутая в меридиональном направлении область, сейсмическая активность в которой достигает 10^{10} Дж/год; эта область приурочена к зоне растяжения с деформациями до $0.6 \cdot 10^{-8}$ в год. В южной части, в Балтийско-Ладожской области, зона с сейсмической активностью, достигающей $\sim 10^6$ Дж/год, вытянута с юго-запада на северо-восток и приурочена к участку, переходному от сжатия к растяжению.

Сопоставление скоростей перемещений, деформаций и сейсмичности определяет количественные характеристики современной геодинамики исследуемого региона.

Ключевые слова: ГНСС, спутниковые измерения, сейсмичность, движения, деформации, мониторинг, Балтийский щит, поток сейсмической энергии.

Введение

Представляемое исследование является продолжением работ по изучению современной геодинамики северо-западного региона России и прилегающих территорий. Используются данные, полученные с помощью технологий глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС (далее – ГНСС), которые были начаты сотрудниками Института физики Земли РАН в конце прошлого века в рамках сотрудничества с зарубежными специалистами [Прилепин и др., 2002; Галаганов и др., 2009, 2011; Гусева и др., 2016].

Исследуемая территория, характеризующаяся слабой сейсмической активностью, включает Балтийский щит, являющийся выступом докембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы, и прилегающую к нему часть платформы [Горшков и др., 2015]. Предполагается [Юдахин, Щукин, Макаров, 2003], что тектоническая сейсмичность возникает на тех участках земной коры, которые испытывают интенсивное горизонтальное сжатие, достаточное для перехода массива в предельно напряженное состояние. Изучение и анализ современных движений, деформаций и сейсмичности необходимы в исследуемом регионе для повышения безопасности строительства и эксплуатации ответственных инженерных объектов, в том числе действующих и строящихся Кольской и Ленинградской АЭС.

При исследовании современных движений и деформаций земной коры использованы данные повторных спутниковых измерений ГНСС, выполненных сотрудниками ИФЗ РАН в Карелии (наблюдения 2006–2018 гг.) и Ленинградской области (наблюдения 2007–2018 гг.), а также измерений на двадцати постоянно действующих станциях Международной геодинимической сети (IGS) в России, Финляндии, Швеции и Норвегии. Также в исследовании были использованы данные трех циклов повторных ГНСС измерений, проведенных в 2015–2018 гг. на пунктах геодинимического полигона, созданного на побережье Кандалакшского залива для изучения локальных движений в зоне активного грабена.

Повторные синхронные измерения GPS/ГЛОНАСС на региональной геодинимической ГНСС сети северо-запада России проводились ежегодно (или через год) в июле-августе сериями по 3–13 суток с помощью двухчастотных приемников *Javad Maxor* (интервал регистрации – 30 с). В результате обработки данных повторных измерений с использованием программного комплекса *Bernese* определены среднесуточные и средние на эпоху измерений геоцентрические и геодезические координаты пунктов в международной наземной системе координат ITRF (модели ITRF 2008 и ITRF 2014).

При вычислениях в качестве опорных (перемещаемых во времени с постоянной скоростью) принимались четыре пункта – KIRU (Кируна, Швеция), SVTL (Светлое, Россия), VIS0 (Висбю, Швеция), ZWE2 (Звенигород, Россия); в число определяемых были включены ближайшие пункты IGS, в том числе, постоянно действующая станция LOVJ (сейсмостанция “Ловозеро”), созданная на Кольском полуострове в 2009 г. и работающая под руководством Г.М. Стеблова. Среднеквадратическая случайная ошибка определения плановых координат в относительной системе отсчета с четырьмя опорными пунктами, принимаемыми за неподвижные, составила в среднем 0.2 мм для закрепленных пунктов IGS и 0.3–0.5 мм – для определяемых.

Были определены скорости горизонтальных и вертикальных движений за разные временные интервалы в ITRF 2008. В июле-августе 2018 г. был выполнен очередной цикл наблюдений GPS/ГЛОНАСС на геодинимических полигонах северо-западной части России; обработка полученных данных проводилась с использованием программного комплекса *Bernese 5.2* в уточненной опорной системе координат ITRF 2014.

Полученные в результате расчета смещения плановых и высотных координат во времени относительно начальной эпохи измерений описываются линейной функцией с коэффициентом корреляции близким к единице. Дисперсия полученных значений для плановых координат не превышает 1.1 мм, для высотных – 1.6 мм. Также были рассчитаны скорости площадных деформаций и проведено их сопоставление со скоростью потока сейсмической энергии.

Движения и деформации

Результаты линейной аппроксимации значений изменения координат за период 2006–2018 гг. свидетельствуют о том, что горизонтальные смещения пунктов GPS на исследуемой части Евразии происходят в северо-восточном направлении со средней скоростью от 19.9 мм/год на севере региона до 23.9 мм/год на юге (рис. 1).

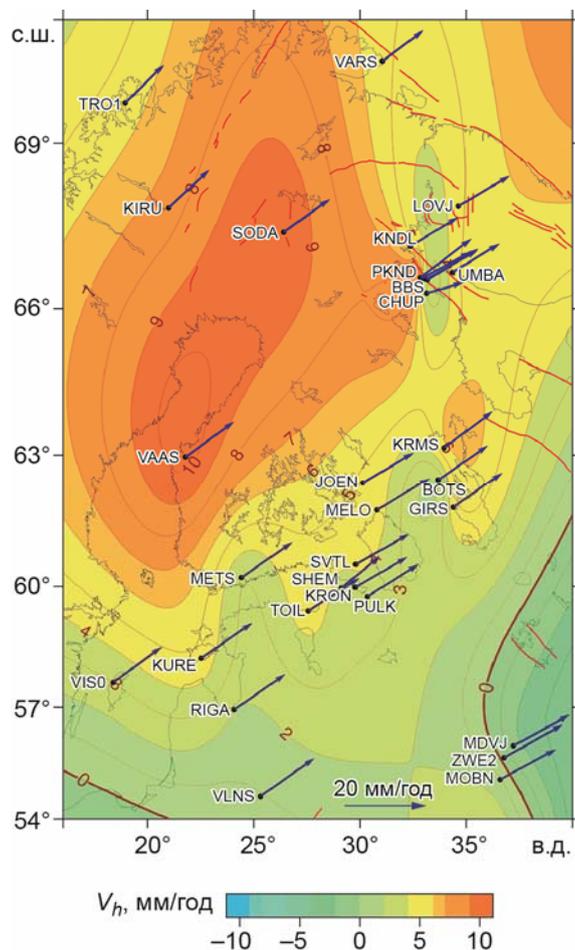


Рис. 1. Карта скоростей вертикальных (изолинии) и векторов горизонтальных (стрелки) движений за 2006–2018 гг. в международной наземной системе координат ITRF. Красные линии – крупные разрывные нарушения

Fig. 1. Map of velocities of vertical (contours) and vectors of horizontal (arrows) movements for the period of 2006–2018 in the international terrestrial reference system ITRF. Red lines are major faults

Как это отмечается и в более ранних публикациях (см., например, [Галаганов и др., 2009, 2011; Гусева и др., 2016]), вертикальные движения отражают процесс сводового поднятия со скоростью до 10.4 мм/год (на российской территории не более 5–6 мм/год). Зафиксированные скорости поднятия по данным ГНСС измерений сопоставимы с результатами повторных гравиметрических измерений ускорения силы тяжести [Kaftan, Mäkinen, 2019]. Значения скоростей горизонтальных движений, определяемые по модели ITRF, в значительной мере отражают движение Евразийской тектонической плиты.

Для оценки значений горизонтальных движений в пределах исследуемого региона рассчитывались смещения относительно пункта KIRU, находящегося на северо-западе исследуемой территории (рис. 2). Можно видеть, что скорости горизонтальных смещений имеют преимущественно юго-восточное направление, составляя от 0.8 мм/год на северо-западе до 5.8 мм/год на юго-востоке.

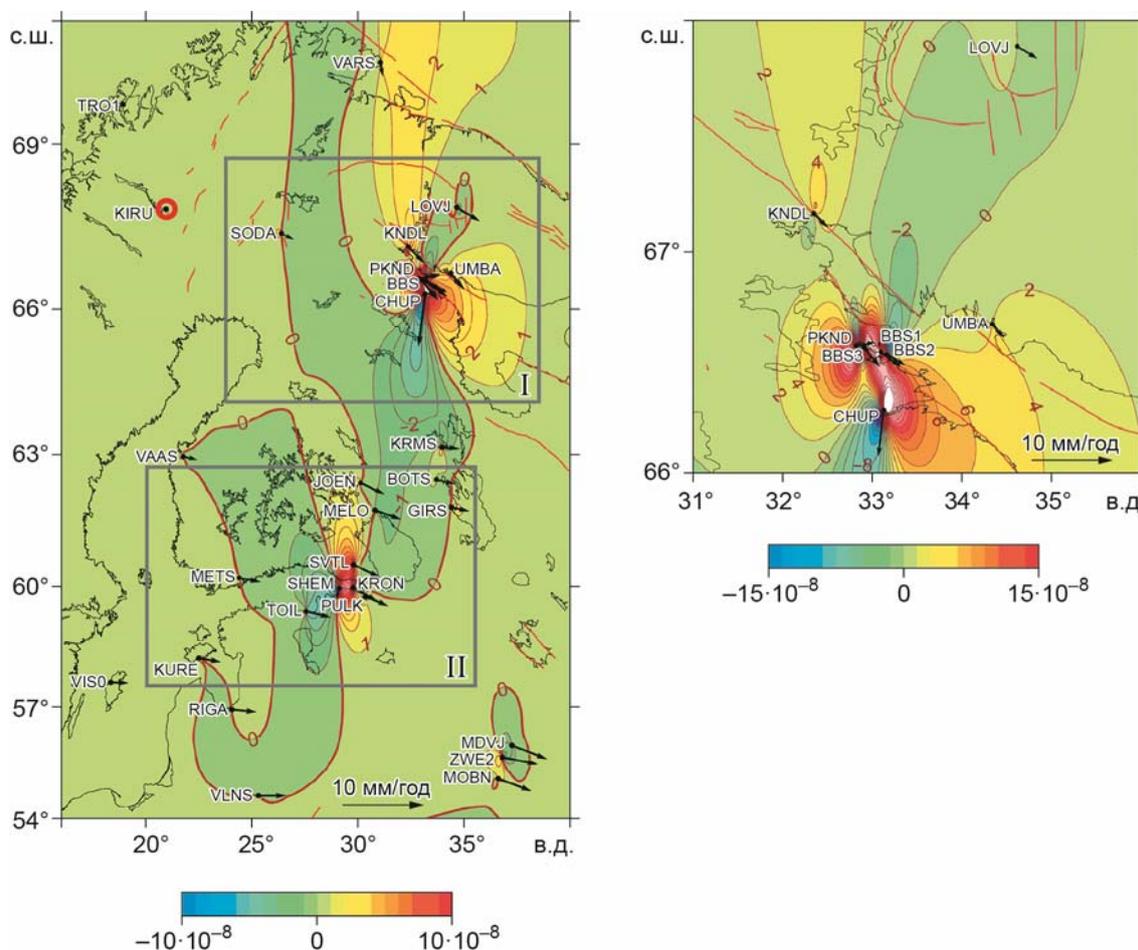


Рис. 2. Карты скоростей площадных деформаций (изолинии) и векторов скоростей (стрелки) горизонтальных смещений относительно закрепленного пункта KIRU (отмечен красным кружком) для северо-западной части России (слева, наблюдения 2006–2018 гг.) и для района Кандалакшского залива (справа, наблюдения 2015–2018 гг.). Здесь и на рис. 4 синие-зеленые оттенки – режим сжатия, желто-красные – растяжения. Контурсы I и II – границы участков, для которых далее выполнялось сопоставление потока сейсмической энергии с деформациями

Fig. 2. Map of the velocities of areal deformations (contours) and the velocity vectors (arrows) of horizontal displacements relative to the fixed point KIRU (marked as a red circle) for the North-West part of Russia (on the left, observations 2006–2018) and for the Kandalaksha Bay area on a larger scale (on the right, observations 2015–2018). Here and in Fig. 4 blue-green shades – compression mode, yellow-red – stretching mode. Contours I and II are the boundaries of the sections for which a comparison of seismic energy flow with deformations is shown below

С использованием координат пунктов и скоростей их изменения рассчитан первый инвариант тензора деформаций для определения деформаций сжатия и растяжения за рассматриваемый временной интервал. Исходные измерения при этом интерполировались на

равномерную сетку с малым шагом, после чего выполнялось пространственное дифференцирование компонентов векторного поля по конечно-разностной схеме.

Деформационное поле региона отличается неравномерностью, протяженные зоны сжатия и растяжения сменяют друг друга. Значения деформаций изменяются в пределах от $-0.8 \cdot 10^{-8}$ до $1.6 \cdot 10^{-8}$ в год (см. рис. 2). Аномальные проявления деформационного поля выявлены для побережья западной части Финского залива и побережья Канда-лакшского залива (см. рис. 2, справа).

Сейсмичность

Для оценки сейсмической активности исследуемого региона использовались данные каталога землетрясений, предоставленные Кольским филиалом Единой геофизической службы РАН, и каталога Геологической службы США. В 2000–2018 гг. в пределах рассматриваемой территории произошло 192 сейсмических события с магнитудами $M_s=0.7-4.1$. В основном, это были слабые события с магнитудами до 3.3, кроме девяти землетрясений с M_s от 3.5 до 4.1. Расчет сейсмической энергии, выделившейся в результате землетрясений, проводился с помощью разработанного авторами программного обеспечения. Для сопоставления деформирования территории с сейсмической активностью использовался параметр количества выделившейся энергии землетрясений (E), вычисленный из соотношения Гутенберга–Рихтера $\lg E = 1.5M_s + 4.8$.

Территория была разбита на ячейки по 10 тыс. км², для каждой из которых проведено суммирование сейсмической энергии всех землетрясений за 2000–2018 гг. Полученные суммарные значения присвоены центру каждой ячейки. Таким образом был рассчитан поток сейсмической энергии P_E , Дж/год [Тарасов, Тарасова, 2011, 2019], площадное распределение которого представлено на рис. 3.

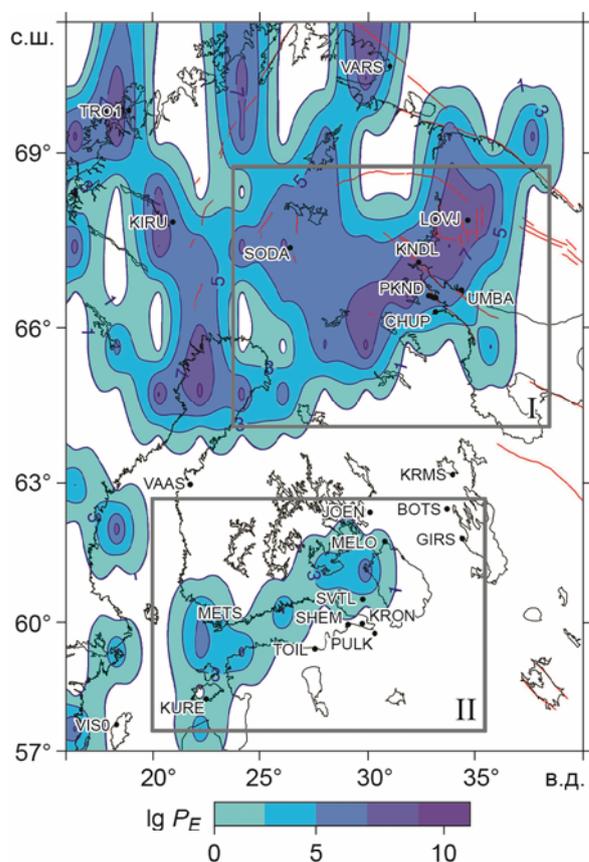


Рис. 3. Распределение потока сейсмической энергии P_E , Дж/год за 2000–2018 гг. Контуры I и II – границы участков, для которых выполнялось сопоставление потока сейсмической энергии с деформациями: I – район Кандалакшского залива, II – Балтийско-Ладожская область

Fig. 3. Distribution of seismic energy flow P_E , J/year for 2000–2018. Contours I and II are the boundaries of the sections for which a comparison of seismic energy flow with deformations is shown below: I – Kandalaksha Bay area, II – Baltic-Ladoga region

Как можно видеть на рис. 3, распределение потока сейсмической энергии в пределах рассматриваемой области неоднородно. Бóльшая интенсивность сейсмических проявлений характерна для сводового поднятия Фенноскандии. На западе сейсмическая активность проявляется в виде упорядоченной цепочки фрагментов меридиональной направленности со значениями P_E до 10^{10} Дж/год; одна из них приурочена к зоне с растяжением до $0.6 \cdot 10^{-8}$ в год. Со среднегодовыми скоростями потока сейсмической энергии P_E сопоставлялось деформирование территории.

На рис. 4, *вверху* приведено сопоставление площадного распределения среднегодовых значений деформаций и потока сейсмической энергии для района Кандалакшского залива (контур I на рис. 3), *внизу* – для Балтийско-Ладожской области (контур II на рис. 3). В первом случае (район Кандалакшского залива) повышенная сейсмическая активность сопутствовала аномальному проявлению деформационного поля. Обращает на себя внимание Балтийско-Ладожская область сейсмической активности (см. рис. 4, *внизу*), вытянутая в пространстве с юго-запада на северо-восток, где среднегодовые изменения потока сейсмической энергии P_E достигают значений 10^6 Дж/год. Эта область характеризуется переходом от деформаций сжатия к деформациям растяжения. Здесь можно отметить неполное совпадение аномальной деформации растяжения и повышенных изменений потока сейсмической энергии.

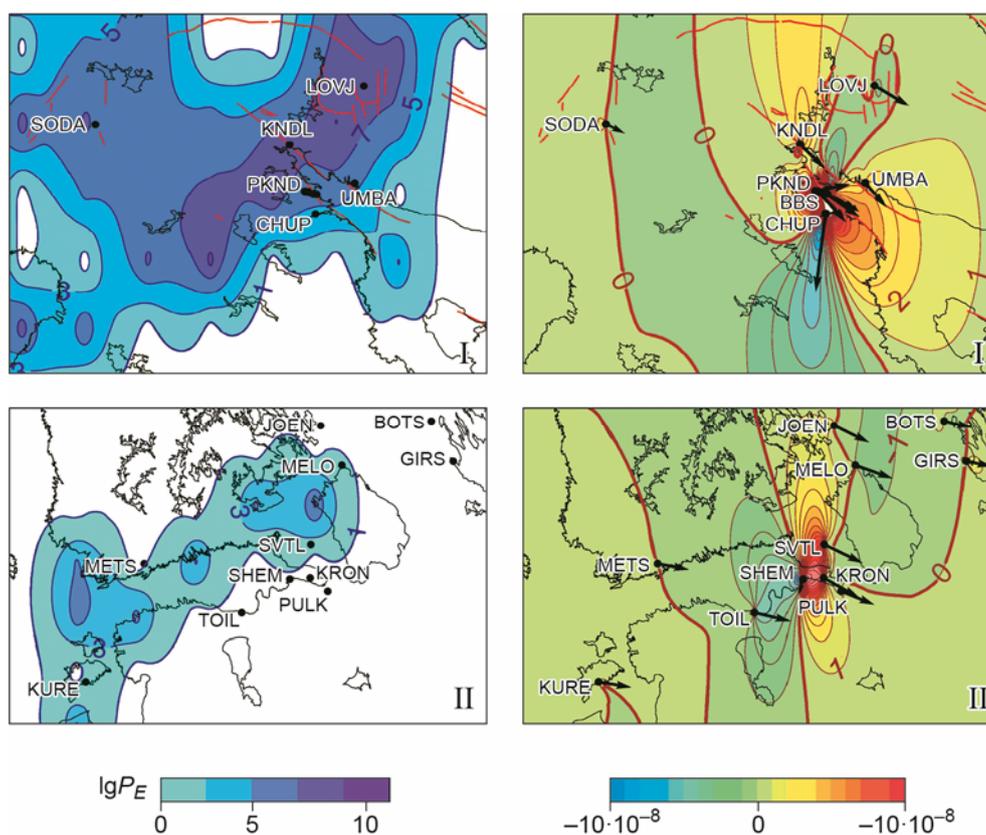


Рис. 4. Сопоставление результатов, полученных для района Кандалакшского залива (*вверху*) и Балтийско-Ладожской области (*внизу*): *слева* – распределение потока сейсмической энергии в Дж/год; *справа* – распределение деформаций. Остальные обозначения соответствуют рис. 1, 2

Fig. 4. Comparison of the results obtained for the Kandalaksha Bay region (*above*) and the Baltic-Ladoga region (*below*): *on the left* is the distribution of seismic energy flow in J/year; *on the right* is the distribution of deformations. Other symbols correspond to Fig. 1, 2

Заключение

Результаты выполненных исследований с использованием ГНСС технологий и анализа сейсмичности позволяют оценить современную тектоническую активность российской части Фенноскандии и особенности ее проявления в первое двадцатилетие текущего века.

Продолжается сводообразное поднятие Балтийского щита со скоростью до 10.4 мм/год. В пределах российской территории скорость поднятия достигает 6 мм/год, что подтверждается уменьшением значений ускорения силы тяжести по гравиметрическим измерениям.

Горизонтальные смещения пунктов ГНСС, происходящие в северо-восточном направлении со средней скоростью от 19.9 мм/год на севере до 23.9 мм/год на юге, отражают общий характер движения Евразии по модели ITRF. Местные внутриплитовые горизонтальные перемещения на юго-востоке рассматриваемого региона достигают 5.8 мм/год относительно принятого за неподвижный пункт на севере.

Использованная методика анализа деформирования земной коры выявила наличие чередующихся зон растяжения и сжатия со значениями деформаций от $(-0.8) \cdot 10^{-8}$ до $1.6 \cdot 10^{-8}$ в год.

Проявление сейсмичности в пределах рассматриваемой территории неоднородно – выделяются области, приуроченные как к зонам, переходным от растяжения к сжатию, так и к зонам растяжения. На западе выделяется область меридиональной направленности со среднегодовыми изменениями потока сейсмической энергии P_E , достигающими значений 10^{10} Дж/год, приуроченная к зоне растяжения с деформациями до $0.6 \cdot 10^{-8}$ в год. Балтийско-Ладожская область сейсмической активности с $P_E \sim 10^6$ Дж/год, вытянутая с юго-запада на северо-восток, приурочена к участку со сменой сжатия–растяжения и маркирует зону перехода от свода к платформе.

Предлагаемое сопоставление скоростей перемещений, деформаций и сейсмичности определяет количественные характеристики современной геодинамики исследуемого региона для конкретного временного интервала.

Литература

- Галаганов О., Горшков В., Гусева Т., Кузнецов Ю., Розенберг Н., Передерин В., Щербакова Н. Парадокс отличий в вертикальных движениях по данным определений разными методами // Геодезія, картографія і аерофотознімання. Львів, 2009. Випуск 71. С.241–248.
- Галаганов О.Н., Горшков В.Л., Гусева Т.В., Розенберг Н.К., Передерин В.П., Щербакова Н.В. Современные движения земной коры Ладого-Онежского региона по данным спутниковых и наземных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 2. С.130–136. http://d33.infospace.ru/d33_conf/2011.html
- Горшков В.Л., Мохнаткин А.В., Смирнов С.С., Петров С.Д., Трофимов Д.А., Щербакова Н.В. Исследование геодинамики зоны сопряжения Балтийского щита с Восточно-Европейской платформой по данным ГНСС наблюдений // Вестник СПбГУ. Сер. 1. Математика. Механика. Астрономия. 2015. Т. 2 (60), № 3. С.463–472.
- Гусева Т.В., Крупенникова И.С., Мокрова А.Н., Передерин В.П. Геодезический спутниковый мониторинг и сейсмическая активность северо-запада России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 5. С.133–141.
- Прилепин М.Т., Мишин А.В., Кабан М.К., Баранова С.М. GPS изучение геодинамики Балтийского щита // Физика Земли. 2002. № 9. С.49–58.

- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В.* Влияние электромагнитных полей на скорость сеймотектонических деформаций, релаксация упругих напряжений, их активный мониторинг // *Физика Земли*. 2011. № 10. С.82–96.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В.* Геодинамические последствия триггерного воздействия электромагнитных полей и взрывов на сейсмичность // *Инженерная физика*. 2019. № 8. С.50–57.
- Юдахин Ф.Н., Шукин Ю.К., Макаров В.И.* Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 299 с.
- Kaftan V., Mäkinen J.* Fennoscandian uplift study as an example of Russian-Finnish cooperation in Arctic geodesy (Advisory) // *Russian Journal of Earth Sciences*. September 2019. Т. 19. № 5. С.1–8. DOI: 10.2205/2019ES000675

Сведения об авторах

ГУСЕВА Тамара Вениаминовна – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-24-96. E-mail: guseva@ifz.ru

КРУПЕННИКОВА Ирина Сергеевна – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-24-96. E-mail: ik@ifz.ru

МОКРОВА Анна Николаевна – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-24-96. E-mail: annmok@ifz.ru

ПЕРЕДЕРИН Виктор Петрович – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-88-81. E-mail: vpp@ifz.ru

РОЗЕНБЕРГ Наталия Климентьевна – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-24-96. E-mail: rosenna@ifz.ru

SATELLITE MONITORING AND SEISMIC ACTIVITY OF THE NORTH-WEST OF RUSSIA

T.V. Guseva, I.S. Krupennikova, A.N. Mokra,
V.P. Perederin, N.K. Rozenberg

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Results of GNSS observations (global navigation satellite system GPS/GLONASS) in 2006–2018 in the study the modern intraplate geodynamics of North-West of Russian Federation are analyzed.

In the study of modern movements and deformations of the earth's crust, the data of repeated satellite measurements carried out by the staff of the IFZ RAS in Karelia, Leningrad region, as well as measurements from 20 permanent stations of the International geodynamic network were used. In addition, the data obtained at the new geodynamic polygon located in the Kandalaksha Bay area, where several cycles of repeated measurements have been carried out since its foundation in 2015, are considered.

Repeated GNSS measurements confirmed that dome-shaped lifting, confined to the Baltic shield, continues with a velocity 10.4 mm/year. Within the Russian part of the territory the rate of uplifting reaches 6 mm/year. Horizontal displacements of GNSS stations in the ITRF have a North-East direction and average velocities (according to approximated data for 2006–2018) from 19.9 mm/year in the north to 23.9 mm/year in the

south. The deformation field of the region is non-homogeneous, the extended compression and stretching zones replace each other, with values from $(-0.8) \cdot 10^{-8}$ to $1.6 \cdot 10^{-8}$.

According to the earthquake catalogue for the period 2000–2018, the seismic energy flux (P_E) released as a result of local tectonic earthquakes was calculated. The distribution of velocities of seismic energy flux within the considered area is rather heterogeneous. In the western part, there is a region of meridional orientation, characterized by seismic activity up to 10^{10} J/year, confined to the extension zone with deformations up to $0.6 \cdot 10^{-8}$ per year. In the Ladoga-Onega region, the seismic activity zone with P_E about 10^6 J/year is extended from the South-West to the North-East and confined to the transition area of compression and extension.

The comparison of the displacements velocities, deformations and seismicity determines the quantitative characteristics of the modern geodynamics of the studied region.

Keywords: GNSS, satellite measurements, seismicity, movements, deformations, monitoring, Baltic shield, seismic energy flux.

References

- Galaganov O., Gorshkov V., Guseva T., Kusnetsov Yu., Rozenberg N., Perederin V., Shcherbakova N., The paradox of differences in the vertical movements according to the definitions by different methods, *Geodezia, kartografiya i aerofotozнимannya* (Geodesy, Mapping and Aero surveying), Lviv, 2009, vol. 71, pp. 241-248, ISSN 0130-1039
- Galaganov O.N., Gorshkov V.L., Guseva T.V., Rozenberg N.K., Perederin V.P., Shcherbakova N.V., Modern movements of the earth's crust of the Ladoga-Onega region according to satellite and ground measurements, in *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (Modern problems of remote sensing of the Earth from Space), 2011, vol. 8, no. 2, pp. 130-136, http://d33.infospace.ru/d33_conf/2011.html
- Gorshkov V.L., Mokhnatkin A.V., Smirnov S.S., Petrov S.D., Trofimov D.A., Shcherbakova N.V., Study of geodynamics of the interface zone of the Baltic shield with the East European platform based on GNSS observations, *Vestnik SPbGU* (St. Petersburg State University Bulletin), 2015, vol. 2 (60), is.1, pp. 463-472.
- Guseva T.V., Krupennikova I.S., Mokra A.N., Perederin V.P., Geodetic satellite monitoring and seismic activity, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (Modern problems of remote sensing of the Earth from Space), 2016, no. 5, pp. 133-141.
- Kaftan V., Mäkinen J., Fennoscandian uplift study as an example of Russian-Finnish cooperation in Arctic geodesy (Advisory), *Russian Journal of Earth Sciences*, September 2019, vol. 19, no. 5, pp. 1-8, DOI: 10.2205/2019ES000675
- Prilepin M.T., Mishin A.V., Kaban M.K., Baranova S.M., The Study of geodynamics of Baltic Shield, *Fizika Zemli* (Izvestia, Physics of the Solid Earth), 2002, no. 9, pp. 49-58.
- Tarasov N.T., Tarasova N.V., Effect of electromagnetic fields on the speed of seismotectonic deformations, relaxation of elastic stresses, their active monitoring, *Fizika Zemli* (Izvestia, Physics of the Solid Earth), 2011, no. 10, pp. 82-96.
- Tarasov N.T., Tarasova N.V., Geodynamic consequences of the trigger effect of electromagnetic fields and explosions on seismicity, *Inzhenernaya fizika* (Engineering physics), 2019, no. 8, pp. 50-57.
- Yudakhin F.N., Shchukin Yu.K., Makarov V.I., *Glubinnoye stroyeniye i sovremennyye geodinamicheskiye protsessy v litosfere Vostochno-Yevropeyskoy platformy* (Deep structure and modern geodynamic processes in the lithosphere of the East European platform), Yekaterinburg: UrB RAS, 2003.