Новые данные по геодинамике Кандалакшского залива на основе спутниковых наблюдений

Крупенникова И. С., Мокрова А. Н., Розенберг Н. К., Передерин В. П., Передерин Ф. В., Мокров Д. К., Гусева Т. В.
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, ik@ifz.ru, annmok@ifz.r, rosenna@ifz.ru, vpp@ifz.ru, crash@ifz.ru, noov222@ifz.ru, guseva@ifz.ru

Аннотация. Работа посвящена продолжению изучения современной геодинамики северо-запада России и прилегающих территорий на основе данных наблюдений ГНСС на сети пунктов, заложенных в 2015 г. для исследования современных движений Кандалакшского грабена. Целью данной работы было определение скоростей современных движений земной коры и внутриплитовых деформаций за 2015–2025 гг., и сопоставление скоростей современного деформационного поля с потоком сейсмической энергии в зоне Кандалакшского грабена. За исследуемый период скорости вертикальных движений составили 5 мм/год на юго-западе со снижением до 2.68 мм/год на северо-востоке. В целом, вертикальные движения в окрестностях Кандалакшского залива согласуются с движениями периферии сводового поднятия Балтийского щита. На общем невозмущенном деформационном фоне Балтийского щита наблюдаются чередующиеся зоны сжатия – растяжения со значениями деформаций от $-5\cdot10^{-8}$ до $7\cdot10^{-8}$, приуроченные к юго-западному побережью Кандалакшского залива. Распределение потока сейсмической энергии при сопоставлении с деформационным полем по большей части приходится на область растяжения. За 2000–2023 гг. произошло 80 сейсмических событий, четыре из которых имеют магнитуду $M_s > 3$.Эпицентр самого сильного землетрясения 2001 г. расположен в зоне перехода от сжатия к растяжению.

Ключевые слова: Балтийский щит, вертикальные движения, деформационное поле, сейсмический поток, сейсмичность.

New data on the geodynamics of the Kandalaksha Gulf based on satellite observations

Krupennikova I. S., Mokrova A. N., Rozenberg N. K., Perederin V. P., Perederin F. V., Mokrov D. K., Guseva T. V.
Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, ik@ifz.ru, annmok@ifz.r, rosenna@ifz.ru, vpp@ifz.ru, crash@ifz.ru, noov222@ifz.ru, guseva@ifz.ru

Abstract. This work continues the study of the recent geodynamics of northwestern Russia and adjacent territories using GNSS observations from a network of stations established in 2015 to study recent movements of the Kandalaksha graben. The aim of this study was to determine the velocities of recent crustal movements and intraplate deformations for 2015–2025 and to correlate the velocities of the recent deformation field with the seismic energy flux in the Kandalaksha graben zone. Over the study period, vertical movement rates amounted to 5 mm/yr in the southwest, decreasing to 2.68 mm/yr in the northeast. Overall, vertical movements in the vicinity of Kandalaksha Gulf are consistent with movements along the periphery of the Baltic Shield dome. Against the general undisturbed deformation background of the Baltic Shield, alternating compression and extension zones with strain values ranging from $-5\cdot10^{-8}$ to $7\cdot10^{-8}$ are observed, confined to the southwestern coast of Kandalaksha Gulf. The distribution of seismic energy flux in correlation with the deformation field, is primarily concentrated in the extension zone. In 2000–2023, 80 seismic events occurred, four of which had a magnitude of Ms >3. The epicenter of the strongest earthquake of 2001 was located in the transition zone from compression to extension.

Keywords: Baltic Shield, vertical movements, deformation field, seismic flow, seismicity.

Введение

Работа посвящена продолжению исследования современных движений Фенноскандии и прилегающих территорий, начатого ИФЗ РАН совместно с СПбГУ, и Пулковской астрономической об-

серваторией еще в начале 1990-х годов. Основным инструментом исследований стал активно развивающийся метод спутниковых геодезических измерений координат с помощью ГНСС (GPS, а позже, с развитием отечественной спутниковой системы позиционирования, и ГЛОНАСС). Были оборудованы пункты для спутниковых геодезических измерений с целью изучения геодинамики Балтийского щита – древнейшей части Восточно-Европейской платформы, которая испытывает значительные деформации, связанные как с постледниковым поднятием, так и с внутриплитными процессами (Прилепин и др., 2002; Галаганов и др., 2009; Короновский, 2012). Данное исследование охватывает территории Ленинградской и Мурманской областей, а также Республики Карелия. Кроме того, в расчетах используются данные измерений с пунктов международной глобальной сети IGS, покрывающей большую часть Фенноскандинавского сводового поднятия, расположенных как на территории России, так и в ближайших странах Европы, преимущественно в скандинавских. Активное развитие в последние годы российской фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) значительно увеличивает покрытие российской территории равномерной сетью пунктов. Использование ее наравне с пунктами IGS значительно повышает детальность при изучении геодинамики региона. Пункты, на которых проводятся регулярные спутниковые наблюдения ИФЗ РАН в важных для изучения геодинамики районах, расположены таким образом, чтобы заполнить пробелы в недостаточно еще плотной сети пунктов постоянных наблюдений.

В рамках данного исследования в 2015 г. был заложен новый геодинамический полигон для изучения современных движений Кандалакшского грабена – структуры, ограниченной с двух сторон сбросами, которая характеризуется повышенной трещиноватостью земной коры. Свидетельством современной активности ее геологических процессов являются сейсмические события, фиксирующиеся в настоящее время (http://eqru.gsras.ru).

Цель данной работы состоит в определении горизонтальных и вертикальных движений по данным спутниковых измерений координат за период с 2015 по 2025 гг. и выявлении пространственных закономерностей распределения деформаций и их связи с сейсмичностью в зоне Кандалакшского грабена.

Методика измерений и обработки данных

В 2015 г. была проведена закладка пунктов Кандалакшского геодинамического полигона и первый цикл спутниковых наблюдений. На тот момент было организовано девять пунктов: четыре – на территории Беломорской биологической станции МГУ им. Н. А. Перцова (ББС МГУ), две на метеостанциях «Кандалакша» и «Умба» и еще три – в окрестностях населенных пунктов Чупа, Нильмогуба и Пояконда. Выбор мест для закладки пунктов был обусловлен их расположением в ключевых геодинамических зонах, включая борта грабена и прилегающие стабильные блоки. Также немаловажным критерием для выбора места закладки пунктов являлось наличие плотных коренных пород и достаточно открытого небосклона над ним. Наблюдения на пунктах, расположенных на территории ББС МГУ, регулярно проводились до 2018 г., после чего последовал длительный перерыв.

В 2025 г. проведен седьмой цикл спутниковых наблюдений для четырех пунктов геодинамической сети Кандалакшского залива, а также возобновлены наблюдения на двух пунктах ББС МГУ. Данные с одного из них вошли в это исследование. Карта расположения пунктов наблюдений представлена на рис. 1.

Антенны на пунктах устанавливались с помощью принудительного центрирования на металлическом креплении с резьбой (рис. 2 в) и на штативах с помощью оптических центриров (рис. 2 а). Такая методика установки обеспечивает высокую точность позиционирования и минимизирует ошибки, связанные с нестабильностью установки оборудования. Высота антенн измерялась наклонно от центра марки до нижней грани отсекателя антенны или вертикально от центра марки до основания крепления антенны, затем при камеральной обработке приводилась к вертикальному расстоянию до фазового центра антенны.

Рис. 1. Расположение пунктов наблюдения 2025 г. геодинамической сети Кандалакшского залива

Fig. 1. Location of observation stations of the Kandalaksha Gulf geodynamic network in 2025

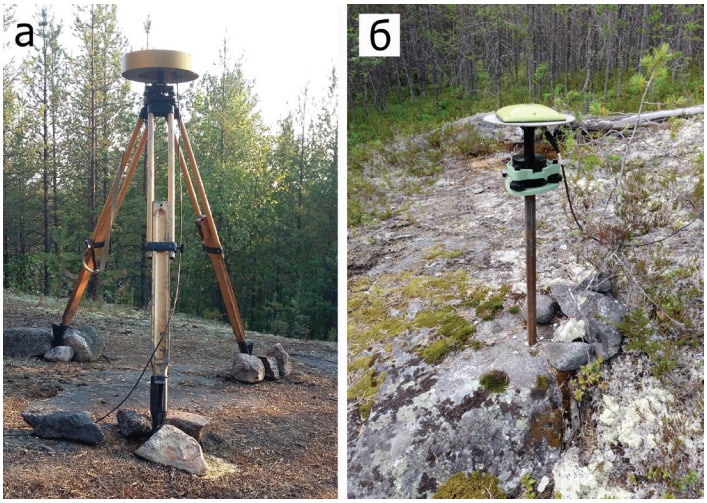

Рис. 2. Спутниковые антенны на пунктах геодинамической сети Кандалакшского залива: а) RingAnt G3T на штативе, б) MarAnt+ на металлическом резьбовом креплении

Fig. 2. Satellite antennas at the stations of the Kandalaksha Gulf geodynamic network: a) RingAnt G3T on a tripod, b) MarAnt+ on a metal threaded mount

Повторные измерения ГНСС (GPS и ГЛОНАСС) на пунктах Кандалакшской геодинамической сети проводятся в соответствии с отработанной практикой для региональных геодинамических сетей России (Антонович, 2005; Гусева, 2020), с периодичностью 1–2 года, в одни и те же летние месяцы для исключения влияния сезонного движения реперов. Одновременное наблюдение на всех пунктах позволяет минимизировать влияние внешних факторов, таких как ионосферные возмущения и тропосферные задержки, на результаты измерений.

Продолжительность наблюдения составляет от 3 до 5 суток. Проведенное исследование ошибок определения координат в зависимости от продолжительности наблюдений (Галаганов, 2014) показало, что такая длительность сеансов является оптимальной для измерений в статическом режиме, поскольку дает возможность определить плановые координаты пунктов с точностью до 0.5 мм и вертикальную составляющую координат в пределах первых мм. Более низкая точность определения вертикальных компонент связана с такими аспектами, как например: чувствительность к атмосферным задержкам, многопутным искажениям сигнала, геометрией созвездия спутников и т. д. (Антонович, 2005).

Камеральная обработка данных полевых измерений с целью получения геоцентрических координат пунктов в системе WGS-84 и геодезических координат в системе ITRF проводится в программном комплексе Bernese. В качестве опорных используются четыре ближайшие к исследуемому району и наиболее стабильные пункты международной геодинамической сети IGS, на многих из которых наблюдения проводятся непрерывно на протяжении порядка 20 лет. Также в анализе в качестве контрольных используются 10–15 пунктов IGS, расположенных на территории Фенноскандии (Швеции, Норвегии и Финляндии). В дальнейшем, для вычисления скоростей смещения пунктов и построения карт распределения площадных деформаций используются скорости пунктов IGS Фенноскандии, опубликованные на сайтах SOPAC (http://sopac-csrc.ucsd.edu) и EUREF (https://epncb.oma.be/).

На рис. 3 приведены графики изменения координат (E, N) пунктов Кандалакшского залива, начиная с 2015 г. Изменение координат данных пунктов описывается линейной регрессией. Коэффициент линейной корреляции близок к 1, дисперсия составляет 0.4 мм/год, что указывает на верность выбора линейной регрессионной модели на данном временном интервале.

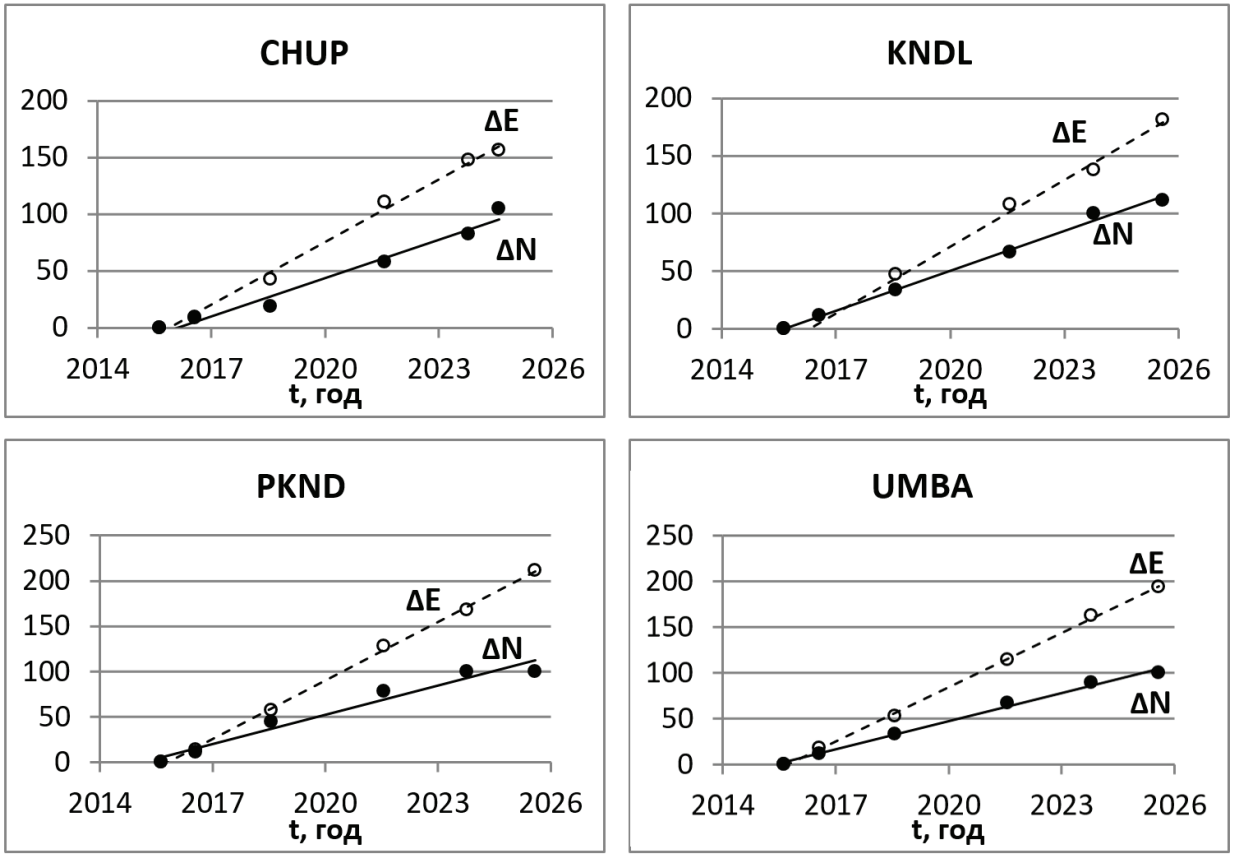

Рис. 3. Графики временного хода плановых координат некоторых пунктов геодинамической сети Кандалакшского залива

Fig. 3. Graphs of the time series of the plane coordinates of some stations of the Kandalaksha Gulf geodynamic network

Для высотной составляющей эти изменения не всегда имеют линейный характер, в среднем значения дисперсии находятся в пределах 1.3 мм/год**.** По результатам линейной аппроксимации рассчитываются горизонтальные и вертикальные скорости смещения пунктов.

Каждый следующий цикл спутниковых наблюдений продлевает ряд вычисленных координат для пунктов геодинамической сети и позволяет уточнить величины скоростей их смещения. Так, дисперсия для временного хода с четырьмя эпохами измерений (Гусева и др., 2022) для плановых координат в среднем составляла 0.6 мм, для высотных достигала 2.4 мм.

Скорости смещений пунктов ГНСС за 2015–2025 гг.

В результате описанной выше схемы обработки данных получены координаты пунктов и скорости их горизонтальных и вертикальных смещений за временной интервал 2015–2025 гг.

Из табл. 1, содержащей скорости горизонтальных и вертикальных смещений пунктов следует, что вертикальные движения в окрестностях Кандалакшского залива уменьшаются с юга-юго-запада на северо-восток с 5.35 до 2.68 мм/год. Это согласуется с движениями периферии сводового поднятия Балтийского щита (рис. 4 а), скорости движения которого получены на предыдущих этапах работ из наблюдений ГНСС на пунктах ИФЗ РАН в Карелии и Мурманской области, а также с привлечением данных с ближайших пунктов международной сети IGS и российской сети ФАГС (Гусева и др., 2020). Для общей картины движения Евразийской плиты в исследуемом районе характерны значения скоростей порядка 22.5 мм/год в направлении на северо-восток (рис. 4 б).

Для перехода в локальную систему отсчета в пределах сводового поднятия Балтийского щита с исключением влияния общего движения Евразии был выполнен перерасчет горизонтальных движений относительно пункта «Тромсё» (TRO1), находящегося на северо-западной окраине Фенноскандии. Анализ временных рядов изменений координат во времени для данного пункта междуна-

родной геодинамической сети IGS (https://geoapp20.ucsd.edu/?mission=ESESES) демонстрирует его стабильность на протяжении всего времени наблюдений с 1998 г. Также он служит одним из базовых пунктов для вычисления координат при обработке полевых данных измерений.

Таблица 1. Скорости смещения пунктов в системе отсчета ITRF2014 и в региональной системе отсчета относительно пункта TRO1 (VE, VN, VH – восточная, северная и вертикальная координаты, VS – полный вектор планового смещения, Аз – азимут планового смещения)

Table 1. Displacement velocities of points in the ITRF2014 reference system and in the regional reference system relative to the TRO1 point (VE, VN, VH – eastern, northern and vertical coordinates, VS – full vector of the plane displacement, Az – azimuth of the plane displacement)

Пункт	ITRF 2014					относительно TRO1			
	V_E, мм/год	V_N, мм/год	V_H, мм/год	V_S, мм/год	Аз, град	V_E, мм/год	V_N, мм/год	V_S, мм/год	Аз, град
CHUP	18.43	11.13	5.35	21.53	59	3.64	–3.94	5.36	137
KNDL	19.72	11.72	4.23	22.94	59	4.93	–3.35	5.96	124
PKND	21.3	10.75	4.23	23.86	63	6.51	–4.32	7.81	124
UMBA	19.01	10.61	2.68	21.77	61	4.22	–4.46	6.14	137
NILM	18.91	13.28	3.84	23.11	55	4.12	–1.79	4.49	113
BBS2	20.68	9.22	2.96	22.65	66	5.89	–5.85	8.30	135

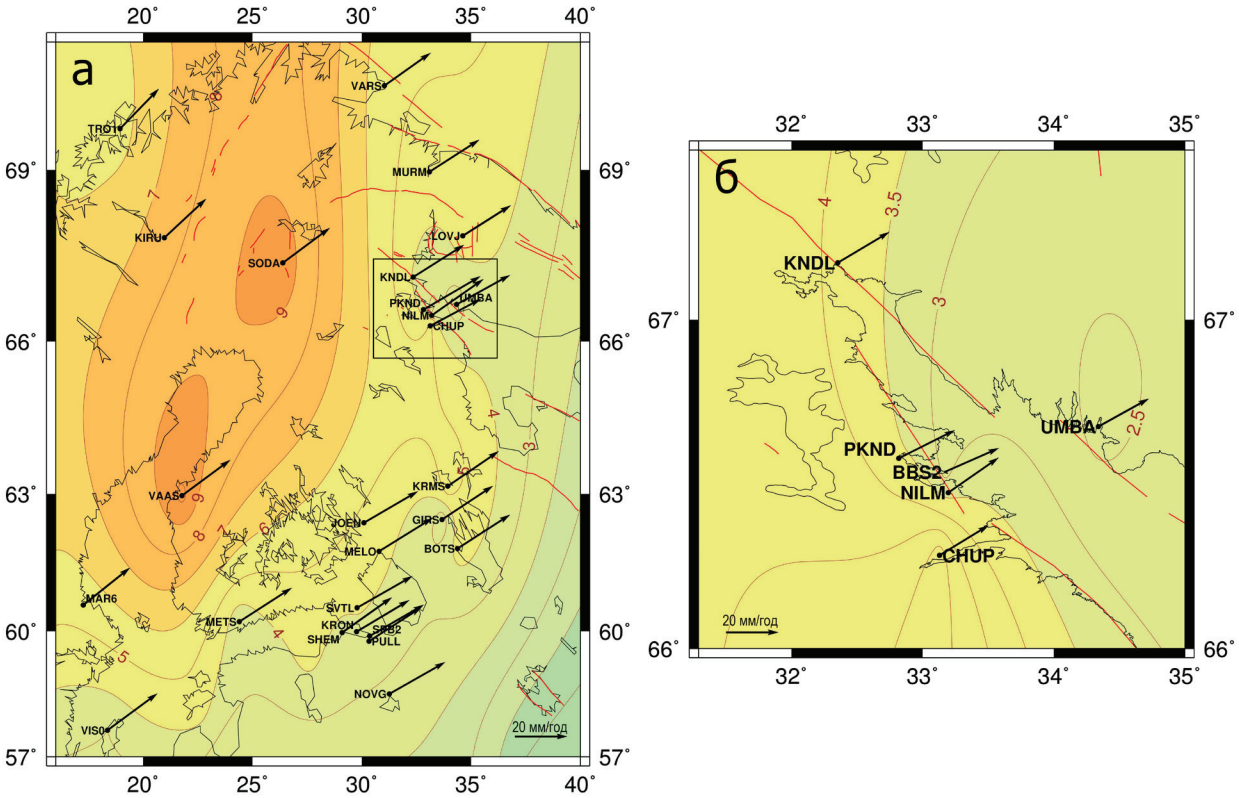

Рис. 4. Карта скоростей вертикальных движений (изолинии) и векторов горизонтальных движений (стрелки) в международной земной системе отсчета ITRF: а – для Балтийского щита, б – для района Кандалакшского залива в более крупном масштабе (на общей карте выделен серой рамкой) за 2015–2025 гг. Красные линии – крупные разрывные нарушения

Fig. 4. Map of vertical movement velocities (isolines) and horizontal movement vectors (arrows) in the International Terrestrial Reference Frame (ITRF): a – for the Baltic Shield, b – for the Kandalaksha Gulf region on a larger scale (highlighted with a gray frame on the general map) for 2015–2025. Red lines show major faults

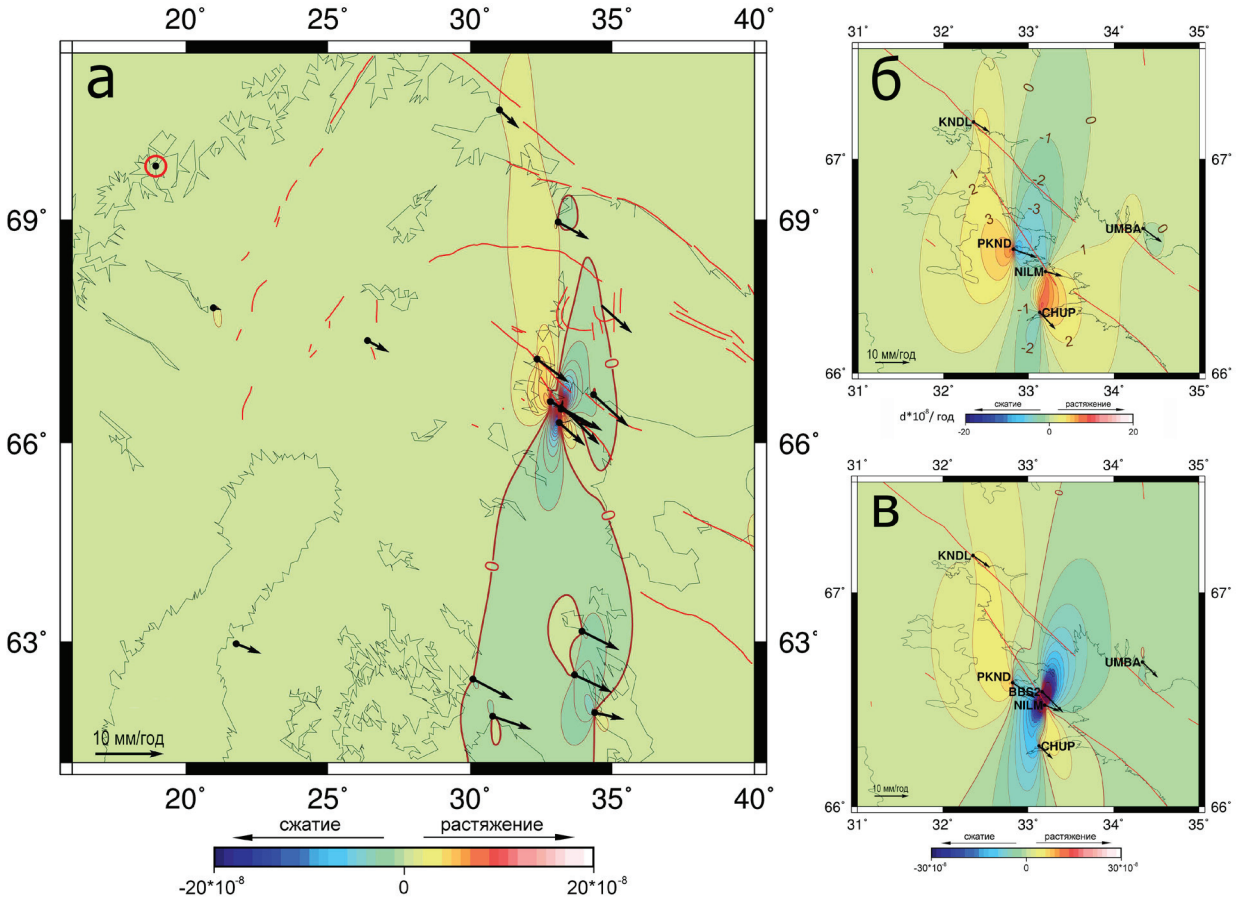

Рис. 5 – Распределение скоростей площадных деформаций (изолинии) и векторов скоростей (стрелки) горизонтальных смещений относительно пункта TRO1 (отмечен красным кружком на карте (а) за 2015–2025 гг.: а – для территории Балтийского щита. Район Кандалакшского залива (на общей карте отмечен серой рамкой); б – распределение деформационного поля без пункта BBS2; в – с включением пункта BBS2

Fig. 5 – Distribution of areal deformation rates (isolines) and velocity vectors (arrows) of horizontal displacements relative to the TRO1 station (red circle on the map (a) for 2015–2025: a – for the Baltic Shield territory. The Kandalaksha Gulf area (marked with a gray frame on the general map); b – distribution of the deformation field without the BBS2 station; c – with the BBS2 station

В результате расчетов для всех задействованных пунктов, получены значения скоростей горизонтальных смещений в локальной системе, составляющие в среднем 6.4 мм/год, при преимущественно юго-восточном направлении движения (рис. 5 а).

Скорости площадных деформаций рассчитываются по конечно-разностной схеме (Shen, 2015) как первый инвариант плоского тензора деформаций, на основе плановых координат пунктов и скоростей их изменения (рис. 5). Общий деформационный фон Балтийского щита достаточно однороден. На его фоне выделяется узкая зона сжатия, достаточно протяженная, простирающаяся в направлении с юга на север, через Кандалакшский залив. Здесь же берет начало узкая протяженная зона растяжения, уходящая на север параллельно полосе сжатия вдоль западной границы Кольского полуострова (рис. 5, а). Эти вытянутые чередующиеся зоны со значениями деформаций от $-5\cdot10^{-8}$ до $7\cdot10^{-8}$ приурочены к юго-западному побережью Кандалакшского залива (рис. 5 б).

Добавление в расчет деформаций данных о скорости смещения пункта BBS2, на котором после длительного перерыва в 2025 г. проводились спутниковые наблюдения, приводит к появлению на карте области с аномальными значениями сжатия (рис. 5 в). Данный результат требует уточнения, так как на пункте проведено всего 4 цикла спутниковых наблюдений. Учитывая активность области расположения данного пункта, необходимо продолжать наблюдения для получения временного ряда достаточной продолжительности, на основе которого можно будет определять скорости

смещения BBS2 с высокой точностью. Также необходимо увеличивать количество наблюдаемых пунктов для большей представительности геодинамической сети и детализации деформационного поля региона.

Анализ сейсмичности Кандалакшского залива

Проведен анализ сейсмической активности Кандалакшского залива за 2000–2023 гг. на основе данных каталога землетрясений ФИЦ ЕГС РАН, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекса непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (http://eqru.gsras.ru). За указанный временной интервал на исследуемой территории произошло 80 сейсмических событий, четыре из которых имеют магнитуду $M_s > 3$. Землетрясение с максимальной магнитудой $M_s = 3.6$ зафиксировано 22.10.2001 г. в районе оз. Нигрозеро, вблизи юго-западного побережья Кандалакшского залива (рис. 6 а).

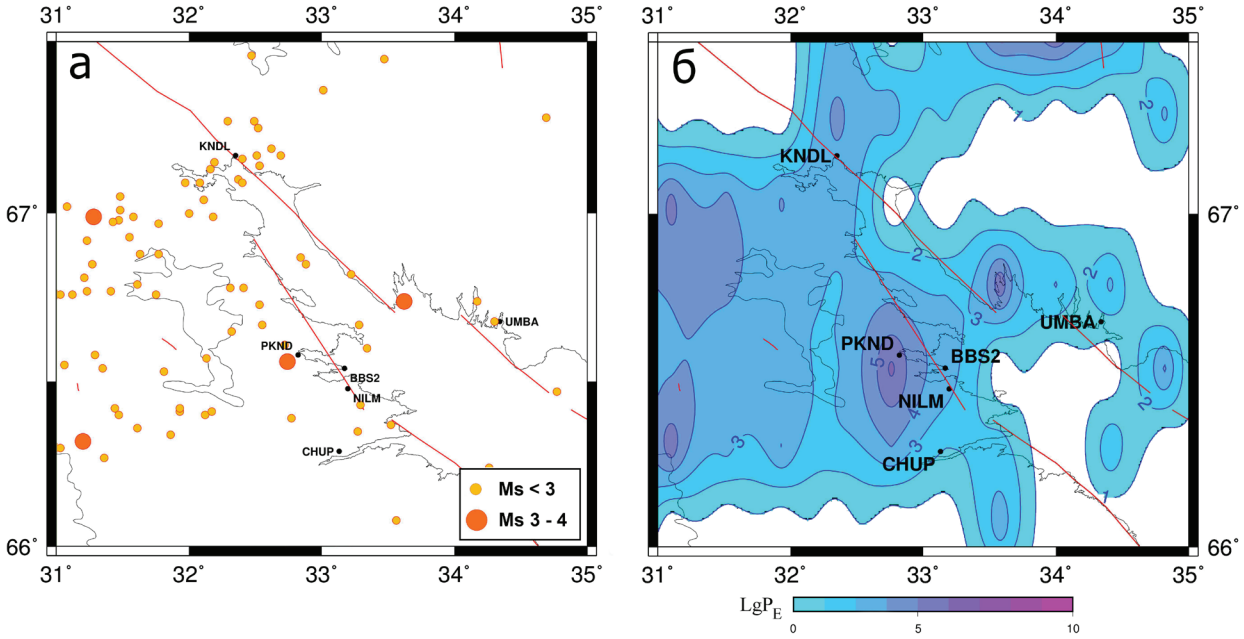

Рис. 6. Распределение эпицентров сейсмических событий (а) и потока сейсмической энергии (б) за 2000–2023 гг.

Fig. 6. Distribution of epicenters of seismic events (a) and seismic energy flow (b) for 2000–2023

Энергия всех вошедших в каталог землетрясений рассчитывалась из соотношения Гутенберга–Рихтера (Рихтер, 1961; Пузырев, 1997) по формуле (Касахара, 1985):

$$\mathrm{Lg}\ E = 1.5 \cdot M_s + 4.8. \quad (1)$$

Для расчета потока сейсмической энергии P_E (Дж/год) на единицу площади территория была разбита сеткой на ячейки с равной площадью (500 км^2). При данном методе величина ячейки выбирается исходя из площади исследуемого района. Для каждой ячейки проведено суммирование сейсмической энергии всех землетрясений за выбранный временной интервал. Полученные суммарные значения присвоены центру каждой ячейки.

Распределение сейсмического потока неравномерно, выделяется область повышенной сейсмической активности в западной части исследуемого района и вдоль бортов Кандалакшского грабена (рис. 6 а, б). Максимальное значение потока P_E – 10^7 Дж/(год · км^2) приурочено к его юго-западному борту.

Распределение потока сейсмической энергии при сопоставлении с деформационным полем по большей части приходится на область растяжения. В областях сжатия фиксируется меньшее ко-

личество землетрясений (из 80 событий на сжатие приходится 11 эпицентров). Эпицентр самого сильного землетрясения 2001 г. расположен в зоне перехода от сжатия к растяжению (рис. 7).

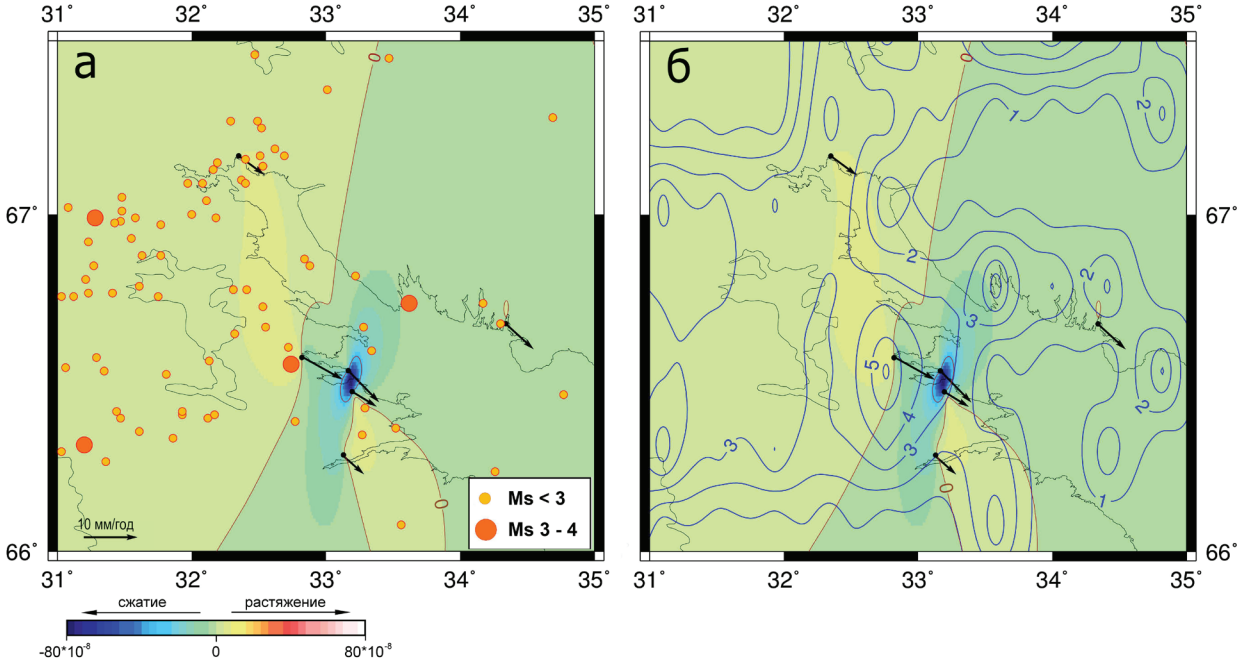

Рис. 7. Сопоставление деформационного поля с распределением эпицентров землетрясений (а) и потоком сейсмической энергии (б)

Fig. 7. Correlation of the deformation field with the distribution of earthquake epicenters (a) and the seismic energy flow (b)

Заключение

В рамках проведенного исследования выполнена комплексная оценка современной геодинамики Кандалакшского грабена и прилегающих территорий на основе данных ГНСС за 2015–2025 гг. и данных сейсмологического каталога ФИЦ ЕГС РАН за 2000–2023 гг. Работа продолжила многолетние наблюдения ИФЗ РАН за развитием деформационных процессов на северо-западе России.

Скорости вертикальных движений, уменьшаясь с юго-запада на северо-восток, согласуются с данными о движении периферии сводового поднятия Балтийского щита, полученными на предыдущих этапах исследования.

Горизонтальные смещения пунктов в координатной системе ITRF, отражающие движение Евразийской тектонической плиты, имеют северо-восточное направление со средней скоростью 22.5 мм/год. Внутрирегиональные горизонтальные смещения происходят преимущественно в направлении на юго-восток со средней скоростью 6.4 мм/год.

Анализ деформационного поля региона позволил выделить протяженные зоны сжатия и растяжения со значениями деформаций от -5×10^{-8} до 7×10^{-8}, проходящие параллельно друг другу через юго-западное побережье Кандалакшского залива. Сейсмическая активность региона, выраженная потоком сейсмической энергии (P_E) сконцентрирована в западной части района и вдоль бортов Кандалакшского грабена, с максимальным значением 10^7 Дж/(год·км^2) на юго-западном борту.

Сопоставление деформационного поля и сейсмичности показало, что область повышенной сейсмичности в основном совпадает с зоной растяжения, а эпицентр сильнейшего землетрясения 2001 г. расположен в зоне перехода от сжатия к растяжению.

Полученные данные подтверждают, что Кандалакшский грабен является активной геодинамической структурой с выраженной пространственной дифференциацией движений и деформаций.

Вертикальные и горизонтальные смещения отражают как региональные процессы (движение Евразийской плиты, постледниковое поднятие), так и локальные особенности (структура грабена).

Выявленные зоны сжатия и растяжения коррелируют с распределением выделившийся в результате землетрясений сейсмической энергии, что указывает на связь между современными деформациями земной коры и сейсмичностью региона. Дальнейшие исследования позволят уточнить модели взаимосвязи между деформациями и сейсмическими событиями, что в свою очередь позволит использовать данные ГНСС для оценки сейсмического потенциала территорий.

Таким образом, проведенное исследование существенно дополняет понимание современной геодинамики северо-запада России. Продолжение наблюдений с использованием новейших спутниковых технологий позволит уточнить полученные результаты, а дальнейшее расширение геодинамической сети в регионе поможет детализировать карту деформационного поля и расширить территорию с известными скоростями движения с миллиметровой точностью.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН.

Литература

1. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 2 Монография / К. М. Антонович; ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». М. Изд-во: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. 360 с.
2. Галаганов О. Н., Горшков В. Л., Гусева Т. В., Передерин В. П., Розенберг Н. К., Щербакова Н. В. Исследование вертикальных движений в районе Ладожского и Онежского озер по GPS-данным // Тр. Института прикладной астрономии РАН. 2009. № 20. С. 261–265.
3. Галаганов О. Н., Гусева Т. В., Крупенникова И. С., Передерин В. П. Сравнение данных ГЛОНАСС и GPS измерений на геодинамических полигонах // Мониторинг. Наука и технологии. 2014. № 1 (18). Махачкала. Изд-во: Общество с ограниченной ответств. Центр сопряженного мониторинга окружающей среды и природных ресурсов. С. 6–15.
4. Гусева Т. В., Крупенникова И. С., Мокрова А. Н., Передерин В. П., Розенберг Н. К. Спутниковый мониторинг и сейсмическая активность северо-запада России // Геофизические исследования. 2020. Т. 21, № 1. С. 24–32. http://dx.doi.org/10.21455/gr2020.1-2.
5. Гусева Т. В., Крупенникова И. С., Мокрова А. Н., Розенберг Н. К. Современные движения и деформации в районе Кандалакшского залива по данным ГНСС мониторинга // Тр. Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. Апатиты: ГИ КНЦ РАН. 2022. № 19. С. 74–79. http://dx.doi.org/10.31241/fns.2022.19.014.
6. Касахара К. Механика землетрясений. М. Изд-во: Мир, 1985. С. 25.
7. Короновский Н. В. Общая геология: учебник. 3-е изд. Москва: КДУ, 2012. 552 с.
8. Прилепин М. Т., Мишин А. В., Кабан М. К., Баранова С. М. GPS изучение геодинамики Балтийского щита // Физика земли. 2002. № 9. С. 49–58.
9. Пузырев Н. Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию. Новосибирск. Изд-во: СО РАН, НИЦ ОИГГМ. 1997. 301 с.
10. Рихтер К. Ф. Инструментальная шкала для магнитуд землетрясений // Сб. «Слабые землетрясения». М. Изд-во: Иностранная литература. 1961. Переводная версия. С. 13–44.
11. Shen Z., Wang M., Zeng Y., Wang F. Optimal Interpolation of Spatially Discretized Geodetic Data // Bulletin of the Seismological Society of America. 2015. V. 105(4). P. 2117–2127. https://doi.org/10.1785/0120140247.