

## Исследование современных движений земной коры Кольского полуострова и Карелии по данным спутниковых наблюдений

*Д. А. Халимончик<sup>1\*</sup>, А. А. Силаева<sup>1</sup>, А. А. Панжин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Новосибирский техникум геодезии и картографии СГУГиТ, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

<sup>2</sup> Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург,  
Российская Федерация

\* e-mail: danya02232002@yandex.ru

**Аннотация.** Вопросы безопасности эксплуатации объектов недропользования являются одной из важнейших задач инженерной геологии. Благодаря развитию технологий спутниковой геодезии, появилась возможность получать данные о современных движениях земной коры на разных масштабных уровнях с субсантиметровой точностью. Статья посвящена вопросам деформационного мониторинга Кольского полуострова и Карелии. На этой территории множество промышленных предприятий. Добыча полезных ископаемых оказывает на земную кору техногенное воздействие, которое необходимо отслеживать. Целью исследования является изучение горизонтальных движений земной коры рассматриваемой территории. Благодаря постоянным наблюдениям на различных спутниковых станциях были получены их скорости движения. Обработка результатов спутниковых наблюдений проводилась в программе Elcut. В результате обработки методом конечных элементов были получены векторы смещений, тензоры деформаций и цветовая схема горизонтальных смещений.

**Ключевые слова:** техногенез, деформационный мониторинг, земная кора, спутниковые наблюдения, региональные геодинамические полигоны

## Study of modern movements of the Earth's crust The Kola Peninsula and Karelia according to satellite observations

*D. A. Khalimonchik<sup>1\*</sup>, A. A. Silaeva<sup>1</sup>, A. A. Panzhin<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Mining, Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

\* e-mail: danya02232002@yandex.ru

**Abstract.** Issues of safety of operation of subsoil use objects are one of the most important tasks of engineering geology. Thanks to the development of satellite geodesy technologies, it became possible to obtain data on the current movements of the earth's crust at different scale levels with sub-centimeter accuracy. The article is devoted to the issues of deformation monitoring of the Kola Peninsula and Karelia. There are many industrial enterprises in this area. Mining has a man-made impact on the earth's crust, which must be monitored. The purpose of the study is to study the horizontal movements of the earth's crust of the territory under consideration. Thanks to constant observations at various satellite stations, their speeds of movement were obtained. The results of satellite observations were processed using the Elcut program. As a result of processing by the finite element method, displacement vectors, strain tensors and a color scheme of horizontal displacements were obtained.

**Keywords:** technogenesis, deformation monitoring, earth's crust, satellite observations, regional geodynamic polygons

## *Введение*

В современном мире с каждым годом растет уровень потребления природных ресурсов. В России значительный уровень дохода государства составляет добыча полезных ископаемых. Уровень темпов освоения минерально-сырьевой базы страны не снижается даже несмотря на интенсивное развитие других отраслей промышленности.

Известно, что добыча полезных ископаемых оказывает прямое техногенное воздействие на природную среду. Она влияет на почвенный слой, подземные и поверхностные воды, рельеф и т. д. [1]. Движения земной коры, обусловленные техногенным воздействием, могут привести к необратимым последствиям не только для окружающей среды, но и для жизни и здоровья человека. Поэтому отслеживание таких процессов является важной составляющей техносферной безопасности [2].

Для контроля негативных последствий, оказываемых на природную среду на территории добычи полезных ископаемых, проводится комплекс наблюдений, который включает в себя геодезические, геологические и другие виды измерений, по результатам которого строят модели для оценки характера современных движений земной коры (СДЗК) и вносят рекомендации по дальнейшему использованию изучаемой территории.

В настоящее время для мониторинга СДЗК используют спутниковые методы геодезии. Такие работы ведутся в рамках международной геодинимической службы IGS (International GNSS Service), действующей под эгидой Международной геодезической ассоциации IAG (International Association of Geodesy) [3].

Выбор мест размещения станций IGS определяется Центральным Бюро JPL (г. Пасадена, Калифорния, США). Местоположение постоянно действующих станций соответствует принятой гипотезе тектоники плит. Пункты расположены таким образом, чтобы четко фиксировать движения как крупных, так и мелких литосферных плит.

При этом основным источником информации о геодинимических движениях являются не абсолютные значения величин векторов сдвижений пунктов GNSS и реперов наблюдательных станций, а их скорости, приведенные к годовому циклу. Это необходимо для приведения итогов к общей пространственно-временной базе [4].

## *Методы и материалы*

Определение пространственных координат сетей межрегиональных и местных постоянно работающих станций производится двумя методами. Для глобальных сетей применяется метод Precise Point Positioning (PPP), а для локальных сетей – относительный. Также эти методы можно комбинировать между собой – относительным методом выполняется расчет и уравнивание геодезической сети, а методом PPP – привязка локальных и местных геодезических построений к международной сети IGS [4].

Отметим, что по наблюдениям на пунктах IGS можно выполнить только укрупненную оценку деформаций, так как расстояние между ними зачастую составляет 1000-2000 км. Поэтому на территории крупных промышленных предприятий необходимо сгущать деформационные сети, чтобы конкретизировать картину СДЗК. Для этого в сети включают пункты корпоративных сетей, к примеру, пункты ПВО предприятий и близлежащих населенных пунктов. Такие пункты представляют собой деформационные сети – геодинимические полигоны (ГДП).

Величина погрешностей определения координат пунктов ГДП спутниковыми методами зависит от его размера и длительности наблюдений. Так же учитывается наличие или отсутствие переотраженного сигнала, состояния ионосферы в момент наблюдений и др. Так как скорости СДЗК рассчитываются по определенным ранее координатам, то они будут иметь те же погрешности. Стоит сказать, что чем дольше проводится мониторинг, тем меньше погрешность.

Чтобы визуализировать результаты измерений, нужно создать векторное поле горизонтальных движений и тензоров деформаций сети. Узловыми элементами этой сети являются пункты ГДП, на которых определены пространственные координаты и скорости движений пунктов.

Данная работа посвящена изучению СДЗК Кольского полуострова и Карелии, которые расположены на северо-западе России. На севере и востоке рассматриваемая территория омывается двумя морями – Баренцевым и Белым. Здесь производят добычу и обогащение некоторых видов минерального сырья, в том числе железной руды, никеля, меди и других видов цветных металлов.

В геологическом отношении Кольский полуостров и Карелия лежат в пределах Балтийского щита. Несмотря на то, что он относится к древнейшей части Евразии, природа тут довольно молода из-за того, что раньше регион был оледенелым, поэтому вся изучаемая территория была подвержена активной экзорации. Движение тектонических структур совпадало с движением ледника [5, 6].

Изучение земной коры Кольского полуострова ведется с 1966 года [6], когда была заложена Кольская сверхглубокая скважина. Исследование показало, что здесь очень тонкий слой земной коры (приблизительно 40 км).

Как известно, в земной коре выделяют три основных слоя – осадочный, гранитный и базальтовый. На Кольском полуострове в некоторых местах совсем нет осадочного слоя, поверхность представлена только горной породой. Она представляет собой шесть комплексов. Все они были образованы последовательно с течением времени, самый молодой представляет собой рыхлые пески и глину. В целом породы полуострова являются одними из самых древних на Земле

В течении нескольких тысяч лет рельеф рассматриваемой территории то опускался в результате оледенения, то поднимался в межледниковые эпохи. Сегодня полуостров продолжает подниматься, при этом в центре меньше, чем на границах [7–9]. В среднем скорости вертикальных движений составляют около 5 мм/год [10].

Что касается горизонтальных движений земной коры, то здесь большое влияние оказывает множество промышленных предприятий. Здесь добывают и перерабатывают цветные металлы, а также различные минералы.

Изучением движений земной коры Кольского полуострова и Карелии занимается несколько научно-исследовательских институтов, в том числе Уральский институт горного дела.

### ***Результаты***

На рассматриваемой территории находятся несколько пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), а также несколько пунктов IGS. На этих пунктах ведутся постоянные высокоточные спутниковые наблюдения. Кроме этого, на территории крупных промышленных предприятий расположены корпоративные пункты, на которых проводится комплекс спутниковых измерений. Все эти пункты образуют собой региональный геодинимический полигон. Схема пунктов представлена на рис. 1. На схеме красным отмечены пункты международных сетей, синим – пункты федеральных сетей, а желтым – пункты корпоративных сетей.

По результатам спутниковых наблюдений, представленных на схеме пунктов, были получены скорости их движения. В среднем они составили 20 мм/год. Далее эти данные были обработаны отдельно по Кольскому полуострову и Карелии в программе Elcut.

На рис. 2–3 показаны результаты обработки сети Кольского полуострова в программе Elcut, а именно векторы горизонтальных смещений, тензоры деформаций и их цветовая схема.

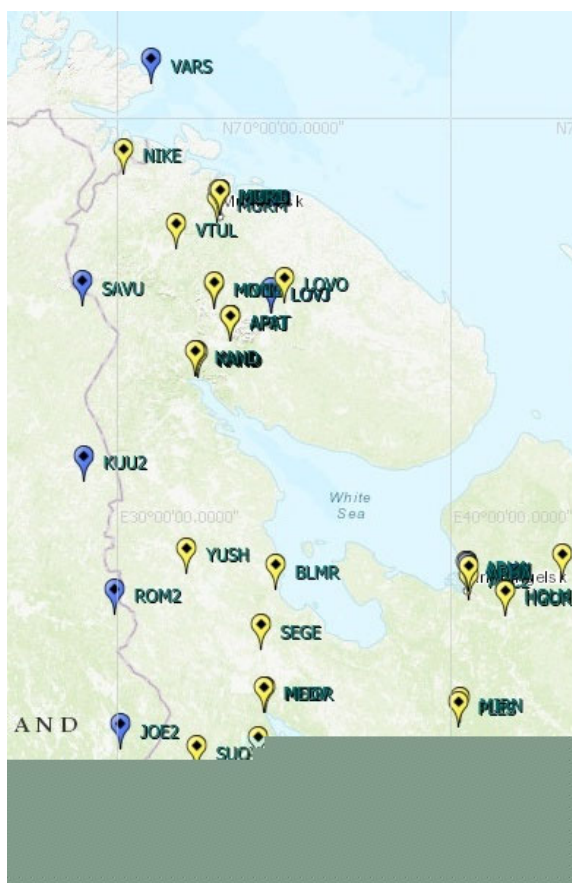


Рис. 1. Схема пунктов

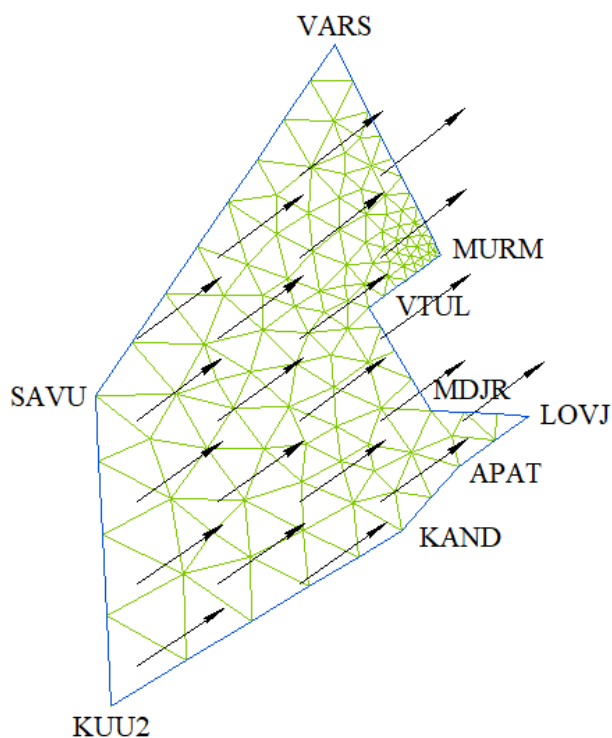


Рис. 2. Векторы смещений  
(Кольский полуостров)

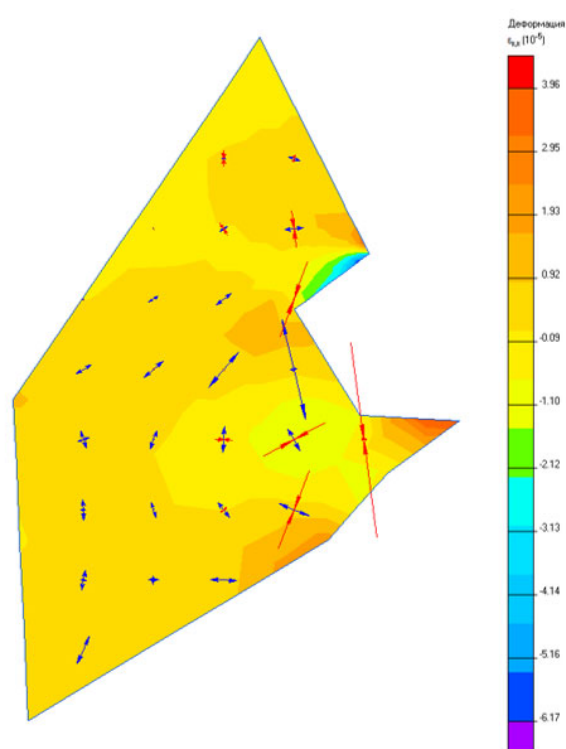


Рис. 3. Тензоры деформаций,  
цветовая схема  
(Кольский полуостров)

В целом территория Кольского полуострова равномерно смещается на северо-восток. На цветовой схеме видно, что в местах где расположены промышленные предприятия, смещения более сильные.

На рис. 4 показаны векторы смещений пунктов, расположенных на территории Карелии, а на рис. 5 – тензоры деформаций и цветовая схема горизонтальных смещений этих пунктов.

Стоит отметить, что визуализация смещений точек земной поверхности [11] по результатам цикловых геодезических и гравиметрических измерений позволяет более обоснованно выделять активные геологические структуры, блоки, тектонические разломы. Это знание необходимо для прогнозирования мест возможных сейсмических событий и принятия соответствующих профилактических мер для обеспечения безопасности населения, промышленных объектов и др. [12].

Проведя анализ результатов можно прийти к следующим выводам:

- рассматриваемая территория в целом равномерно смещается на северо-восток;
- максимальные смещения проявляются на территории крупных промышленных предприятий, таких как Северсталь, Новатэк, Норникель, Русал, Фосагро и др.;
- отслеживание горизонтальных смещений пунктов деформационной сети, представленной на исследуемой территории, позволяет оценить картину смещений в целом;

– для более конкретного мониторинга необходимо проводить исследования на территории объектов недропользования, создавая тем самым техногенные геодинамические полигоны. Они позволяют надежно и оперативно контролировать изменения состояния приповерхностных геологических структур и размещенных на них сооружений, а также изучать развитие этих явлений во времени. Контроль должен базироваться на комплексном подходе, включающем геодезические, геофизические, гидрогеологические и другие методы исследований [13].

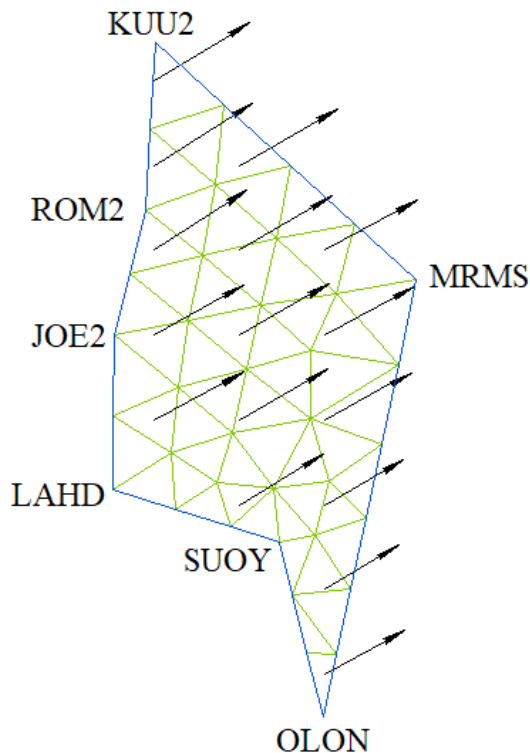


Рис. 4. Векторы смещений (Карелия)

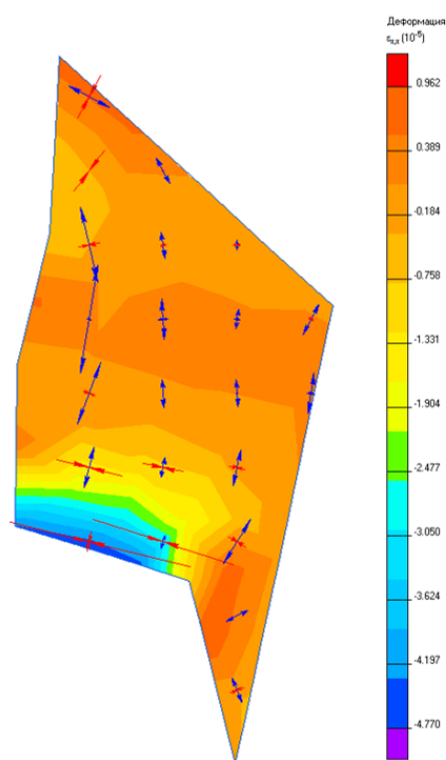


Рис. 5. Тензоры деформаций, цветовая схема (Карелия)

### Заключение

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод, что развитие спутниковых методов определения координат позволило использовать их для решения различных задач геодинамики в комплексе с традиционными геодезическими методами.

Отметим, что это возможно лишь для некоторых участков Земли, так как постоянно действующие станции IGS расположены не равномерно. Территория России слабо обеспечена такими пунктами. Поэтому для отслеживания СДЗК здесь используются пункты ФАГС, пункты межрегиональных корпоративных сетей, а также локальные геодинамические полигоны, создаваемые на территории крупных промышленных предприятий. Определение смещений таких пунктов с учетом вариаций фазовых центров антенн и тропосферной поправки позволяет построить модели СДЗК любого региона страны и исследовать деформации земной коры с высокой точностью и детальностью.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панфилов Е.И. Оценка воздействий на недра и возможных последствий при разработке месторождений полезных ископаемых // Журнал "Горная Промышленность". - № 2 (78) – 2008. – С. 26–32.
2. Вовк И. Г., Татаренко В. И. Техногенная геодинамика и безопасность технических систем // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2008. – № 2.
3. Панжин А.А. Пространственно-временной геодинамический мониторинг на объектах недропользования // Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 39–43.
4. Панжин А.А., Макаров А.Б. Современные методы геодинамического мониторинга при недропользовании // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2014. – № 4 (1372). – С. 16–22.
5. Баранская А.В., Мазнев С.В., Романенко Ф.А., Шилова О.С. Новейшие движения земной коры Карельского берега Белого моря // Арктика и Антарктика. – 2019. – № 2. – С. 16-33.
6. Горьковец В. Я., Раевская М. Б. Геологические особенности кристаллического фундамента в приграничной полосе Финляндии и Республики Карелия // Труды Карельского научного центра РАН. – 2009. – С. 24–38.
7. Горьковец, В. Я., Белашев, Б. З. Геологические структуры Зеленого пояса Фенноскандии и их геоэкологическая роль // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. - 2014. – № 6. – С. 4-16.
8. Кузнецов, О. Л. Болотные экосистемы карельской части Зеленого пояса Фенноскандии // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2014. – № 6. – С. 77–88.
9. Введенская, А.Я. Современная геодинамика, битуминозность и газоносность Кольского п-ова / А.Я. Введенская, А.К. Дертев // Нефтегазовая геология: теория и практика, Мурманск, 26-28 апреля 2007 г.: 1 часть / Мурманск, 2007. – Ч. 1. – С. 25–39.
10. Николаева С. Б., Евзеров В. Я. К геодинамике Кольского региона в позднем плейстоцене и голоцене: обзор и результаты исследований // ВЕСТНИК ВГУ. СЕРИЯ: ГЕОЛОГИЯ. – 2018. – № 1. – С. 5–14.
11. Мазуров Б.Т. Компьютерная визуализация полей смещений и деформаций // Геодезия и картография. – 2007. – № 4. – С. 51–55.
12. Панжин А.А., Мазуров Б.Т., Силаева А.А. Визуализация характеристик деформационных полей по данным геодезических наблюдений // Проблемы недропользования. – 2015. – № 3 (6). – С. 13–18.
13. Силаева А.А. К вопросу оптимизации геодезических наблюдений на техногенных геодинамических полигонах // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – №2. – С. 37–41.

© Д. А. Халимончик, А. А. Силаева, А. А. Панжин, 2022