

Современные методы, методики и технические средства мониторинга движений земной коры

Р.В. Шевчук^{1,2}✉, А.И. Маневич^{1,2}, Д.Ж. Акматов^{1,2}, Д.И. Урманов^{1,2}, А.И. Шакиров^{1,2}

¹ Геофизический центр РАН, г. Москва, Российская Федерация

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

✉ shevchuk.002@mail.ru

Резюме: В статье приведен обзор имеющихся методов и методик для проведения геодинамического мониторинга, таких как: высокоточное повторное геометрическое нивелирование, высокоточные линейно-угловые построения, высокоточные дальномерные измерения, лазерное сканирование, глобальные навигационные спутниковые системы, лазерные интерферометры и деформографы, радарная спутниковая интерферометрия. Также описан опыт применения данных технологий в различных физико-географических районах. Продемонстрированы инструменты, применяемые при измерениях, которые обеспечивают максимально достижимую точность методов в современных условиях. Составлена сводная характеристика инструментальных методов измерения параметров современных движений земной коры. На основании проведенного сравнительного анализа современных методов, методик и технических средств для производства геодинамического мониторинга из перечисленных выше методов были выбраны наиболее эффективные. К таким методам относятся методы высокоточного геометрического нивелирования I и II класса, также глобальные навигационные спутниковые системы. Комплексное использование этих методов позволит получить достоверные данные о геодинамической обстановке исследуемого района.

Ключевые слова: мониторинг, методы, методика, измерения, движения земной коры, деформация, смещения

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России.

Для цитирования: Шевчук Р.В., Маневич А.И., Акматов Д.Ж., Урманов Д.И., Шакиров А.И. Современные методы, методики и технические средства мониторинга движений земной коры. *Горная промышленность*. 2022;(5):99–104. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-99-104>

Modern methods, techniques and technical means of monitoring movements of the Earth crust

R.V. Shevchuk^{1,2}✉, A.I. Manevich^{1,2}, D. Zh. Akmatov^{1,2}, D.I. Urmanov^{1,2}, A.I. Shakirov^{1,2}

¹ Geophysical center RAS, Moscow, Russian Federation

² National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

✉ shevchuk.002@mail.ru

Abstract: This article gives an overview of available methods and techniques for geodynamic monitoring, such as the high-precision geometric re-leveling, high-precision linear-angular constructions, high-precision distance measurements, laser scanning, global navigation satellite systems, laser interferometers and strainmeters, radar satellite interferometry. The experience of applying these technologies in different physiographic regions is also described. The tools used in measurements, which provide the maximum achievable accuracy of methods in modern conditions, are demonstrated. A table is made with the summary characteristic of instrumental methods to measure the parameters of current movements of the Earth crust. On the basis of the performed comparative analysis of modern methods, techniques and technical means for execution of geodynamic monitoring, the most effective ones have been chosen from the methods listed above. Such methods include methods of high-precision geometric levelling of I and II classes, as well as the global navigation satellite systems. Complex use of these methods will allow to obtain reliable data about the geodynamic situation of the investigated area.

Keywords: monitoring, methods, technique, measurements, crustal movements, deformation, displacements

Acknowledgements: This work was conducted in the framework of budgetary funding of the Geophysical Center of RAS, adopted by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Shevchuk R.V., Manevich A.I., Akmatov D. Zh., Urmanov D.I., Shakirov A.I. Modern methods, techniques and technical means of monitoring movements of the Earth crust. *Russian Mining Industry*. 2022;(5):99–104. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-99-104>

Введение

Основой геодинамического мониторинга является изучение современных горизонтальных и вертикальных движений. Геодинамический мониторинг – система постоянных и/или непрерывных наблюдений, анализа и прогноза современного геодинамического состояния геологической среды, проводимая в рамках заданного регламента в пределах рассматриваемой природно-технической системы [1].

Геодинамический мониторинг за современными движениями земной коры (СДЗК) проводится в формате режимных полевых компаний или непрерывных геодезических измерений. Выбор методов, инструментов и методик измерений обуславливается в первую очередь целями и задачами исследований, а именно определением интенсивности геодинамических процессов на данной территории. Методы изучения СДЗК можно разделить на три группы – геодезические методы, геофизические методы и методы дистанционного зондирования Земли.

Геодезические методы.**Высокоточное повторное нивелирование**

Нивелирование – процесс определения разности высот точек земной поверхности или их превышения относительно выбранной точки. Существует три основных метода нивелирования – геометрический (нивелиром и рейками), тригонометрический (угломерными приборами), барометрический (при помощи барометра).

Высокоточное геометрическое нивелирование позволяет получать данные осадок и деформаций зданий и сооружений, осадок и деформаций земной поверхности, подрабатываемой горными работами, а также проводить долговременные наблюдения за вертикальными движениями тектонических структур (к примеру, смещения берегов тектонического разлома, определение процесса поднятия/опускания тектонического блока).

Для геодинамических полигонов согласно инструкции¹ следует использовать I и II класс нивелирования (с пределом периметра нивелирного хода 40 и 20 км соответственно). Нивелирные линии I и II класса должны пересекать предполагаемые линии разломов, разрывов и блоков. Класс нивелирования выбирается в зависимости от степени геодинамической активности района и уровня опасности объекта. Так, для платформенных регионов со слабо-выраженными современными движениями земной коры следует применять I класс нивелирования с ошибкой не более 0,8 мм/км хода и невязкой $3\sqrt{L}$ мм (где L – длина нивелирного хода, км). Для активных районов можно проводить работы II класса нивелирования с ошибкой не более 2 мм/км хода и невязкой $3\sqrt{L}$ мм (где L – длина нивелирного хода, км).

Наблюдения могут выполняться как оптическим, так и электронным нивелиром. Электронные нивелиры кроме механизма автоматической фиксации отсчетов по рейкам имеют процессор, дающий возможность производить расчет превышений и высот отметок. Благодаря этому практически полностью исключаются ошибки наблюдателя и снижаются затраты на измерения.

Высокоточные линейно-угловые построения

Линейно-угловые построения – это процесс измерений углов и сторон треугольников в геодезической сети. В линейно-угловых сетях измеряются все или часть углов и сторон. По сравнению с триангуляцией и трилатерацией

сеть, в которой удачно сочетаются угловые и линейные измерения, в меньшей степени зависит от геометрии фигуры; существенно уменьшается зависимость между продольным и поперечным сдвигами; обеспечивается жесткий контроль угловых и линейных измерений. Линейно-угловая сеть позволяет вычислить координаты пунктов точнее, чем в сетях триангуляции и трилатерации.

Линейно-угловые измерения применяются для определения горизонтальных смещений сооружений и мониторинга СДЗК.

Высокоточные дальномерные измерения

Принцип действия заключается в измерении времени, за которое посланный дальномером сигнал проходит расстояние до объекта и обратно. При этом скорость распространения сигнала (скорость звука или света) считается известной. В исследовании [2] представлен обзор светодальномерных наблюдений на Камчатке за 1984–1995 гг. Наблюдения проводились на специально организованных семи деформационных площадках вместе с нивелированием I класса.

В работах [3; 4] представлены результаты анализа многолетних светодальномерных наблюдений на одном из камчатских и на Ашхабадском геодинамических полигонах. Был проведен тензометрический анализ результатов наблюдений на Камчатской обсерватории «Мишенная» для трёх отражателей за период наблюдений более 20 лет, а для светодальномерных линий на Ашхабадском полигоне период наблюдений составил около 40 лет. Анализ наблюдений показал прецизионную точность наблюдений на уровне деформаций $5 \cdot 10^{-8}$ при длинах линий до 30 км, что позволяет выявлять деформации на уровне приливных [4].

Лазерное сканирование

Лазерное сканирование с помощью активных оптических дальномеров (LIDAR), использующих явление поглощения и рассеяния света в оптически прозрачных средах, позволяет получить двумерную или трёхмерную картину пространства [5]. В результате лазерного сканирования формируется изображение в виде облака точек. Далее из них создаются цифровые модели объекта – поверхности, интенсивности света и другие. По методу сканирования выделяют воздушное лазерное сканирование (ВЛС), мобильное лазерное сканирование (МЛС) и наземное лазерное сканирование (НЛС).

Лазерное сканирование активно используется в строительстве, горнодобывающей, нефтегазодобывающей промышленности, архитектуре и других областях. Определение смещений и деформаций объекта происходит в результате повторных съёмок, посредством сравнения координат объекта с первой эпохой измерений. Для мониторинга смещений и деформаций используют НЛС и ВЛС [6], где приводится математическая модель пространственно-временной деформации, получаемой в результате наблюдений лазерным сканированием. Авторы предлагают деформационную модель, основанную на получаемом облаке точек. Более представительный обзор и описание технологии на русском языке можно найти в диссертации Хиллера Бернда [7].

Глобальные навигационные спутниковые системы

Мониторинг СДЗК методами ГНСС позволяет получить приращение координат геодезического пункта за интервал измерений. Принцип работы построен на получении

¹ ГКИНП 03-010-03 «Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов».

ГНСС-приемником сигналов от нескольких спутников (минимум – четырёх) и вычисления точного положения антенны ГНСС приемника относительно их. Подробно вопросы технологии получения и обработки ГНСС данных для мониторинга СДЗК на геодинамических полигонах приведены в работах [8–11].

Одна из первых известных работ использования ГНСС в задачах геодинамики принадлежит известному исследователю из Стенфордского университета, где приводятся примеры временных рядов смещений для сильных землетрясений за период 1996–1997 гг. [12]. В [13] рассмотрены особенности мониторинга смещений на всех масштабных уровнях – тектонические движения в масштабе мировых литосферных плит, региональные современные движения земной коры в масштабе одной или нескольких литосферных плит, связанные с вулканической деятельностью, сейсмической активностью или активными движениями на крупных тектонических разломах и т.д.

Прецизионные лазерные интерферометры и деформографы

Лазерные интерферометры-деформографы (ЛИД) – это уникальные, высокоточные обсерваторские установки, предназначенные для измерения деформации базовых линий (30–100 м). ЛИД предназначены для регистрации слабых литосферных деформаций, в том числе – приливных суточных деформаций, слабых деформаций околоразломных зон, для изучения корреляции слабых деформаций с сейсмологическими данными, изучения глобальных геодинамических процессов, связанных с вращением Земли, изучения собственных колебаний Земли. Измерения ЛИД основаны на явлении интерференции – когда из блока лазерного излучателя подается пучок электромагнитного излучения, который с помощью специального устройства разделяется на несколько когерентных пучков. Каждый из пучков проходит разные оптические пути и направляется в регистратор, который фиксирует интерференционную картину [14]. Обзор опыта использования лазерных интерферометров-деформографов для задач геодинамических исследований приводится в работе [15].

Один из примеров таких установок – это лазерный интерферометр в подземной геофизической обсерватории ГАИШ МГУ, расположенной в Кабардино-Балкарии, в Баксанском ущелье. Интерферометр смонтирован в штольне горы Андырчи. Длина его базы составляет 75 м. Более подробно устройство Баксанского лазерного интерферометра описано в работах [16; 17]. В результате работы Баксанского ЛИД было получено множество фундаментальных результатов о современных движениях земной коры. К примеру, в результате наблюдений приливных деформаций было выявлено существование в структуре вулкана Эльбрус близповерхностной магматической камеры [18; 19]. В исследовании [20] по рядам наблюдений деформационных станций Баксан и Протвино (Среднерусская равнина) и данным о неравномерности вращения Земли был описан характер взаимной связи деформационных процессов в литосфере и глобальной геодинамики Земли на коротких интервалах времени. Авторами была выявлена сильная корреляционная связь между деформационными полями двух деформационных станций и вариациями вращения Земли [20]. ЛИД также используется для анализа собственных деформаций Земли, возбужденных сильными землетрясениями [20].

В геофизической обсерватории «Мокса» (Йенский уни-

верситет, Германия) также проводятся высокоточные деформационные измерения с использованием ЛИД [21; 22]. Система высокоточных деформационных измерений на обсерватории Мокса включает в себя две перпендикулярных друг другу ЛИД с длиной базы 26 м и дополнительный ЛИД, соединяющий их по диагонали [21] (т.е. получается правильный треугольник с катетами, ориентированными на север и восток). Результаты измерений также используются для выявления приливных деформаций и слабых деформаций сильных землетрясений [21].

Радарная спутниковая интерферометрия

Радарная спутниковая интерферометрия, радары синтезированной апертурой (РСА-интерферометрия), или в англоязычной литературе – Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), является эффективным методом построения цифровых моделей рельефа и мониторинга состояния поверхности Земли с разрешением и точностью, недостижимыми при применении наземных методов измерений. Метод РСА-интерферометрии использует пару снимков одного участка земной поверхности, сделанных с двух близких, локально параллельных орбит одного и того же спутника. Получаемую после обработки интерферометрическую картину можно проинтерпретировать как поле смещений земной поверхности в направлении на спутник за интервал времени между парой снимков. Более подробно методика обработки и анализ полученных данных приведены в работе [23].

РСА-интерферометрия активно используется для мониторинга СДЗК, так как в случае применения этого метода нет необходимости производить натурные измерения на территории изучаемого геодинамического полигона. Существующие миссии спутников, к примеру, Sentinel-1A и Sentinel-1B, позволяют получать данные на бесплатной основе и без задержки информации по времени. Однако, следует отметить, что для получения картины смещений методом РСА-интерферометрии в районе исследований должно быть достаточное количество так называемых «устойчивых отражателей» (природных или искусственных) [24; 25], смещения которых и оцениваются парой радарных снимков. В этом отношении методы РСА-интерферометрии не слишком хорошо работают для территорий с большим количеством растительности (деревья, тайга), то есть там, где устойчивых отражателей в виде площадок, скальных выходов и т.д. нет и установить их нет возможности.

В работе [25] приводится обзор опыта использования РСА-интерферометрии для задач анализа смещений в районах землетрясений с магнитудой $M > 4$. В работе приводится сравнительный анализ технологий обработки радарных данных методами дифференциальной интерферометрии (DInSAR) и методом разделения частот (Split-bandwidth Interferometry – SBI). Также приводятся основные методы поправок на ошибки в спутниковых данных (ионосферная и тропосферная корректировки). В работе [26] на примере землетрясения Кумамото (16 апреля 2016 г., Япония) приводится детальная методология обработки радарных данных для получения поля смещений для районов сильных землетрясений.

В табл. 1 приведена сводная характеристика инструментальных методов измерения параметров СДЗК. Можно видеть, что все методы очень требовательны к инфраструктуре геодинамического полигона и не все они применимы для некоторых масштабов. К примеру, лазер-

Таблица 1
Методы измерений современных движений земной коры

Table 1
Methods to measure current movements of the Earth's crust

Метод	Результат измерения и обработки	Точность измерений	Метод получения данных
Высокоточное повторное нивелирование	Положение точки по высоте, изменение высоты (вертикальные смещения, оседания)	Не более 0,8–2 мм на километр нивелирного хода	Полевая съемка
Высокоточные линейно-угловые построения	Положение точки в плане, углы между базами измерений, приращение плановых координат (горизонтальные смещения) и приращение углов между базами наблюдений	0,5”–2” при измерении углов, до 1–3 мм при определении координат	Полевая съемка
Высокоточные дальномерные измерения	Длина базы наблюдения, изменение длины базы наблюдения	Не более 10-7–10-8 м/м	Полевая съемка, автоматический режим
Лазерное сканирование	Облако точек, цифровая модель поверхности, изменение поверхности объекта	ВЛС: 80–100 мм МЛС: 50–80 мм НЛС: 3–15 мм	Полевая съемка, автоматический режим
Глобальные навигационные спутниковые системы	Положение точки в плане и по высоте, приращение плановых и высотных координат	Плановые смещения, точность до 1–3 мм, смещения по высоте до 3–5 мм	Полевая съемка, автоматический режим
Прецизионные лазерные интерферометры и деформографы	Длина базы наблюдения, изменение длины базы наблюдения	Измерение деформаций с точностью до 10-12 м/м	Обсерваторские наблюдения, автоматический режим
Радарная спутниковая интерферометрия	Цифровая модель поверхности, смещения пикселя (от 25 до 900 м ²) в направлении на спутник	Получение смещений с точностью до 1–3 мм	Без выезда в поле, автоматический режим

ное сканирование невозможно применить для масштабов 30–100 км, в рамках которого полигон еще является локальным. А такие установки, как лазерные интерферометры-деформографы, устанавливаются в единственном количестве на специальных геофизических обсерваториях. Светодальномерные и деформографические наблюдения выполняются в обсерваторском режиме, так как приборы чувствительны к окружающей среде. Для геофизических измерений (светодальномерные измерения, наклономерные, деформографические) необходимо организовать постоянную регистрацию измерений прибора и обеспечить долговременные непрерывные ряды наблюдений. Это необходимо для того, чтобы выявить систематические ошибки измерений, связанные с различными метеорологическими факторами [27; 28], и выделить деформации, связанные с геодинамическими процессами. Методы РСА-интерферометрии требуют наличия достаточного количества устой-

чивых отражателей (природных или искусственных), при этом в результате измерений можно получить только компоненту смещения в направлении на спутник.

Выводы

В результате анализа современных методов мониторинга СДЗК можно сделать вывод о том, что на сегодняшний день существует достаточное количество методов, методик и средств измерений для изучения современных движений земной коры с высокой или прецизионной точностью. Наиболее эффективными методами мониторинга СДЗК являются: высокоточное геометрическое нивелирование I и II класса точности (для наблюдений за вертикальными движениями) и глобальные навигационные спутниковые системы (для наблюдений за горизонтальными движениями).

Список литературы

- Кузьмин Ю.О. Геодинамические полигоны в решении фундаментальных проблем геодинамики и перспективы их сопряжения с региональными тектонофизическими исследованиям. В кн.: Ребецкий Ю.Л. (ред.) *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о земле: Материалы докладов пятой всероссийской конференции с международным участием, посвященной столетию М.В. Гзовского, г. Москва, 5–9 окт. 2020 г.* М.: Институт физики Земли РАН; 2020. С. 108–115.
- Миронов И.К., Магуськин В.М. Опыт наблюдений за деформациями земной поверхности на малых площадках в разломных зонах в 1984–1995 гг. на Камчатке. *Вулканология и сейсмология*. 2019;(4):52–68. <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019452-68>
- Кузьмин Ю.О., Фаттахов Е.А. Тензометрический анализ деформаций земной поверхности по результатам длительных светодальномерных наблюдений на Камчатке. *Путь науки*. 2016;2(5):75–78.
- Фаттахов Е.А. Спектрально-временной анализ светодальномерных наблюдений на Камчатском и Ашхабадском геодинамических полигонах. *Вестник СГУТТ*. 2017;22(4):5–17.
- Telling J., Lyda A., Hartzell P., Glennie C. Review of Earth science research using terrestrial laser scanning. *Earth-Science Reviews*. 2017;169:35–68. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.007>
- Harmening C., Neuner H. A spatio-temporal deformation model for laser scanning point clouds. *Journal of Geodesy*. 2020;94(2):26. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01352-0>
- Бернд Х. *Разработка и исследование автоматизированной системы геодезического деформационного мониторинга инженерных сооружений на основе высокоточной цифровой инклинометрии и техеометрии: дисс. ... канд. техн. наук*. М.; 2017. 144 с.
- Кафтан В.И., Докукин П.А. *Геодезические спутниковые измерения, обработка и деформационный анализ*. М.: РУДН; 2017. 272 с.
- Кафтан В.И., Гвишиани А.Д., Морозов В.Н., Татаринев В.Н. Методика и результаты определения движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на Нижне-Канском геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов.

- Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019;16(1):83–94. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94>
10. Красноперов Р.И. Анализ сейсмотектонических движений земной коры по данным наблюдений глобальных навигационных спутниковых систем: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.; 2012. 150 с.
11. Мельников А.Ю. Разработка методики анализа деформационного процесса в сейсмоактивных регионах по данным спутниковых высокоточных координатных определений: дисс. ... канд. техн. наук. М.; 2019. 152 с.
12. Segall P., Davis J.L. GPS applications for geodynamics and earthquake studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1997;25(1):301–336. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.25.1.301>
13. Bock Y., Melgar D. Physical applications of GPS geodesy: a review. *Reports on Progress in Physics*. 2016;79(10):106801. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/79/10/106801>
14. Дубров М.Н., Алешин В.А. Высокоточные лазерные интерферометры в многокомпонентных измерительных системах. *Журнал радиоэлектроники*. 2000;(10):7–13. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct00/4/text.html>
15. Braitenberg C. The deforming and rotating Earth – A review of the 18th International Symposium on Geodynamics and Earth Tide, Trieste 2016. *Geodesy and Geodynamics*. 2018;9(3):187–196. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.03.003>
16. Милуков В.К., Кравчук В.К. Наблюдения спектра деформаций земли лазерным интерферометром-деформографом. *Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 1996;(2):73–78. Режим доступа: <http://vnu.phys.msu.ru/abstract/1996/2/96-2-073/>
17. Milyukov V.K., Klyachko B.S., Myasnikov A.V., Striganov P.S., Yanin A.F., Vlasov A.N. A laser interferometer-deformograph for monitoring the crust movement. *Instrumental and Experimental Techniques*. 2005;48(6):780–795. <https://doi.org/10.1007/s10786-005-0140-9>
18. Милуков В.К. Мониторинг состояния магматических структур вулкана Эльбрус по наблюдениям литосферных деформаций. *Вулканология и сейсмология*. 2006;(1):3–15.
19. Милуков В.К., Копаев А.В., Лагуткина А.В., Миронов А.П., Мясников А.В. Наблюдения приливных деформаций земной коры в Приэльбрусье. *Физика Земли*. 2007;(11):21–29.
20. Милуков В.К., Кравчук В.К., Миронов А.П., Латынина Л.А. Деформационные процессы в литосфере, связанные с неравномерностью вращения Земли. *Физика Земли*. 2011;(3):96–109.
21. Jahr T. Non-tidal tilt and strain signals recorded at the Geodynamic Observatory Moxa, Thuringia/Germany. *Geodesy and Geodynamics*. 2018;9(3):229–236. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.03.015>
22. Jahr T., Kroner C., Lippmann A. Strainmeters at Moxa observatory, Germany. *Journal of Geodynamics*. 2006;41(1-3):205–212. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.08.017>
23. Акматов Д.Ж., Николайчук В.В., Тихонов А.А., Шевчук Р.В. Радарная интерферометрия как дополнение к классическим методам наблюдений за сдвижением земной поверхности. *Горная промышленность*. 2020;(1):144–147. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-144-147>
24. Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И., Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А. Радарная спутниковая интерферометрия: новые технологии спутникового мониторинга областей разработки полезных ископаемых, смещений природных и техногенных объектов. *Наука и технологические разработки*. 2016;95(3):5–11.
25. Boncori M.J.-P. Measuring coseismic deformation with spaceborne synthetic aperture radar: A review. *Frontiers in Earth Science*. 2019;7:16. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00016>
26. He P., Wen Y., Xu C., Chen Y. Complete three-dimensional near-field surface displacements from imaging geodesy techniques applied to the 2016 Kumamoto earthquake. *Remote Sensing of Environment*. 2019;232:111321. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111321>
27. Михайлов В.О., Киселева Е.А., Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П. Оценка полного вектора смещений земной поверхности и техногенных объектов по данным радарной спутниковой интерферометрии для областей разработки месторождений нефти и газа. *Геофизические исследования*. 2012;13(3):5–17.
28. Мясников А.В. О проблеме учета влияния метеорологических факторов на большие прецизионные системы на примере баксанского большебазового лазерного интерферометра. *Сейсмические приборы*. 2019;55(2):27–38. <https://doi.org/10.21455/si2019.2-2>

References

1. Kuzmin Yu.O. Geodynamic polygons in the solution of fundamental problems of geodynamics and prospects of their conjugation with regional tectonophysical studies. In: Rebetsky Yu.L. (ed.) *Tectonophysics and topical issues of the earth sciences: Proceedings of the Fifth All-Russian Conference with international participation, dedicated to the 100th anniversary of M.V. Gzovsky, Moscow, October 5–9, 2020*. Moscow: Institute of Physics of the Earth RAS; 2020, pp. 108–115. (In Russ.)
2. Mironov I.K., Maguskin V.M. Experience of observing deformations of the earth's surface at small sites in rift zones in 1984–1995 in Kamchatka. *Vulkanologia i Seismologia*. 2019;(4):52–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019452-68>
3. Kuzmin Yu.O., Fattakhov E.A. A Tensiometric analysis of the earth surface deformations based on the results of long-term optical distance observations in Kamchatka. *The Way of Science*. 2016;2(5):75–78. (In Russ.)
4. Fattakhov E.A. Spectral-temporal analysis of laser rangefinder observations on the Kamchatsky and Ashgabad geodynamic polygons. *Vestnik of SSUGT*. 2017;22(4):5–17. (In Russ.)
5. Telling J., Lyda A., Hartzell P., Glennie C. Review of Earth science research using terrestrial laser scanning. *Earth-Science Reviews*. 2017;169:35–68. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.007>
6. Harmening C., Neuner H. A spatio-temporal deformation model for laser scanning point clouds. *Journal of Geodesy*. 2020;94(2):26. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01352-0>
7. Bernd H. *Development and research of an automated system of geodetic deformation monitoring of engineering structures based on high-precision digital inclinometry and technometry: Dissertation of Cand. Sci. (Eng.)*. Moscow; 2017. 144 p. (In Russ.)
8. Kaftan V.I., Dokukin P.A. *Geodetic satellite measurements, processing and deformation analysis*. Moscow: Peoples' Friendship University of Russia; 2017. 272 p. (In Russ.)
9. Kaftan V.I., Gvishiani A.D., Morozov V.N., Tatarinov V.N. Methods and results of determination of movements and deformations of the Earth's crust according to GNSS data at the Nizhne-Kansk geodynamic test network in the area of radioactive waste disposa. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019;16(1):83–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94>
10. Krasnoperov R.I. *Analysis of seismotectonic movements of the Earth's crust according to observations of global navigation satellite systems: Dissertation Cand. Sci. (Phys. and Math.)*. Moscow; 2012. 150 p. (In Russ.)
11. Melnikov A.Yu. *Development of Methods of Deformation Process Analysis in Seismically Active Regions According to Satellite High-Accuracy Coordinate Determinations: Dissertation Cand. Sci. (Eng.)*. Moscow; 2019. 152 p. (In Russ.)
12. Segall P., Davis J.L. GPS applications for geodynamics and earthquake studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*.

1997;25(1):301–336. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.25.1.301>

13. Bock Y., Melgar D. Physical applications of GPS geodesy: a review. *Reports on Progress in Physics*. 2016;79(10):106801. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/79/10/106801>
14. Dubrov M.N., Alyoshin V.A. High-precision laser interferometers in multicomponent measuring systems. *Journal of Radio Electronics*. 2000;(10):7–13. (In Russ.) URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct00/4/text.html>
15. Braitenberg C. The deforming and rotating Earth – A review of the 18th International Symposium on Geodynamics and Earth Tide, Trieste 2016. *Geodesy and Geodynamics*. 2018;9(3):187–196. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.03.003>
16. Milyukov V.K., Kravchuk V.K. Observations of the Earth's deformation spectrum by means of a laser interferometer-deformograph. *Moscow University Physics Bulletin*. 1996;(2):60–64.
17. Milyukov V.K., Klyachko B.S., Myasnikov A.V., Striganov P.S., Yanin A.F., Vlasov A.N. A laser interferometer-deformograph for monitoring the crust movement. *Instruments and Experimental Techniques*. 2005;48(6):780–795. <https://doi.org/10.1007/s10786-005-0140-9>
18. Milyukov V.K. Monitoring of magma features on Elbrus volcano based on observations of lithosphere deformation. *Vulkanologia i Sejsmologia*. 2006;(1):3–15. (In Russ.)
19. Milyukov V.K., Kopaev A.V., Lagutkina A.V., Mironov A.P., Myasnikov A.V. Observations of crustal tide strains in the Elbrus area. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2007;43(11):922–930. <https://doi.org/10.1134/S106935130711002X>
20. Milyukov V.K., Kravchuk V.K., Mironov A.P., Latynina L.A. Deformation processes in the lithosphere related to the nonuniformity of the earth's rotation. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2011;47(3):246–258. <https://doi.org/10.1134/S1069351311020042>
21. Jahr T. Non-tidal tilt and strain signals recorded at the Geodynamic Observatory Moxa, Thuringia/Germany. *Geodesy and Geodynamics*. 2018;9(3):229–236. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.03.015>
22. Jahr T., Kroner C., Lippmann A. Strainmeters at Moxa observatory, Germany. *Journal of Geodynamics*. 2006;41(1-3):205–212. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.08.017>
23. Akmatov D.Zh., Nikolaichuk V.V., Tikhonov A.A., Shevchuk R.V. Radar Interferometry as Supplement to Classical Methods to Observe Earth's Surface Displacement. *Russian Mining Industry*. 2020;(1):144-147. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-144-147>
24. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Smol'yaninova E.I., Dmitriev P.N., Golubev V.I., Timoshkina E.P., Khairtdinov S.A. INSAR: New technologies of the satellite monitoring of mineral resources exploration fields and natural and man-made object displacements. *Science and Technological Developments*. 2016;95(3):5–11. (In Russ.)
25. Boncori M.J.-P. Measuring coseismic deformation with spaceborne synthetic aperture radar: A review. *Frontiers in Earth Science*. 2019;7:16. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00016>
26. He P., Wen Y., Xu C., Chen Y. Complete three-dimensional near-field surface displacements from imaging geodesy techniques applied to the 2016 Kumamoto earthquake. *Remote Sensing of Environment*. 2019;232:111321. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111321>
27. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Dmitriev P.N., Golubev V.I., Smol'yaninova E.I., Timoshkina E.P. Estimation of full vector of displacements of the earth's surface and technogenic objects based on INSAR data applied to oil and gas production areas. *Geophysical Research*. 2012;13(3):5–17. (In Russ.)
28. Myasnikov A.V. On the problem of taking into account the effect of meteorological factors on large precision systems: a case study of the Baksan large-base laser interferometer. *Seismicheskie Pribory*. 2019;55(2):27–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.21455/si2019.2-2>

Информация об авторах

Шевчук Роман Васильевич – младший научный сотрудник лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН, аспирант четвёртого года обучения Горного института НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: shevchuk.002@mail.ru

Маневич Александр Ильич – научный сотрудник лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН, старший преподаватель кафедры безопасности и экологии горного производства Горного института НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: ai.manevich@yandex.ru

Акматов Дастан Женишбекович – младший научный сотрудник лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН, аспирант четвёртого года обучения Горного института НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: dastan.akmatov.1994@mail.ru

Урманов Данил Игоревич – инженер лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН, аспирант первого года обучения Горного института НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: durmanov.dui@mail.ru

Шакиров Артур Ильдусович – инженер лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН, аспирант первого года обучения Горного института НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: turik598@gmail.com

Information about the authors

Roman V. Shevchuk – Junior Researcher, Geodynamics Laboratory, Geophysical Center RAS, Fourth Year Postgraduate Student, Mining Institute NUST MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: shevchuk.002@mail.ru

Alexander I. Manevich – Researcher, Geodynamics Laboratory, Geophysical Center, RAS, Senior Lecturer, Mining Safety and Ecology Department, Mining Institute NUST MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: ai.manevich@yandex.ru

Dastan Zh. Akmatov – Junior Researcher, Geodynamics Laboratory, Geophysical Center of RAS, Fourth Year Postgraduate Student, Mining Institute NUST MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: Dastan.akmatov.1994@mail.ru

Danil I. Urmanov – Engineer at the Geodynamics Laboratory of the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, first-year postgraduate student, Mining Institute NUST, Moscow, Russian Federation; e-mail: durmanov.dui@mail.ru

Artur I. Shakirov – Engineer at the Geodynamics Laboratory of the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, first-year postgraduate student, Mining Institute NUST MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: turik598@gmail.com

Article info

Received: 12.09.2022

Revised: 06.10.2022

Accepted: 07.10.2022

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.09.2022

Поступила после рецензирования: 06.10.2022

Принята к публикации: 07.10.2022