

Система мониторинга динамики криолитозоны на основе данных спутниковой геодезии

Л. И. Лобковский^{1,3,5}, Ю. В. Габсатаров^{1,5}, А. Г. Алексеев^{2,6},
В. Г. Крючков², А. А. Баранов³, И. П. Семилетов⁴

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: llobkovsky@ocean.ru*

² *АО «Научно-исследовательский центр «Строительство»
Москва, 109428, Россия
E-mail: kryuchkov@cstroy.ru*

³ *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН
Москва, 117997, Россия
E-mail: baranov@ifz.ru*

⁴ *Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия
E-mail: ipsemiletov@gmail.com*

⁵ *Научно-технологический университет «Сириус», федеральная территория
«Сириус», Краснодарский край, 354340, Россия
E-mail: gabsatarov.yv@talantiuspeh.ru*

⁶ *Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет, Москва, 129337, Россия
E-mail: adr-alekseev@yandex.ru*

Работа посвящена анализу и применению спутниковых геодезических методов для мониторинга состояния многолетнемёрзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации. Актуальность исследования обусловлена ускоренной деградацией мерзлоты на фоне климатических изменений и интенсивным экономическим развитием региона, сопровождающимся активным строительством промышленных и инфраструктурных объектов, развитием и расширением транспортных коридоров, интенсификацией добычи полезных ископаемых. Рассматриваются возможности методов спутниковой геодезии для дистанционного контроля за динамикой криолитозоны, в том числе в режиме близком к реальному времени. Обсуждаются особенности интерпретации спутниковых наблюдений в условиях высокоширотных регионов и перспективы их применения для оценки инженерных рисков. Представлена концепция интегрированной системы мониторинга, основанной на комплексировании геодезических данных о смещениях земной поверхности, корректном выборе отсчётной системы, учёте сейсмотектонических особенностей региона и верификации наблюдаемых смещений с использованием наземных измерений. Реализация данной концепции в масштабах Арктической зоны РФ позволит существенно повысить безопасность строительства и эксплуатации промышленных объектов, жилого фонда и объектов критической инфраструктуры за счёт раннего предупреждения развития опасных геологических процессов, обусловленных деградацией многолетнемёрзлых грунтов.

Ключевые слова: Арктический регион, многолетнемёрзлые грунты, спутниковая геодезия, система мониторинга

Одобрена к печати: 21.10.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-27-48

Введение

В последние десятилетия оформился общемировой тренд на активное освоение высокоширотных и приполярных регионов Земли. Развитие Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) относится к важнейшим задачам социально-экономического развития РФ (Указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645(<https://www.garant.ru/products/ipo/prime/>))

doc/74710556/)), что определяет необходимость строительства крупных инфраструктурных и промышленных объектов, расширения транспортных коридоров, освоения крупных месторождений углеводородов и других полезных ископаемых. Особенность континентальной части высокоширотных регионов в Северном полушарии заключается в значительном распространении многолетнемёрзлых грунтов (ММГ), которые занимают в среднем до 24 % поверхности суши, а в РФ до 65 % территории. Многолетнемёрзлые грунты играют важнейшую роль в формировании рельефа и береговой линии АЗРФ, поддержании стабильности арктических биомов, обеспечении безопасной эксплуатации промышленных и гражданских объектов. Изменения состояния ММГ в последние десятилетия привлекают всё большее внимание в связи с ускоряющимся потеплением климата, особенно в высокоширотных регионах Северного полушария, где потепление происходит в 3,0–3,5 раза быстрее, чем в среднем по планете (Li et al., 2023). В условиях развития промышленной и транспортной сети в арктических и субарктических регионах эта проблема приобретает большое практическое значение. Повышение температуры воздуха и растущая активность сезонного протаивания способствуют деградации ММГ, что может вызывать существенные геомеханические последствия — просадку грунтов, оползни, термокарст, что, в свою очередь, может оказать критическое воздействие на безопасность строительства и эксплуатации жилого фонда, промышленных и инфраструктурных объектов. С 2012 г. на центральном Ямале было выявлено большое количество термоцирков, карстовых воронок и многолетних бугров пучения, в том числе в непосредственной близости от инфраструктурных объектов действующих газоконденсатных месторождений (Богоявленский, 2021). В результате проседания свайного фундамента, вызванного деградацией ММГ, 29 мая 2020 г. произошло разрушение резервуара № 5 Теплоэлектроцентрали № 3 в г. Норильске, что привело к масштабному разливу нефтепродуктов, серьёзному загрязнению окружающей среды и значительному материальному и экологическому ущербу. Владелец объекта, ПАО «Горно-металлургический комбинат «Норильский никель», понёс убытки в размере около 158 млрд руб., включающие расходы на ликвидацию последствий аварии и уплату штрафов.

Кроме того, деградация ММГ может приводить к значительному выбросу парниковых газов (CO_2 и CH_4) за счёт включения в современный биогеохимический цикл гигантских запасов органического вещества из ранее стабилизированных (замороженных) запасов, что способно существенно усилить происходящие климатические изменения (Лобковский, 2020; Semiletov, 1999; Semiletov et al., 1996; Shakhova et al., 2010a, b, c, 2015). В этом контексте наиболее важны наблюдения за состоянием мерзлоты на суше и на шельфе, с фокусом на оценку скорости заглупления сезонно-талого слоя на суше и крышки подводной мерзлоты на шельфе, а также термокарста, включая береговую эрозию ледового комплекса (Semiletov, 1999). Таким образом, мониторинг и моделирование процессов, происходящих в криолитозоне, представляются актуальными современными задачами в науках о Земле.

Систематический мониторинг динамики криолитозоны предполагает развёртывание национальной сети мониторинговых станций в зоне распространения ММГ. В России в настоящий момент под руководством Росгидромета создаётся система государственного фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты, состоящая из распределённой сети в составе 140 пунктов, осуществляющих непрерывные автоматические измерения температуры грунта на разных глубинах. Кроме того, проводятся активные исследования сезонно-талого слоя и динамики криолитозоны с использованием геофизических методов (Нерадовский, 2007; Эпов и др., 2025; Shiklomanov et al., 2017; Streletskiy et al., 2015) и данных спутников дистанционного зондирования Земли (Бондур, Кузнецова, 2015; Duncan et al., 2020).

Современные методы спутниковой геодезии, такие как глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), радарная спутниковая интерферометрия InSAR (*англ.* Interferometric synthetic aperture radar), гравиметрические спутниковые миссии, например GRACE (*англ.* Gravity Recovery and Climate Experiment), также позволяют организовать мониторинг деградации ММГ. Точность измерений смещений с помощью постоянных станций ГНСС достигает в настоящее время миллиметрового уровня, что достаточно для наблюдения любых геодинамических процессов, интенсивность которых превосходит несколько милли-

метров в год (Handbook..., 2017). Комплексное использование данных различных методов спутниковой геодезии в сочетании с существующими наземными наблюдениями позволит существенно расширить понимание современных тенденций изменения криолитозоны РФ. Цель настоящей работы — разработка концепции системы мониторинга многолетнемёрзлых грунтов на основе использования данных спутниковой геодезии для непрерывной оценки динамики деградации ММГ и оперативного предупреждения опасных процессов в местах размещения промышленных и инфраструктурных объектов.

Методы спутниковой геодезии в задачах мониторинга деградации многолетнемёрзлых грунтов

Методы спутниковой геодезии

Начиная с 80-х гг. XX в. в науках о Земле стали широко применяться данные спутниковой геодезии для решения большого круга задач геодинамики. Активное использование данных спутниковой геодезии позволило впервые осуществить прямые наблюдения за крупномасштабными тектоническими процессами, такими как движение литосферных плит, исследовать движение центра масс Земли, создать высокоточные земные и небесные системы отсчёта и обеспечить наблюдения за деформационными процессами в труднодоступных тектонически активных регионах. Методы спутниковой геодезии основаны главным образом на исследовании искусственными спутниками Земли её гравитационного поля, радарной съёмке земной поверхности и наблюдениях с Земли за пролётом искусственных спутников. Среди наиболее широко используемых методов можно выделить данные спутниковой миссии GRACE и GRACE-FO (англ. GRACE-Follow-On) (Михайлов и др., 2005; Ткаченко, Лыгин, 2017), данные InSAR (Конвисар и др., 2024; Михайлов и др., 2013; Teshebaeva et al., 2021; Widhalm et al., 2025) и данные ГНСС (Blewitt, 2007; Nikolaidis, 2002; Petrovski, Tsugii, 2012; Handbook..., 2017) (таблица). Последние два метода широко применяются для исследования современных деформаций земной поверхности, что обусловлено их высокой разрешающей способностью (рис. 1).

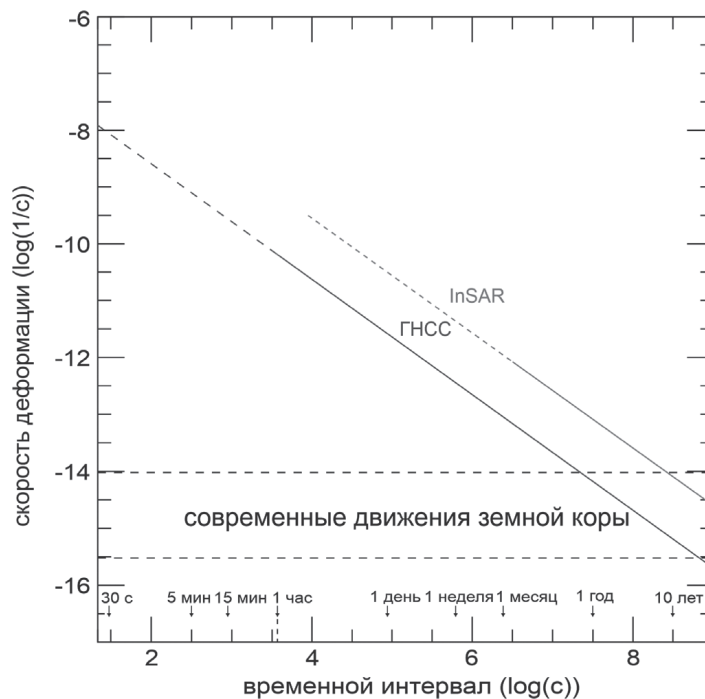


Рис. 1. Разрешающая способность некоторых методов спутниковой геодезии по данным работы (Nikolaidis, 2002)

Характеристики некоторых методов спутниковой геодезии

Параметр	GRACE (GRACE-FO)	InSAR	ГНСС
Тип измерений	Площадные измерения		Точечные измерения
Пространственное разрешение	до 300×300 км	до 5×20 м	—
Точность измерений	1–2 см/мес при расчёте эквивалентной толщины водяного слоя (<i>англ.</i> equivalent water height — EWH)	1–5 мм/год (скорость смещений), 5–15 мм (вертикальные смещения)	1–2 мм/год (скорость смещений), 1–2 мм (горизонтальные смещения), 3–5 мм (вертикальные смещения)
Периодичность измерений	1 раз в месяц	1 раз в 12 дней	от 1 раза в сутки (стандартная точность) до 100 Гц (режим сниженной точности)
Достоинства метода	Всепогодность, глобальное покрытие, прямая оценка изменения распределения масс в недрах Земли, высокая точность отслеживания изменения масс	Всепогодность, возможность непосредственного получения поля смещений с высокой разрешающей способностью, низкие затраты на наземные работы или их полное отсутствие	Всепогодность, возможность прямого измерения смещений земной поверхности в режиме близком к реальному времени
Недостатки метода	Малая разрешающая способность, необходимость внесения дополнительных поправок за движение геоцентра и другие геодинамические процессы	Отсутствие прямой оценки трёхмерного вектора смещений, необходимость введения отсчётной основы (измерение относительных изменений), чувствительность к используемой цифровой модели рельефа и отражающей способности земной поверхности	Точечные измерения (переход к площадным измерениям требует высокой плотности сети наблюдательных пунктов и интерполяции полученных данных), необходимость монтажа станций измерений (постамент для ГНСС-антенны, размещение оборудования для приёма ГНСС-сигналов и передачи их в центр обработки), необходимость обеспечения хороших условий приёма спутникового сигнала

Метод InSAR основан на технологии спутниковой радиолокационной съёмки земной поверхности и широко используется для исследования процессов подготовки и реализации землетрясений, вулканических извержений, мониторинга склоновых процессов и техногенного воздействия (Михайлов и др., 2013; Massonnet, Feigl, 1998). Исследования смещений земной поверхности методом InSAR основываются на сопоставлении двух повторных разнесённых во времени радиолокационных съёмок, в результате чего формируется интерференционная картина, анализ которой позволяет определить смещения земной поверхности в направлении визирования спутника LOS (*англ.* line of sight). В настоящее время наиболее широко используются свободно распространяемые данные специализированных спутников типа Sentinel-1, предоставляемые Европейским космическим агентством ESA (*англ.* European Space Agency). В задачах мониторинга ММГ данные InSAR применяются при исследовании термокарстовых процессов и пространственно-временной динамики деградации ММГ (Yan et al., 2025).

Метод ГНСС представляет собой радиодальномерную систему, основанную на расчёте времени распространения радиосигнала особой формы от излучающих его спутников, находящихся на околокруговых орбитах с радиусом ~26 000 км, до наземных приёмных станций (Blewitt, 2007). Технология ГНСС позволяет в режиме, близком к реальному времени, получать прямые оценки трёхмерных координат станций наблюдений. В случае хороших условий наблюдений, достаточной их длительности и использовании специализированных методов

постобработки измерений, точность координат может достигать миллиметрового уровня. В настоящее время функционирует несколько глобальных спутниковых навигационных систем, имеющих схожую архитектуру и широко применяемых в науках о Земле: ГЛОНАСС (Россия), NAVSTAR GPS (США), Beidou (Китай), Galileo (Европейский союз). Исследование современных движений земной поверхности с помощью ГНСС основано на анализе временных рядов оценок координат, получаемых в разные моменты времени. Посредством статистической обработки этих рядов определяют вектора смещений и скорости движения станций ГНСС-наблюдений. Далее проводится пространственный анализ полученных полей смещений, позволяющий выявить геодинамические и тектонические особенности региона. В рамках задач мониторинга деградации ММГ данные ГНСС применяются для непрерывного высокоточного измерения трёхмерных смещений земной поверхности, что даёт возможность отслеживать динамику криолитозоны в режиме, близком к реальному времени, и оперативно реагировать на резкие смещения поверхности, потенциально свидетельствующие о развитии опасных геологических процессов (оползней, обвалов, провалов и др.). Отдельным направлением использования данных ГНСС в мониторинге ММГ стало применение интерферометрического метода ГНСС-рефлектометрии (ГНСС-ИР) (Косарев и др., 2018; Hu et al., 2022). Данный метод основан на совместной обработке прямого радиосигнала от навигационного спутника и радиосигнала, отражённого от поверхности Земли. В силу когерентности этих сигналов формируется интерференционная картина, позволяющая отслеживать изменения высоты поверхности и её отражательной способности. Это, в свою очередь, даёт возможность оценивать толщину сезонно-талого слоя и степень обводнённости поверхностного слоя почвы.

Миссия GRACE (в настоящий момент действует аналогичная миссия GRACE-FO) представляет собой полностью спутниковую систему, основанную на высокоточном измерении взаимного расстояния между двумя идентичными низколетящими спутниками (высота орбиты ~500 км, расстояние между спутниками ~220 км). Изменение расстояния между спутниками вследствие их неравномерного притяжения гравитационным полем Земли позволяет выявлять пространственно-временные вариации гравитационного поля, обусловленные перераспределением массы как на поверхности, так и внутри планеты. Данные GRACE используются для мониторинга изменения массы на поверхности Земли, включая смещения, вызванные перераспределением воды (Михайлов и др., 2005; Ткаченко, Лыгин, 2017; Muskett, Romanovsky, 2009). В рамках мониторинга ММГ данные GRACE применяются для отслеживания на региональном уровне деградации криолитозоны через уменьшение массы, связанное с таянием ледяных линз, осушением почв и потерей льда в верхних слоях литосферы.

Методы анализа данных спутниковой геодезии

Методы спутниковой геодезии позволяют напрямую измерять смещения земной поверхности, что делает их эффективным инструментом для мониторинга динамики криолитозоны. Вклад различных геодезических систем в оценку деградации ММГ зависит от особенностей получаемых данных и используемых алгоритмов их обработки.

Процесс анализа InSAR-данных состоит в подборе исходных радиолокационных снимков для одного и того же спутника и одной и той же территории за разные даты, формировании интерферометрической картины наложением парных снимков и извлечении фазовой информации, характеризующей смещение земной поверхности в направлении визирования спутника (Teshbaeva et al., 2021). Извлечённая фаза, помимо непосредственно данных о деформации земной поверхности, содержит ошибки, связанные с прохождением радиосигналов через атмосферу (особенно значимых в Арктическом регионе) и неточностями орбит спутников. Коррекция атмосферного влияния проводится с помощью введения поправок, рассчитанных по моделям атмосферы (Волкова и др., 2024). Кроме того, рельеф исследуемой территории (особенно с большими перепадами высоты) также может вызывать ложные смещения земной поверхности (Massonnet, Feigl, 1998). Устранение неточностей, связан-

ных с рельефом, проводится за счёт использования цифровых моделей рельефа DEM (*англ.* Digital Elevation Model), которые позволяют более точно совместить последовательные снимки, удалить составляющую фазы, связанную с рельефом, и скомпенсировать геометрические искажения, вызванные разным углом обзора между снимками. В задачах мониторинга ММГ должны использоваться цифровые модели рельефа с повышенной разрешающей способностью в высокоширотных регионах, такие как ArcticDEM (<https://www.pgc.umn.edu/data/arctic-dem/>). В результате обработки полученные модифицированные оценки фазы преобразуются в абсолютные смещения вдоль линии визирования спутника и проекции смещения на вертикальное и горизонтальное (восток-запад) направление. На основе этих данных формируются временные ряды смещений для каждой точки исследуемой области. Полученные ряды анализируются с использованием статистических методов для определения долгосрочного тренда вертикальных смещений, сезонных вариаций и других характеристик динамики ММГ. Обработка данных InSAR проводится с применением свободно распространяемых программных пакетов GMTSAR (<https://github.com/gmtsar/gmtsar>), ISCE2 (<https://github.com/isce-framework/isce2>), SNAP (<https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>), MintPy (<https://github.com/insarlab/MintPy>). Специфическим ограничением для арктических территорий является низкая когерентность радиолокационного сигнала, обусловленная однородностью ландшафта, влиянием осадков, ветра и изменениями влажности поверхности. Это может существенно снижать точность оценки смещений. В задачах мониторинга техногенных объектов Арктики данная проблема решается с помощью метода постоянных отражателей PS-InSAR (*англ.* Persistent Scatterer InSAR), где роль стабильных точек играют здания, сооружения или специально установленные искусственные отражатели. Для природных территорий с минимальным антропогенным воздействием более применим метод малых базисов SBAS-InSAR (*англ.* Small Baseline Subset), обеспечивающий устойчивость к потере когерентности за счёт подбора интерферометрических пар с малым временным и пространственным интервалом.

Метод ГНСС, единственный из технологий спутниковой геодезии, даёт возможность проводить прямые измерения трёхмерного смещения с миллиметровой точностью. Кроме того, технология ГНСС позволяет в рамках каждой станции наблюдений объединить сразу три подхода, применяемых при исследовании деградации ММГ: 1) классический метод проведения статических непрерывных измерений; 2) метод высокочастотной регистрации и потоковой обработки; 3) интерферометрический метод ГНСС-рефлектометрии.

Обработка и анализ ГНСС-данных в рамках классического подхода проводятся в три этапа, при этом часть процедур предполагает возможность использования методов машинного обучения: 1) первичная постобработка фазовых спутниковых геодезических наблюдений; 2) формирование и анализ временных рядов спутниковых геодезических наблюдений; 3) анализ зарегистрированных смещений земной поверхности.

Первый этап представляет собой обработку спутниковых геодезических измерений, регистрируемых ГНСС-приёмниками на станциях наблюдений с целью получения трёхмерных координат. Исходными данными становятся кодовые и фазовые отсчёты, содержащие информацию о времени распространения ГНСС-радиосигнала от активного излучающего спутника до фазового центра приёмной антенны на земной поверхности; высокоточная эфемеридно-временная информация; различные поправки, распространяемые мировыми центрами данных; параметры геофизических процессов, влияющих на решение задачи позиционирования. Применяются классические приёмы обработки, включающие прямое моделирование геофизических процессов, линейное комбинирование, метод наименьших квадратов, калмановскую фильтрацию и др. Данные методы обработки реализованы в виде различных пакетов постобработки: GAMIT/GLOBK (<http://geoweb.mit.edu/gg/>), GipsyX (<https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/>), BERNese (<https://www.bernese.unibe.ch/>). Результатами первого этапа выступают оценки трёхмерных координат и, возможно, скорость пункта наблюдений в выбранной системе отсчёта.

Второй этап связан с анализом временных рядов ГНСС-измерений, составленных из оценок координат, полученных на предыдущем этапе. Цель анализа заключается в очистке временных рядов и выделении отдельных компонент временного ряда в пространственной

и временной области. Эти компоненты отражают действие на земную поверхность различных геодинамических процессов. Классическими приёмами обработки на данном этапе следует считать регрессионный анализ (Габсатаров, 2012), прямое моделирование, итеративное моделирование и спектральный анализ, а результатами обработки — компоненты временных рядов измерений, отражающих действие на земную поверхность различных геодинамических процессов, результаты статистической обработки; результаты спектрального анализа. В рамках данного этапа имеются крайне широкие возможности по применению методов машинного обучения с учителем (Gabsatarov, Vladimirova, 2025): регрессионный анализ, задача классификации и применение нейронных сетей. В качестве примеров конкретных задач можно назвать следующие: 1) классификация временных рядов различных пунктов наблюдения по некоторому признаку (например, содержанию нелинейных компонент); 2) выделение и определение типа нелинейных смещений, связанных с действием различных постсейсмических процессов. Задача плохо поддаётся решению классическими методами из-за наложения одновременного действия различных процессов. В качестве обучающей выборки могут быть использованы временные ряды, рассчитанные с помощью прямого моделирования, и записи смещений станций.

Третий этап состоит в анализе отдельных параметров смещений земной поверхности по ГНСС-данным. На данном этапе происходит анализ выделенных на предыдущем этапе компонент временных рядов с целью изучения различных аспектов деформирования земной поверхности и построение моделей процессов, вызывающих эту деформацию. Классические приёмы обработки включают расчёт тензора деформаций и решение разных обратных задач. Результатами обработки являются различные модели, полученные в ходе обращения полей величин, характеризующих отклик земной поверхности на действие изучаемого геодинамического процесса, а также поля величин, характеризующих деформацию земной поверхности (Герасименко и др., 2017; Shen et al., 1996). В рамках этого этапа также используется метод кластеризации для получения дополнительных данных о стабильных доменах в поле смещений и деформаций земной поверхности. Полученные в ходе обработки данных ГНСС результаты позволяют выявить долгосрочный тренд смещений земной поверхности, его пространственно-временные вариации, локализовать области повышенных деформаций, которые совместно с данными о региональной сейсмичности позволят выявить активные региональные разломные структуры.

Использование высокочастотных ГНСС-данных (с частотой от 1 Гц и выше) и их потоковая обработка открывает новые перспективы для мониторинга деградации ММГ в режиме близком к реальному времени, особенно в условиях усиливающегося климатического потепления в Арктике и необходимости оперативного реагирования на техногенные риски. Потоковая обработка высокочастотных ГНСС-данных позволяет в реальном времени отслеживать деформации под фундаментами промышленных объектов, жилых домов, объектами инфраструктуры (трубопроводами, опорами линий электропередач, автомобильными и железными дорогами) и организовать систему раннего предупреждения внезапных обрушений на основе выработанных алгоритмами триггеров (превышение пороговых значений отслеживаемых смещений земной поверхности над средней величиной). Организация подобной системы мониторинга предполагает размещение локальной сети станций ГНСС-наблюдений на площадке объекта, непрерывный сбор и потоковую обработку данных наблюдений с использованием программного обеспечения RTKLIB (<https://rtklib.com/>) или TRACK-RT (<http://geoweb.mit.edu/gg/>) с определением смещений относительно выбранной опорной станции и расчёт триггеров в скользящем окне.

Обработка данных ГНСС-ИР основывается на одновременном приёме прямого радиосигнала от спутника и отражённого от поверхности Земли и исследовании результирующей интерференционной картины (Hu et al., 2022). Интерференция прямого и отражённого сигналов проявляется в виде осцилляций значений специального сигнала, характеризующего соотношение сигнал/шум SNR (*англ.* signal-to-noise ratio). Спектральный анализ осцилляций сигнала SNR в зависимости от угла возвышения передающего спутника позволяет определить основную частоту, связанную с разностью расстояний, которые проходит прямой и от-

ражённый радиосигнал. На основе этой частоты рассчитывается вертикальное расстояние от антенны до отражающей поверхности. Полученные значения высоты отражающей поверхности формируют временные ряды, используемые для оценки трендов и сезонных вариаций. Обработка данных проводится с помощью свободно распространяемых модулей языка Python, например gnssIR (https://github.com/kristinemlarson/gnssIR_python). В методе ГНСС-ИР антенна устанавливается на ровной площадке на мачте, закреплённой бетонным якорем, а приём радиосигналов осуществляется с высокой частотой (1 Гц и выше). В задачах мониторинга динамики криолитозоны данные ГНСС-ИР используются для оценки толщины снежного покрова и мощности сезонно-талого слоя.

Обработка данных GRACE в значительной степени проводится в международных центрах данных (Ткаченко, Лыгин, 2017), которые выпускают оценки изменения EWH на ежемесячной основе в глобальном масштабе. Комбинирование ежемесячных оценок EWH позволяет построить непрерывные временные ряды и определить значение и направление тренда, сезонную компоненту и их возможные вариации с использованием методов регрессионного анализа. Выявленный отрицательный тренд EWH указывает, в случае подтверждения дополнительными данными об изменениях температуры почв и выпадения осадков, на возможную деградацию ММГ. Кроме того, значения EWH могут быть преобразованы в вертикальные смещения земной поверхности с использованием свободно распространяемых модулей языка Python и модели упругой реакции Земли на изменение нагрузки.

Отсчётная основа в геодезических изысканиях

Вопрос задания отсчётной основы имеет определяющее значение в задачах исследования современных движений земной поверхности геодезическими методами. Методы классической геодезии использовали в качестве отсчётной основы поверхность геоида (квазигеоида) или отсчётного эллипсоида (референц-эллипсоида), при этом распространение координат отсчётной основы проводилось с помощью сети реперных точек. В спутниковой геодезии, с переходом измерений на планетарный масштаб и необходимостью прямой оценки трёхмерных векторов смещений земной поверхности, потребовалась разработка общеземной геоцентрической отсчётной основы. Совместный анализ данных космической и спутниковой геодезии позволил создать физическую реализацию прямоугольной системы координат с центром в центре масс Земли — Международную земную отсчётную основу ITRF (*англ.* International Terrestrial Reference Frame) (Altamimi et al., 2023). Она задаётся каталогом координат и скорости глобально распределённой сети пунктов наблюдений и построена с учётом требований самосогласованности (положение и скорость одной и той же точки на поверхности Земли в разные моменты времени отсчитываются по единым, неизменным во времени правилам) и «нулевой скорости» (суммарное поступательное и вращательное движение всей Земли, выражаемое через вектора скорости глобально распределённой сети пунктов наблюдений, равно нулю), что позволяет использовать данную систему отсчёта для получения корректных физически значимых смещений земной поверхности. Отсчётная основа ITRF является стандартной при рассмотрении данных ГНСС. Данные InSAR представляются относительными и могут также быть приведены к системе отсчёта ITRF посредством привязки измерений к временному ряду опорной станции ГНСС-наблюдений, расположенной в пределах рассматриваемого радиолокационного снимка. Использование данных GNSS для геопривязки и валидации измерений InSAR особенно важно в Арктическом регионе, где сезонные процессы оттаивания и промерзания ММГ могут существенно снижать интерферометрическую когерентность, усложняя интерпретацию радиолокационных данных. Данные GRACE связаны с ITRF, так как в этой системе задаются орбиты спутников, а следовательно, вертикальные смещения земной поверхности, установленные по данным GRACE, также рассматриваются в системе отсчёта ITRF. Таким образом, все измерения, полученные различными спутниковыми геодезическими методами, приводятся к единой системе отсчёта, что позволяет свободно комбинировать их и интерпретировать совместно.

Смещения земной поверхности в системе отсчёта ITRF содержат, помимо данных о деформациях земной поверхности и локальных процессах, таких как просадки вследствие деградации ММГ, информацию о крупномасштабных перемещениях литосферных плит, смещениях, обусловленных изостатическим выравниванием земной поверхности, косейсмическими и постсейсмическими процессами и др. (рис. 2). В связи с этим смещения земной поверхности, установленные в ITRF, не пригодны для исследования локальных и региональных смещений и деформаций земной поверхности. В этом случае возможно использовать региональные отсчётные основы, полученные из ITRF поворотом осей системы так, чтобы линейные скорости движения выбранной плиты оказались равны нулю. При исследовании более локальных деформационных процессов, например, в пределах площадки размещения промышленного объекта, возможно применение локальной отсчётной основы, в которой все смещения рассматриваются относительно одной выбранной опорной станции наблюдений. Таким образом, корректное задание отсчётной основы выступает необходимым условием для получения достоверных данных о современных движениях и деформациях земной поверхности.

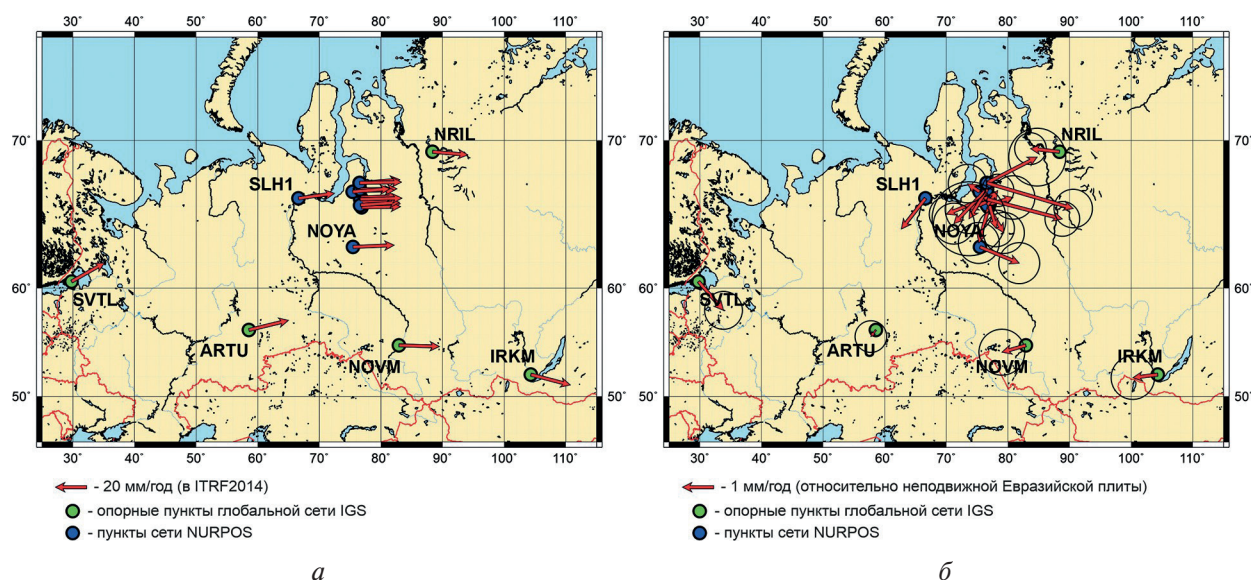


Рис. 2. Влияние выбранной системы отсчёта на оценки горизонтальных компонент векторов скорости ГНСС-станций: а — в системе отсчёта ITRF; б — в системе отсчёта, связанной с неподвижной Евразийской плитой. Эллипсы ошибок соответствуют уровню 1 среднеквадратической ошибки. IGS (англ. International GNSS Service) — Международная служба ГНСС

При построении региональной отсчётной основы в АЗРФ возникают существенные трудности, связанные с дискуссионным характером конфигурации литосферных плит в этом регионе. Согласно общепринятой геологической модели NUVEL-1A (DeMets et al., 1994), тектоническая активность Северо-Восточной Азии определяется взаимодействием трёх крупнейших неделимых литосферных плит — Евразийской, Североамериканской и Тихоокеанской — в пределах узких деформационных поясов. Однако современные данные структурной геологии, сейсмологии и спутниковой геодезии указывают на наличие значительных внутриплитных деформаций, наблюдаемых даже на больших расстояниях от границ этих плит. В рамках теории тектоники плит такие деформации объясняются введением дополнительных независимо вращающихся плит меньшего размера (рис. 3, см. с. 36), крупнейшими из которых являются Амурская, Охотская и Берингова (Габсатаров и др., 2013; Савостин и др., 1982; Apel et al., 2006; Ashurkov et al., 2016). При этом конфигурация границ данных плит и их кинематические параметры существенно различаются в разных моделях, а сами границы не образуют замкнутых контуров, проявленных в региональной сейсмич-

ности. Альтернативным объяснением наблюдаемых внутриплитных деформаций стала концепция пластических деформаций, обусловленных пассивным растяжением континентальной литосферы вследствие субдукции Тихоокеанской плиты (Lobkovskii, Ramazanov, 2021; Lobkovsky et al., 2022). В АЗРФ отклонения от тектонического режима, предсказанного моделью жёстких литосферных плит, наблюдаются также и в пределах Американо-Тихоокеанского бассейна (Лобковский, 2016).

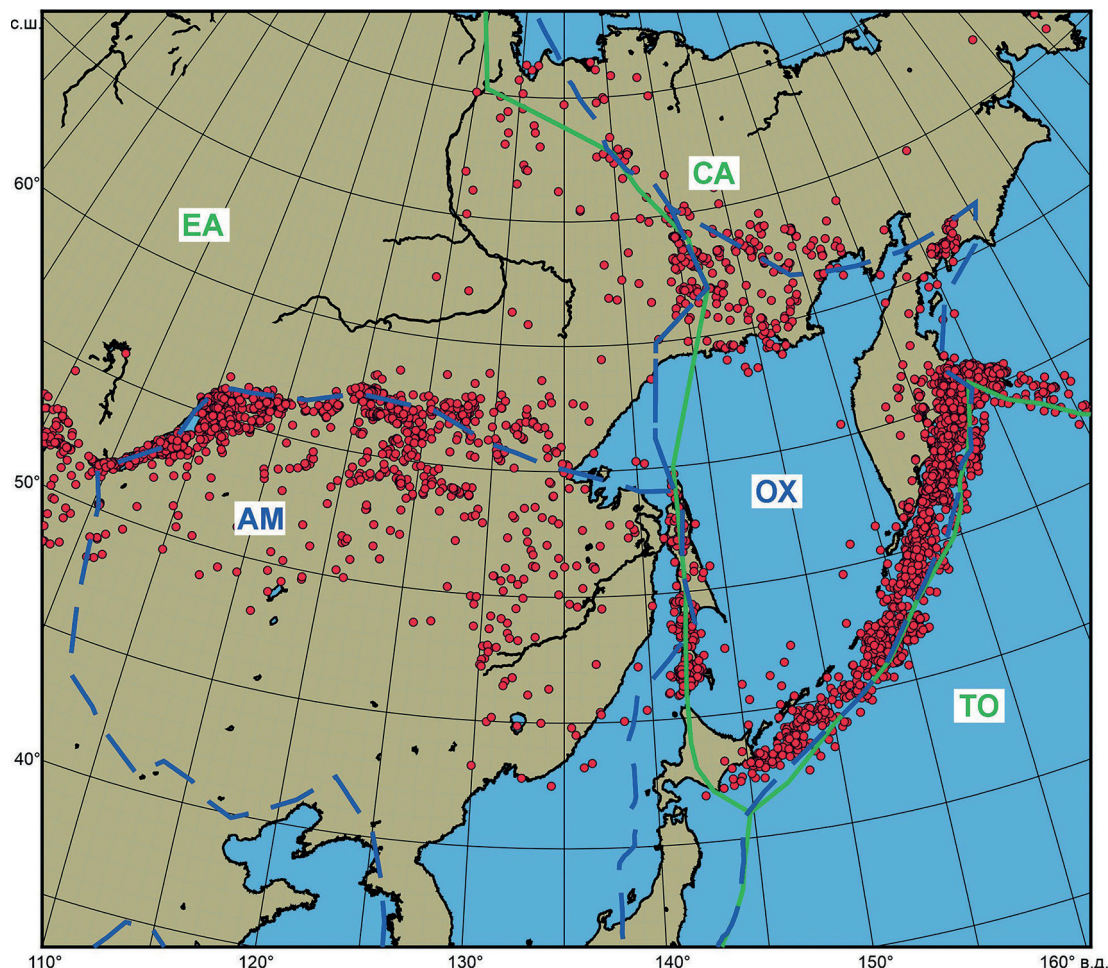
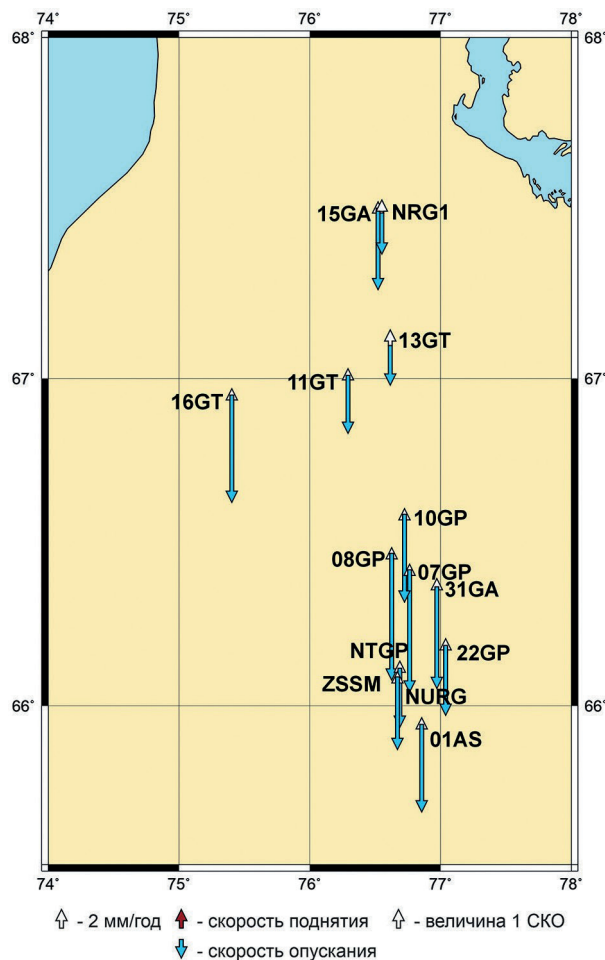


Рис. 3. Сейсмичность Северо-Восточной Азии по данным Единой геофизической службы РАН (красные круги, <http://eqru.gsras.ru/>). Зелёная линия отражает границы литосферных плит по модели NUVEL-1A (DeMets et al., 1994). Штриховой линией показаны предполагаемые границы микроплит. Литосферные плиты: ТО — Тихоокеанская плита, СА — Североамериканская, ЕА — Евразийская, БЕ — Берингова, ОХ — Охотская, АМ — Амурская

Таким образом, применение стандартного подхода к построению региональной отсчётной основы, основанного на модели движения жёстких литосферных плит, в условиях АЗРФ может привести к существенным искажениям при оценке величин современных смещений и деформаций земной поверхности. В качестве альтернативной региональной отсчётной основы в АЗРФ предлагается использовать более реалистичную картину движения литосферы, определяемую из глобальной трёхмерной модели современной геодинамики Земли, основанной на данных сейсмической томографии (Лобковский и др., 2025). Данная модель хорошо согласуется с данными спутниковой геодезии в платформенных регионах и позволит получить новые данные о региональных геодинамических процессах в тектонически активных регионах РФ (Дальний Восток, Северный Кавказ, Арктическая зона, Байкальская рифтовая зона) без внесения искажений, связанных с неточностями плитнотектонических моделей.

Система мониторинга деградации многолетнемёрзлых грунтов

В рамках подготовки концепции системы мониторинга были проанализированы существующие системы и программы мониторинга ММГ для установления ключевых наблюдаемых параметров, методов прогнозирования состояния ММГ и возможности их расширения за счёт применения методов спутниковой геодезии. Разработка программ мониторинга ММГ началась в 90-х гг. XX в. в рамках международной инициативы создания глобальной наземной сети для наблюдений вечной мерзлоты GTN-P (*англ.* Global Terrestrial Network for Permafrost) (<https://gtnp.arcticportal.org>), инициированной Международной ассоциацией по вечной мерзлоте IPA (*англ.* International Permafrost Association). В качестве ключевых параметров, определяемых на наземных станциях наблюдений, рассматривались температура ММГ (по результатам скважинных измерений) и толщина сезонного-талого слоя ATL (*англ.* active layer thickness). Оценка толщины сезонно-талого слоя проводится в рамках GTN-P в виде подпрограммы циркумполярного мониторинга сезонно-талого слоя CALM (*англ.* Circumpolar Active Layer Monitoring) (Brown et al., 2000), объединяющей более 240 наблюдательных пунктов в высоких широтах. В 2007 г. была создана региональная европейская программа PermaNET (<https://www.permanet-alpinespace.eu>) для мониторинга ММГ в Альпийском трансграничном регионе. В состав PermaNET входили около 40 станций наблюдений, которые непрерывно измеряли показания температуры горных пород в зоне распространения ММГ, данные георадара и изменения химического состава воды. В РФ в настоящее время силами Росгидромета активно развивается система государственного фонового мониторинга состояния ММГ, состав которой к концу 2025 г. должен насчитывать 140 пунктов, производящих непрерывные автоматические измерения температуры грунта на разных глубинах. В 2010-х гг. Европейским космическим агентством запущен проект Permafrost_CCI по созданию модели вечной мерзлоты с разрешением 1 км на основе спутниковых измерений в рамках исследования климатических изменений (Bartsch et al., 2023) Список ключевых мониторинговых параметров в программе Permafrost_CCI включает температуру земной поверхности, объём воды, заключённой в снеговом покрове, гравитационные измерения содержания воды на и под земной поверхностью. Активно развиваются технологии применения данных спутниковой геодезии для слежения за динамикой бугров пучения на основе данных ГНСС и InSAR (Beck et al., 2015), мониторинга толщины сезонно-талого слоя на основе данных InSAR (Chorsi et al., 2024). Таким образом, организация спутниковых наблюдений за ММГ является современным трендом в мерзловедении. Методы спутниковой геодезии обеспечивают прямые измерения вертикальных смещений земной поверхности, тем самым дополняя данные наземных наблюдений и повышая точность моделей эволюции ММГ (рис. 4).



модели вечной мерзлоты с разрешением 1 км на основе спутниковых измерений в рамках исследования климатических изменений (Bartsch et al., 2023) Список ключевых мониторинговых параметров в программе Permafrost_CCI включает температуру земной поверхности, объём воды, заключённой в снеговом покрове, гравитационные измерения содержания воды на и под земной поверхностью. Активно развиваются технологии применения данных спутниковой геодезии для слежения за динамикой бугров пучения на основе данных ГНСС и InSAR (Beck et al., 2015), мониторинга толщины сезонно-талого слоя на основе данных InSAR (Chorsi et al., 2024). Таким образом, организация спутниковых наблюдений за ММГ является современным трендом в мерзловедении. Методы спутниковой геодезии обеспечивают прямые измерения вертикальных смещений земной поверхности, тем самым дополняя данные наземных наблюдений и повышая точность моделей эволюции ММГ (рис. 4).

Рис. 4. Вертикальная скорость смещений земной поверхности в районе Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения, зарегистрированная методом ГНСС

Вертикальные смещения земной поверхности, наблюдаемые методами спутниковой геодезии, в районах распространения многолетнемерзлых пород могут быть обусловлены не только процессами деградации ММГ, но и другими процессами тектонической и техногенной природы. В частности, на *рис. 5* показаны различия в вертикальных скоростях смещений земной поверхности в АЗРФ в регионе с доминирующим процессом деградации ММГ (Северная Евразия), постледникового изостатического выравнивания земной поверхности (Фенноскандия), техногенного воздействия (Уренгойское нефтегазоконденсатное месторождение). Кроме того, значительное влияние на горизонтальные и вертикальные смещения земной поверхности оказывают деформационные процессы, связанные с активными тектоническими разломами.

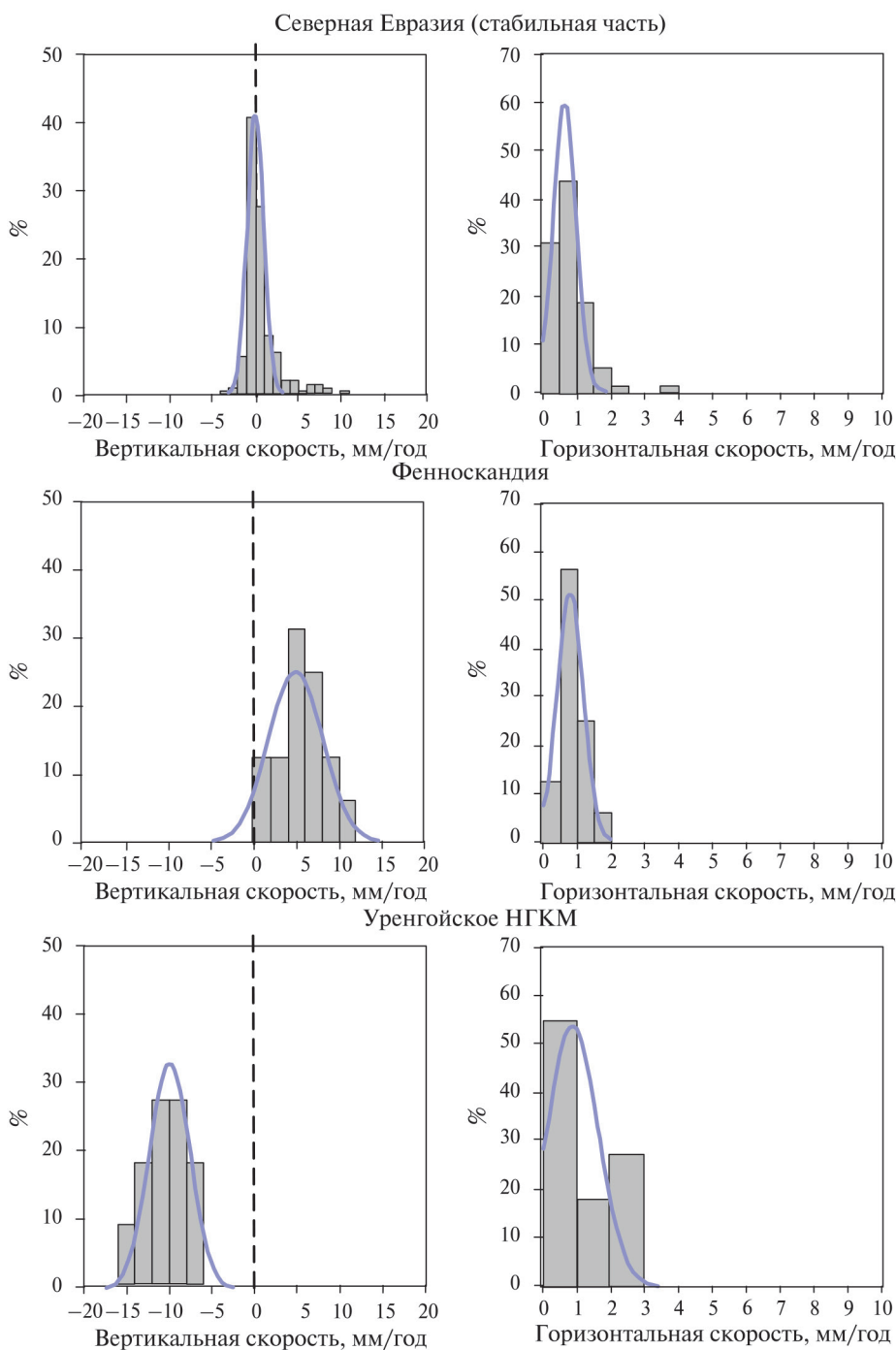


Рис. 5. Сравнение гистограмм оценок вертикальной и горизонтальной скорости ГНСС-смещений в различных регионах АЗРФ по данным исследования (Мельник, Стеблов, 2024)

Корректная интерпретация данных спутниковой геодезии для мониторинга деградации ММГ в подобных регионах требует либо использование локальной отсчётной основы, в которой за счёт фиксирования опорной станции в пределах области действия внутриплитных деформационных процессов возможно уменьшение их проявлений в данных наблюдений, либо, что более корректно, проведение дополнительных исследований с привлечением данных геологии, сейсмологии и других наук о Земле, а также результатов комплексирования различных данных спутниковой геодезии для установления природы деформационных смещений, построения моделей деформационного процесса и очистки наблюдаемых вертикальных смещений от деформационных эффектов.

Предлагаемая концепция системы мониторинга деградации ММГ в АЗРФ спутниковыми геодезическими методами основывается на проведении непрерывных измерений земной поверхности методами ГНСС, ГНСС-ИР, InSAR и GRACE. Техническая часть системы предполагает развёртывание в АЗРФ опорной сети станций ГНСС-наблюдений. Примерами развёртывания таких систем мониторинга в тектонически активных регионах становятся сети MAGNET и PVO в США, GEONET в Японии, CMONOC в КНР, каждая из которых насчитывает сотни и тысячи станций наблюдений, покрывающих исследуемые территории с равномерной пространственной плотностью.

На первоначальном этапе для решения этих задач целесообразно опираться на уже развёрнутые в регионе сети сейсмологических и геодинамических станций и использовать существующую инфраструктуру промышленных предприятий в районах активного освоения недр. В Российской Федерации действуют несколько опорных сетей ГНСС-станций для задач геодинамики, управляемых институтами РАН, Роскосмоса, Росстандарта и Росреестра, однако суммарное количество станций наблюдений (около 200 станций по данным Федерального центра геопространственных данных (<https://fcnd.ru/>), из которых только около 40 расположены в АЗРФ) крайне невелико при несравненно большей площади покрытия (рис. 6, см. с. 40), что требует дальнейшего развития и сгущения наблюдательной сети для расширения охвата и повышения детальности мониторинга. Кроме того, станции ГНСС-наблюдений в АЗРФ распределены крайне неравномерно, что связано с труднодоступностью региона и неравномерностью развития инфраструктуры. Отдельную сложность представляют условия размещения ГНСС-антенн на станциях наблюдений, которые зачастую установлены на крышах зданий и сооружений, что не позволяет использовать эти измерения для мониторинга сезонно-талого слоя методом ГНСС-ИР. Существует также несколько ведомственных сетей (ОАО «РЖД», ПАО «Газпром», Росгидромет и др.), однако большинство этих станций было установлено для решения других прикладных задач, что может потребовать их существенной модернизации для использования в системе мониторинга современных медленных движений земной поверхности.

В качестве первичной опорной сети в проекте предполагается использовать станции сейсмических и геодинамических наблюдений Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), а также станции фундаментальной астрономо-геодезической сети Росреестра. В дальнейшем планируется расширение сети установкой пунктов ГНСС-наблюдений на станциях метеорологических наблюдений Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и станциях системы государственного фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты для верификации спутниковых данных наземными измерениями. Конфигурация новых станций наблюдений предполагает установку ГНСС-антенн на вынесенных пилонах, закреплённых в стабильных слоях ММГ, для организации наблюдений за толщиной сезонно-талого слоя методом ГНСС-ИР, бесперебойного питания и потоковой передачи данных измерений. Выбор мест размещения станций мониторинга ММГ на территории станций существующих сетей измерений обусловлен рядом преимуществ, среди которых развитая инфраструктура, наличие постоянного электропитания и налаженной связи, близость расположения станций к крупнейшим промышленным и добывающим центрам Арктики и Сибири (Норильск, Тикси, Магадан, Якутск). Всё это позволит существенно снизить стоимость установки комплексных станций наблюдений в труднодоступном Арктическом регионе. Кроме

того, для геодинимических станций ФИЦ ЕГС РАН уже накоплены продолжительные временные ряды наблюдений (более 20 лет), а ряд опорных станций сети входят в состав определяющих ITRF, что обеспечивает как миллиметровую точность позиционирования самих станций в любой момент времени, так и возможность привязки региональных станций к наиболее высокоточной общеземной отсчётной основе ITRF.



Рис. 6. Расположение станций ГНСС-наблюдений (красные кружки) в Северном полушарии. Пункты сети СМОНОС (КНР) (более 2000 станций) не показаны, поскольку их координаты не представлены в используемых мировых базах данных

Развёртывание опорной сети в АЗРФ будет служить основой для организации локальных геодинимических полигонов, цель которых заключается в непосредственном мониторинге деградации ММГ на исследуемой территории или инженерного объекта, в том числе в мониторинге активности бугров пучения вблизи инфраструктурных и промышленных объектов. Локальный полигон представляет собой сеть станций ГНСС-наблюдений, развёрнутых на территории объекта мониторинга (площадка промышленного предприятия, опоры электрических сетей, мостов, трубопроводов, поверхность бугра пучения и др.). Применение режима высокочастотного сбора ГНСС-измерений позволяет организовать в пределах геодинимического полигона систему непрерывного мониторинга смещений земной поверхности за счёт непрерывного измерения расстояний от пунктов полигона до ближайшей опорной станции. Такая система позволит создать службу раннего предупреждения, фиксирующую аномальное увеличение скорости вертикальных смещений и просадок, что может свидетельствовать о потере несущей способности грунтов вследствие деградации ММГ. Это особенно важно в условиях интенсивной эксплуатации объектов в зоне распространения мерзлоты.

Данные существующих сетей ГНСС-наблюдений совместно с имеющимися данными геологии, геоморфологии и сейсмологии будут использованы на первоначальном этапе соз-

дания системы мониторинга деградации ММГ для выделения активных тектонических структур в АЗРФ.

Разные методы спутниковой геодезии хорошо дополняют друг друга при исследовании смещений земной поверхности (*таблица*), что позволяет организовать мониторинг деградации ММГ в различных пространственно-временных масштабах. Основными этапами проведения разномасштабного мониторинга деградации ММГ спутниковыми методами являются:

1. Мониторинг земной поверхности в региональном масштабе с помощью метода спутниковой гравиметрии GRACE. Периодичность — ~1 раз в месяц. Выявление снижения EWH в зоне вечной мерзлоты, что может свидетельствовать о таянии подземного льда и перетоке влаги. Расчёт временных рядов вертикальных смещений по данным GRACE. В выявленных зонах снижения EWH проводится верификация данных GRACE по данным наземных измерений температуры ММГ и объёма выпавших осадков и организуется локальный мониторинг мерзлоты методами InSAR.
2. В выявленных методами GRACE областях снижения EWH, подтверждённых данными наземных измерений, и местах компактного расположения промышленных и инфраструктурных объектов в полярных и приполярных регионах организуется локальный площадной мониторинг методом InSAR. Периодичность — ~1 раз в две недели. В местах расположения объектов применяется метод PS-InSAR, на открытых природных участках используется метод SBAS-InSAR. Результатом становятся временные ряды смещений точек земной поверхности, карты скорости проседания и выявление локальных аномалий. На участках с выраженными деформациями целесообразна организация точечного мониторинга с применением методов ГНСС и ГНСС-ИР.
3. В местах выявленного ускорения деградации мерзлоты, а также в окрестности и на территории промышленных и инфраструктурных объектов развёртывается сеть станций ГНСС-наблюдений для непрерывного мониторинга смещений и деформаций земной поверхности. Периодичность — 1 раз в сутки. В местах особого контроля возможна организация мониторинга смещений земной поверхности в режиме близком к реальному времени (частота дискретизации 1 Гц и выше) и организация системы раннего предупреждения о возникновении аномальных смещений. Данные ГНСС будут также использованы для верификации измерений полученными площадными методами (GRACE и InSAR) и привязки площадных измерений InSAR к отсчётной основе ITRF.
4. Финальные оценки скорости деградации ММГ в АЗРФ формируются после преобразования измеренных смещений в региональную систему отсчёта, построенную на основе глобальной трёхмерной геодинамической модели (Лобковский и др., 2025). Выполняется коррекция смещений, построенных с учётом моделей локальных тектонических и техногенных процессов, что обеспечивает получение достоверных параметров деградации мерзлоты в различных природно-климатических и инженерных условиях.

Предложенная концепция системы разномасштабного мониторинга деградации ММГ с использованием методов спутниковой геодезии (GRACE, InSAR, ГНСС, ГНСС-ИР) позволяет выявлять и отслеживать деформации земной поверхности от регионального до локального уровня с высокой точностью и временной детализацией, обеспечивая научно обоснованную основу для оценки рисков строительства и эксплуатации инфраструктурных промышленных и жилых объектов в АЗРФ.

Заключение

В настоящей работе представлен концепт системы спутникового мониторинга деградации многолетнемерзлых грунтов, основанный на интеграции различных методов спутниковой геодезии (GRACE, InSAR, ГНСС, ГНСС-ИР). Ключевые достоинства предлагаемого подхода

следующие: 1) комплексирование данных для выявления как долговременных, так и кратковременных деформаций; 2) использование в качестве корректной региональной отсчётной основы полей смещений земной поверхности, рассчитанных по данным глобальной трёхмерной геодинамической модели Земли (Лобковский и др., 2025); 3) возможность организации высокоточного непрерывного наблюдения и системы раннего предупреждения об аномалиях мерзлотных процессов; 4) применение существующей инфраструктуры геофизических, геодезических и метеорологических станций, что значительно снижает затраты на реализацию.

Предложенная система представляет собой основу для создания научно обоснованной платформы мониторинга многолетнемёрзлых грунтов в условиях ускоряющихся климатических изменений и растущей антропогенной нагрузки в Арктическом регионе.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Института океанологии РАН (тема № FMWE-2024-0018) и при финансовой поддержке проекта GEO-BFT-2410, реализуемого в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус» (Соглашение № 18-03 от 10.09.2024).

Литература

1. *Богоявленский В. И.* Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 1. С. 51–66. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-51-66.
2. *Бондур В. Г., Кузнецова Т. В.* Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 30–43. DOI: 10.7868/S020596141504003X.
3. *Волкова М. С., Михайлов В. О., Османов Р. С.* Анализ эффективности применения глобальной погодной модели HRES (GACOS) для коррекции атмосферных помех в интерферометрических оценках полей смещений на примере вулканов Камчатки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 9–22. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-9-22.
4. *Габсатаров Ю. В.* Анализ деформационных процессов в литосфере по геодезическим наблюдениям на примере разлома Сан-Андреас // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3. № 3. С. 275–287. DOI: 10.5800/GT-2012-3-3-0074.
5. *Габсатаров Ю. В., Стеблов Г. М., Фролов Д. И.* Результаты новых GPS-наблюдений в области Беринговой микроплиты // Физика Земли. 2013. № 3. С. 114–118. DOI: 10.7868/s0002333713020026.
6. *Герасименко М. Д., Шестаков Н. В., Коломиец А. Г.* Определение движений и деформаций земной коры по геодезическим измерениям: учебно-метод. пособие. Владивосток: ДВФУ, 2017. 38 с.
7. *Конвисар А. М., Михайлов В. О., Смирнов В. Б., Тимошкина Е. П.* Постсейсмические процессы в области землетрясения Чигник на Аляске 29.07.2021 г. Часть I: результаты моделирования // Физика Земли. 2024. № 4. С. 21–34. DOI: 10.31857/S0002333724040026.
8. *Косарев Н. С., Антонович К. М., Колмыков Р. А., Черных Д. Ю.* Обзор методов ГНСС-рефлектометрии для определения колебаний высот морской топографической поверхности в России и за рубежом // Вестн. СГУГиТ. 2018. Т. 23. № 3. С. 46–60.
9. *Лобковский Л. И.* Тектоника деформируемых литосферных плит и модель региональной геодинамики применительно к Арктике и Северо-Восточной Азии // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 3. С. 476–495. DOI: 10.15372/GiG20160302.
10. *Лобковский Л. И.* Возможный сейсмогенно-триггерный механизм резкой активизации эмиссии метана и потепления климата в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2020. № 3(39). С. 62–72. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-62-72.
11. *Лобковский Л. И., Баранов А. А., Бобров А. М., Чуваев А. В.* Термоконвективная трехмерная сферическая модель современной геодинамики Земли: применение в исследовании тектоники и региональной геологии // Геотектоника. 2025. № 1. С. 3–20. DOI: 10.31857/S0016853X25010012.
12. *Мельник Г. Э., Стеблов Г. М.* Стабильность Северной Евразии по данным спутниковой геодезии // Физика Земли. 2024. № 2. С. 85–97. DOI: 10.31857/S0002333724020074.
13. *Михайлов В. О., Тихоцкий С. А., Диаман М., Пане И.* Исследование возможности обнаружения и изучения вариаций силы тяжести геодинамического происхождения по современным спутниковым гравиметрическим данным // Физика Земли. 2005. № 3. С. 18–32.

14. Михайлов В. О., Киселева Е. А., Смольянинова Е. И., Дмитриев П. Н., Голубева Ю. А., Исаев Ю. С., Дорохин К. А., Тимошкина Е. П., Хайретдинов С. А., Голубев В. И. Мониторинг оползневых процессов на участке северокавказской железной дороги с использованием спутниковой радарной интерферометрии в различных диапазонах длин волн и уголкового отражателя // Геофиз. исслед. 2013. Т. 14. № 4. С. 5–22.
15. Нерадовский Л. Г. Изучение свойств мерзлых засоленных грунтов методом динамической георадиолокации // Криосфера Земли. 2007. Т. 11. № 2. С. 32–39.
16. Савостин Л. А., Вержбицкая А. И., Баранов Б. В. Современная тектоника плит Охотоморского региона // Докл. Акад. наук СССР. 1982. Т. 266. № 4. С. 961–965.
17. Ткаченко Н. С., Лыгин И. В. Применение спутниковой миссии GRACE для решения геологических и географических задач // Вестн. Московского ун-та. Сер. 4. Геология. 2017. № 2. С. 3–7. DOI: 10.33623/0579-9406-2017-2-3-7.
18. Эпов М. И., Глинских В. Н., Нечаев О. В. и др. Импульсный электромагнитный мониторинг криолитозоны: математическое моделирование // Геология и геофизика. 2025. Т. 66. № 5. С. 124–130. DOI: 10.15372/GiG2024143.
19. Altamimi Z., Rebischung P., Collilieux X. et al. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions // J. Geodesy. 2023. V. 97. Article 47. DOI: 10.1007/s00190-023-01738-w.
20. Apel E. V., Bürgmann R., Steblov G. et al. Independent active microplate tectonics of northeast Asia from GPS velocities and block modeling // Geophysical Research Letters. 2006. V. 33. Iss. 11. Article L11303. DOI: 10.1029/2006GL026077.
21. Ashurkov S. V., San'kov V. A., Serov M. A. et al. Evaluation of present-day deformations in the Amurian Plate and its surroundings, based on GPS data // Russian Geology and Geophysics. 2016. V. 57. Iss. 11. P. 1626–1634. DOI: 10.1016/j.rgg.2016.10.008.
22. Bartsch A., Strozzi T., Nitze I. Permafrost monitoring from space // Surveys in Geophysics. 2023. V. 44. P. 1579–1613. DOI: 10.1007/s10712-023-09770-3.
23. Beck I., Ludwig R., Bernier M. et al. Vertical movements of frost mounds in subarctic permafrost regions analyzed using geodetic survey and satellite interferometry // Earth Surface Dynamics. 2015. V. 3. P. 409–421. DOI: 10.5194/esurf-3-409-2015.
24. Blewitt G. GPS and space-based geodetic methods // Treatise on Geophysics. V. 3: Geodesy / ed. T. A. Herring. Amsterdam; L.: Elsevier, 2007. P. 351–390.
25. Brown J., Hinkel K. M., Nelson F. E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: Research designs and initial results // Polar Geography. 2000. V. 24. P. 166–258. DOI: 10.1080/10889370009377698.
26. DeMets C., Gordon R. G., Argus D. F., Stein S. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions // Geophysical Research Letters. 1994. V. 21. Iss. 20. P. 2191–2194. DOI: 10.1029/94GL02118.
27. Duncan B. N., Ott L. E., Abshire J. B. et al. Space-based observations for understanding changes in the Arctic-Boreal Zone // Reviews of Geophysics. 2020. V. 58. Article e2019RG000652. DOI: 10.1029/2019RG000652.
28. Chorsi T. H., Meyer F. J., Dixon T. H. Toward long-term monitoring of regional permafrost thaw with satellite interferometric synthetic aperture radar // The Cryosphere. 2024. V. 18. P. 3723–3740. DOI: 10.5194/tc-18-3723-2024.
29. Gabsatarov Y. V., Vladimirova I. S. Machine learning for GNSS time series analysis in the time domain // Russian J. Earth Sciences. 2025. V. 25. Iss. 6. P. 1–21. DOI: 10.2205/2025ES001018.
30. Handbook of Global Navigation Satellite Systems / eds. Teunissen P. J. G., Montenbruck O. 1st ed. Springer Intern., 2017. 1268 p.
31. Hu Y., Wang J., Li Z., Peng J. Ground surface elevation changes over permafrost areas revealed by multiple GNSS interferometric reflectometry // J. Geodesy. 2022. V. 96. Article 56. DOI: 10.1007/s00190-022-01646-5.
32. Li Z.-C., Sun W.-B., Liang C.-X. et al. Arctic warming trends and their uncertainties based on surface temperature reconstruction under different sea ice extent scenarios // Advances in Climate Change Research. 2023. V. 14. Iss. 3. P. 335–346. DOI: 10.1016/j.accre.2023.06.003.
33. Lobkovskii L. I., Ramazanov M. M. Investigation of convection in the upper mantle connected thermomechanically with the subduction zone and its geodynamic application to the Arctic Region and North East Asia // Fluid Dynamics. 2021. V. 56. P. 433–444. DOI: 10.1134/S001546282103006X.
34. Lobkovsky L., Gabsatarov Yu., Alekseev D. et al. Geodynamic model of the interaction between the continental lithosphere and the active continental margin in East Asia // Russian J. Earth Sciences. 2022. V. 22. Iss. 1. Article ES1005. 15 p. DOI: 10.2205/2022ES000787.
35. Massonnet D., Feigl K. L. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface // Reviews of Geophysics. 1998. V. 36. P. 441–500. DOI: 10.1029/97RG03139.

36. Muskett R. R., Romanovsky V. E. Groundwater storage changes in arctic permafrost watersheds from GRACE and *in situ* measurements // Environmental Research Letters. 2009. V. 4. Article 045009. 8 p. DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045009.
37. Nikolaidis R. Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System: Ph. D. thesis. San Diego: Univ. of California, 2002. 265 p.
38. Petrovski I. G., Tsugii T. Digital satellite navigation and geophysics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2012. 328 p.
39. Semiletov I. P. Destruction of the coastal permafrost ground as an important factor in biogeochemistry of the Arctic Shelf waters // Doklady Akademii Nauk (English Translation). 1999. V. 368. Iss. 5. P. 679–682.
40. Semiletov I. P., Pipko I. I., Pivovarov N. Ya. et al. Atmospheric carbon emissions from North Asian Lakes: A factor of global significance // Atmospheric Environment. 1996. V. 30. Iss. 10–11. P. 1657–1671. DOI: 10.1016/1352-2310(95)00426-2.
41. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A. et al. (2010a) Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf // Science. 2010. V. 327. P. 1246–1250. DOI: 10.1126/science.1182221.
42. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al. (2010b) Geochemical and geophysical evidence of methane release over the East Siberian Arctic Shelf // J. Geophysical Research: Oceans. 2010. V. 115. Article C08007. DOI: 10.1029/2009JC005602.
43. Shakhova N. E., Alekseev V. A., Semiletov I. P. (2010c) Predicted methane emission on the East Siberian shelf // Doklady Earth Sciences. 2010. V. 430. P. 190–193. DOI: 10.1134/S1028334X10020091.
44. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V. et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // Philosophical Trans. A. 2015. V. 373. Article 20140451. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
45. Shen Z.-K., Jackson D. D., Ge B. X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements // J. Geophysical Research: Solid Earth. 1996. V. 101. Iss. B12. P. 27957–27980. DOI: 10.1029/96JB02544.
46. Shiklomanov N. I., Streletskiy D. A., Swales T. B., Kokorev V. A. Climate change and stability of urban infrastructure in Russian permafrost regions: Prognostic assessment based on GCM climate projections // Geographical Review. 2017. V. 107. No. 1. P. 125–142. DOI: 10.1111/gere.12214.
47. Streletskiy D. A., Sherstiukov A. B., Frauenfeld O. W., Nelson F. E. Changes in the 1963–2013 shallow ground thermal regime in Russian permafrost regions // Environmental Research Letters. 2015. V. 10. Article 125005. DOI: 10.1088/1748-9326/10/12/125005.
48. Teshebaeva K., van Huissteden K. J., Echtle H. et al. Permafrost dynamics and degradation in Polar Arctic from satellite radar observations, Yamal peninsula // Frontiers in Earth Science. 2021. V. 9. Article. 741556. DOI: 10.3389/feart.2021.741556.
49. Widhalm B., Bartsch A., Strozzi T. et al. InSAR-derived seasonal subsidence reflects spatial soil moisture patterns in Arctic lowland permafrost regions // The Cryosphere. 2025. V. 19. P. 1103–1133. DOI: 10.5194/te-19-1103-2025.
50. Yan Q., Zhang Z., Li X. et al. Time-series InSAR monitoring of permafrost-related surface deformation at Tiksi Airport: Impacts of climate warming and coastal erosion on the northernmost Siberian mainland // Remote Sensing. 2025. V. 17. Article 1757. DOI: 10.3390/rs17101757.

Satellite geodetic system for monitoring permafrost dynamics

L. I. Lobkovsky^{1,3,5}, Yu. V. Gabsatarov^{1,5}, A. G. Alekseev^{2,6},
V. G. Kryuchkov², A. A. Baranov³, I. P. Semiletov⁴

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: llobkovsky@ocean.ru

² AO Scientific Research Center "Stroitelstvo", Moscow 109428, Russia
E-mail: kryuchkov@cstroy.ru

³ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics RAS
Moscow 117997, Russia
E-mail: baranov@ifz.ru

⁴ V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia
E-mail: ipsemiletov@gmail.com

⁵ Sirius University of Science and Technology Sirius Federal Territory
Krasnodar Krai 354340, Russia
E-mail: gabsatarov.yv@talantiuspeh.ru

⁶ Moscow State University of Civil Engineering, Moscow 129337, Russia
E-mail: adr-alekseev@yandex.ru

The study is devoted to the analysis and application of satellite geodetic methods for monitoring the state of permafrost in the Arctic zone of the Russian Federation. The relevance of the research is determined by the accelerated degradation of permafrost against the background of climate change and intensive economic development of the region, which is accompanied by active construction of industrial and infrastructure facilities, development and expansion of transport corridors, and intensification of mineral resource extraction. The potential of satellite geodesy methods for remote monitoring of cryolithozone dynamics, including in near real-time mode, are considered. Specific features of interpreting satellite observations in high-latitude regions and prospects of their application in engineering risk assessment are discussed. A concept of an integrated monitoring system is presented based on a combination of geodetic data on ground surface displacements, correct choice of a reference frame, consideration of the seismotectonic features of the region, and verification of observed displacements using ground-based measurements. Implementation of this concept at the scale of the Arctic zone of the Russian Federation will significantly improve the safety of construction and operation of industrial facilities, housing, and critical infrastructure by providing early warning of hazardous geological processes caused by permafrost degradation.

Keywords: Arctic region, permafrost, satellite geodesy, monitoring system

Accepted: 21.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-27-48

References

1. Bogoyavlensky V. I., Fundamental aspects of the catastrophic gas blowout genesis and the formation of giant craters in the Arctic, *Arctic: Ecology and Economy*, 2021, V. 11, No. 1, pp. 51–66 (in Russian), DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-51-66.
2. Bondur V. G., Kuznetsova T. V., Detecting gas seeps in Arctic water areas using remote sensing data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, V. 51, Iss. 9, pp. 1060–1072, DOI: 10.1134/S0001433815090066.
3. Volkova M. S., Mikhailov V. O., Osmanov R. S., Analysing the efficiency of the global weather model HRES (GACOS) for correction of atmospheric noise in interferometric estimates of displacement fields on the example of volcanoes in Kamchatka, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 2, pp. 9–22 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-9-22.
4. Gabsatarov Yu. V., Analysis of deformation processes in the lithosphere from geodetic measurements based on the example of the San Andreas fault, *Geodynamics and Tectonophysics*, 2012, V. 3, No. 3, pp. 275–287 (in Russian), DOI: 10.5800/GT-2012-3-3-0074.

5. Gabsatarov Yu. V., Steblov G. M., Frolov D. I., The new GPS evidence for the region of Bering microplate, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2013, V. 49, No. 3, pp. 411–415, DOI: 10.1134/S106935131302002X.
6. Gerasimenko M. D., Shestakov N. V., Kolomiets A. G., *Opređenje dvizhenii i deformatsii zemnoi kory po geodezicheskim izmereniyam: uchebno-metodicheskoe posobie* (Determination of motions and deformations of Earth's crust using geodetic measurements: Textbook), Vladivostok: DVFU, 2017, 38 p. (in Russian).
7. Konvisar A. M., Mikhailov V. O., Smirnov V. B., Timoshkina E. P., Postseismic processes in the region of the July 29, 2021 Chignik earthquake, Alaska: Part I. Modeling results, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2024, V. 60, No. 4, pp. 543–553, DOI: 10.1134/S1069351324700563.
8. Kosarev N. S., Antonovich K. M., Kolmikov R. A., Chernykh D. Yu., Review of GNSS-reflectometry methods for marine topographic surface height scatterometry determination in Russian and abroad, *Vestnik SSUGT*, 2018, V. 23, No. 3, pp. 46–60 (in Russian).
9. Lobkovsky L. I., Deformable plate tectonics and regional geodynamic model of the Arctic region and Northeastern Asia, *Russian Geology and Geophysics*, 2016, V. 57, No. 3. pp. 371–386, DOI: 10.1016/j.rgg.2016.03.002.
10. Lobkovsky L. I., Possible seismogenic trigger mechanism of abrupt activation of methane emission and climate warming in the Arctic, *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, No. 3(39), pp. 62–72 (in Russian), DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-62-72.
11. Lobkovsky L. I., Baranov A. A., Bobrov A. M., Chuvaev A. V., The thermoconvective three-dimensional spherical model of modern Earth geodynamics: Application to tectonics and regional geology, *Geotectonics*, 2025, No. 1, pp. 3–20 (in Russian), DOI: 10.31857/S0016853X25010012.
12. Melnik G. E., Steblov G. M., Stability of Northern Eurasia based on satellite geodesy data, *Fizika Zemli*, 2024, No. 2, pp. 85–97 (in Russian), DOI: 10.31857/S000233724020074.
13. Mikhailov V. O., Tikhotsky S. A., Diamant M., Panet I., Gravity variations of geodynamic origin: Recognition and study on the basis of modern satellite gravity data, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2005, V. 41, No. 3, pp. 193–205.
14. Mikhailov V. O., Kiseleva E. A., Smolyaninova E. I., Dmitriev P. N., Golubeva Yu. A., Isaev Yu. S., Dorokhin K. A., Timoshkina E. P., Khairtdinov S. A., Golubev V. I., Landslide monitoring at the North Caucasus rail road using SAR data of different wavelength and corner reflector, *Geofizicheskie issledovaniya*, 2013, V. 14, No. 4, pp. 5–22 (in Russian).
15. Neradovsky L. G., Investigation of saline frozen soil properties, using a dynamic georadar method, *Kriosfera Zemli*, 2007, V. 11, No. 2, pp. 32–39 (in Russian).
16. Savostin L. A., Verzhbitskaya A. I., Baranov B. V., Modern tectonics of the Okhotsk Sea region, *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1982, V. 266, No. 4, pp. 961–965 (in Russian).
17. Tkachenko N. S., Lygin I. V., GRACE application for geological and geographical problems, *Moscow Univ. Bull. Ser. 4. Geology*, 2017, No. 2, pp. 3–7 (in Russian), DOI: 10.33623/0579-9406-2017-2-3-7.
18. Epov M. I., Glinskikh V. N., Nechaev O. V. et al., Transient electromagnetic monitoring of the cryolithozone: Mathematical modeling, *Russian Geology and Geophysics*, 2025, V. 66, Iss. 1, pp. 111–117, DOI: 10.2113/RGG20244777.
19. Altamimi Z., Rebischung P., Collilieux X. et al. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions, *J. Geodesy*, 2023, V. 97, Article 47, DOI: 10.1007/s00190-023-01738-w.
20. Apel E. V., Bürgmann R., Steblov G. et al., Independent active microplate tectonics of northeast Asia from GPS velocities and block modeling, *Geophysical Research Letters*, 2006, V. 33, Iss. 11, Article L11303, DOI: 10.1029/2006GL026077.
21. Ashurkov S. V., San'kov V. A., Serov M. A. et al., Evaluation of present-day deformations in the Amurian Plate and its surroundings, based on GPS data, *Russian Geology and Geophysics*, 2016, V. 57, Iss. 11, pp. 1626–1634, DOI: 10.1016/j.rgg.2016.10.008.
22. Bartsch A., Strozzi T., Nitze I., Permafrost monitoring from space, *Surveys in Geophysics*, 2023, V. 44, P. 1579–1613, DOI: 10.1007/s10712-023-09770-3.
23. Beck I., Ludwig R., Bernier M. et al., Vertical movements of frost mounds in subarctic permafrost regions analyzed using geodetic survey and satellite interferometry, *Earth Surface Dynamics*, 2015, V. 3, pp. 409–421, DOI: 10.5194/esurf-3-409-2015.
24. Blewitt G., GPS and space-based geodetic methods, In: *Treatise on Geophysics, V. 3: Geodesy*, T. A. Herring (ed.), Amsterdam, London: Elsevier, 2007, pp. 351–390.
25. Brown J., Hinkel K. M., Nelson F. E., The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: Research designs and initial results, *Polar Geography*, 2000, V. 24, pp. 166–258, DOI: 10.1080/10889370009377698.
26. DeMets C., Gordon R. G., Argus D. F., Stein S., Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, *Geophysical Research Letters*, 1994, V. 21, Iss. 20, pp. 2191–2194, DOI: 10.1029/94GL02118.

27. Duncan B. N., Ott L. E., Abshire J. B. et al., Space-based observations for understanding changes in the Arctic-Boreal Zone, *Reviews of Geophysics*, 2020, V. 58, Article e2019RG000652, DOI: 10.1029/2019RG000652.
28. Chorsi T. H., Meyer F. J., Dixon T. H., Toward long-term monitoring of regional permafrost thaw with satellite interferometric synthetic aperture radar, *The Cryosphere*, 2024, V. 18, pp. 3723–3740, DOI: 10.5194/tc-18-3723-2024.
29. Gabsatarov Y. V., Vladimirova I. S., Machine learning for GNSS time series analysis in the time domain, *Russian J. Earth Sciences*, 2025, V. 25, Iss. 6, pp. 1–21, DOI: 10.2205/2025ES001018.
30. *Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, Teunissen P. J. G., Montenbruck O. (eds.), 1st ed., Springer Intern., 2017, 1268 p.
31. Hu Y., Wang J., Li Z., Peng J., Ground surface elevation changes over permafrost areas revealed by multiple GNSS interferometric reflectometry, *J. Geodesy*, 2022, V. 96, Article 56, DOI: 10.1007/s00190-022-01646-5.
32. Li Z.-C., Sun W.-B., Liang C.-X. et al., Arctic warming trends and their uncertainties based on surface temperature reconstruction under different sea ice extent scenarios, *Advances in Climate Change Research*, 2023, V. 14, Iss. 3, pp. 335–346, DOI: 10.1016/j.accre.2023.06.003.
33. Lobkovskii L. I., Ramazanov M. M., Investigation of convection in the upper mantle connected thermomechanically with the subduction zone and its geodynamic application to the Arctic Region and North East Asia, *Fluid Dynamics*, 2021, V. 56, pp. 433–444, DOI: 10.1134/S001546282103006X.
34. Lobkovsky L., Gabsatarov Yu., Alekseev D. et al., Geodynamic model of the interaction between the continental lithosphere and the active continental margin in East Asia, *Russian J. Earth Sciences*, 2022, V. 22, Iss. 1, Article ES1005, 15 p., DOI: 10.2205/2022ES000787.
35. Massonnet D., Feigl K. L., Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, *Reviews of Geophysics*, 1998, V. 36, pp. 441–500, DOI: 10.1029/97RG03139.
36. Muskett R. R., Romanovsky V. E., Groundwater storage changes in arctic permafrost watersheds from GRACE and *in situ* measurements, *Environmental Research Letters*, 2009, V. 4, Article 045009, 8 p., DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045009.
37. Nikolaidis R., *Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System: Ph. D. thesis*, San Diego: Univ. of California, 2002, 265 p.
38. Petrovski I. G., Tsugii T., *Digital satellite navigation and geophysics*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2012, 328 p.
39. Semiletov I. P. Destruction of the coastal permafrost ground as an important factor in biogeochemistry of the Arctic Shelf waters, *Doklady Akademii nauk (English Translation)*, 1999, V. 368, Iss. 5, pp. 679–682.
40. Semiletov I. P., Pipko I. I., Pivovarov N. Ya. et al., Atmospheric carbon emissions from North Asian Lakes: A factor of global significance, *Atmospheric Environment*, 1996, V. 30, Iss. 10–11, pp. 1657–1671, DOI: 10.1016/1352-2310(95)00426-2.
41. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A. et al. (2010a), Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf, *Science*, 2010, V. 327, pp. 1246–1250, DOI: 10.1126/science.1182221.
42. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al. (2010b), Geochemical and geophysical evidence of methane release over the East Siberian Arctic Shelf, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2010, V. 115, Article C08007, DOI: 10.1029/2009JC005602.
43. Shakhova N. E., Alekseev V. A., Semiletov I. P. (2010c), Predicted methane emission on the East Siberian shelf, *Doklady Earth Science*, 2010, V. 430, pp. 190–193, DOI: 10.1134/S1028334X10020091.
44. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V. et al., The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice, *Philosophical Trans. A*, 2015, V. 373, Article 20140451, DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
45. Shen Z.-K., Jackson D. D., Ge B. X., Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, V. 101, No. B12, pp. 27957–27980, DOI: 10.1029/96JB02544.
46. Shiklomanov N. I., Streletskiy D. A., Swales T. B., Kokorev V. A., Climate change and stability of urban infrastructure in Russian permafrost regions: Prognostic assessment based on GCM climate projections, *Geographical Review*, 2017, V. 107, Iss. 1, pp. 125–142, DOI: 10.1111/gere.12214.
47. Streletskiy D. A., Sherstiukov A. B., Frauenfeld O. W., Nelson F. E., Changes in the 1963–2013 shallow ground thermal regime in Russian permafrost regions, *Environmental Research Letters*, 2015, V. 10, Article 125005, DOI: 10.1088/1748-9326/10/12/125005.
48. Teshebaeva K., van Huissteden K. J., Echtler H. et al., Permafrost dynamics and degradation in Polar Arctic from satellite radar observations, Yamal peninsula, *Frontiers in Earth Science*, 2021, V. 9, Article 41556, DOI: 10.3389/feart.2021.741556.

49. Widhalm B., Bartsch A., Strozzi T. et al., InSAR-derived seasonal subsidence reflects spatial soil moisture patterns in Arctic lowland permafrost regions, *The Cryosphere*, 2025, V. 19, pp. 1103–1133, DOI: 10.5194/tc-19-1103-2025.
50. Yan Q., Zhang Z., Li X. et al., Time-series InSAR monitoring of permafrost-related surface deformation at Tiksi Airport: Impacts of climate warming and coastal erosion on the northernmost Siberian mainland, *Remote Sensing*, 2025, V. 17, Article 1757, DOI: 10.3390/rs17101757.