

SOME FEATURES OF CURRENT TECHNOGENIC MOVEMENTS OF THE EARTH'S CRUST

V.Yu. Timofeev ¹✉, D.G. Ardyukov ¹, A.V. Timofeev ¹, E.V. Boyko ¹, M.G. Valitov ²,
E.N. Kalish ³, Yu.F. Stus ³, D.A. Nosov ³, I.S. Sizikov ¹

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

²Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 43 Baltiyskaya St, Vladivostok 690041, Russia

³Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. We describe the history of studying the current crustal movements by various methods and discuss technogenic effects recorded at large water-reservoir zones and mineral deposits in Siberia. Initially, classical surveying techniques aimed to obtain high-accuracy ground-based measurements of height, tilt and direction. Modern geodesy techniques and methods for measuring absolute gravity are now available to investigate displacement, deformation, tilt and other phenomena taking place on the Earth's surface. These methods are used to estimate kinematic parameters of the crust areas (e.g. rates of subsidence and horizontal movements) and to monitor fluid motions in mineral deposits. Such data are critical for ensuring a proper management of the mineral deposits. In this article, we analyse technogenic processes observed in the Ust Balyk oil-gas field, the Zapolyarny gas deposit, the water-reservoir zone at the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station (SSHPS) on the Yenisei river, and large open-pit mines in the Kuzbass basin. Our analysis is based on surface displacement rates estimated from the data collected in different periods of observations at large man-made facilities. In the study of the hydro technical objects, we estimated the displacement rates at 5.0 mm per year. In the northern areas of the West Siberian petroleum basin, subsidence rates amounted to 20–25 mm per year in the early 2000s. These estimates were supported by the high-accuracy gravity measurements showing an increase up to 6–7 microGal per year in the oil-gas field development areas. We assess a possibility of triggering effects related to weak seismicity due to a high stress accumulation rate (1 KPa per hour) in the SSHPS area. A connection between earth tides and catastrophic events, such as gas emissions in high amounts on mining sites, is discussed. Having analysed the surface monitoring records taken in South Primorye in September 2017, we conclude that underground nuclear explosions in North Korea in this period did not cause any significant displacement of the surface in this most southerly region of the Russian Far East territories.

KEYWORDS: displacement and tilt of the earth's surface; leveling; space geodesy; gravimetry; technogenic load; surface subsidence; stress accumulation rate; earthquake; trigger effect

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Vladimir Yu. Timofeev, timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Received: April 5, 2020

Revised: December 25, 2020

Accepted: January 11, 2021

FOR CITATION: Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Timofeev A.V., Boyko E.V., Valitov M.G., Kalish E.N., Stus Yu.F., Nosov D.A., Sizikov I.S., 2021. Some features of current technogenic movements of the Earth's crust. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (3s), 776–791. doi:10.5800/GT-2021-12-3s-0554

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ

В.Ю. Тимофеев¹, Д.Г. Ардюков¹, А.В. Тимофеев¹, Е.В. Бойко¹, М.Г. Валитов²,
Е.Н. Калиш³, Ю.Ф. Стусь³, Д.А. Носов³, И.С. Сизиков¹

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия

³Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 1, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе рассматриваются зарегистрированные авторами техногенные эффекты, связанные с эксплуатацией крупных водохранилищ и месторождений полезных ископаемых в Сибири. Рассмотрена история измерений смещений и деформаций и связанных с ними явлений с помощью различных методов. Начало таких исследований связано с классическими методами – нивелированием и высокоточной наклонометрией. В настоящее время мониторинг современных процессов выполняется методами космической геодезии и абсолютной гравиметрии, что позволяет как получать кинематические характеристики (скорость опускания или подъема, скорость и величину горизонтального смещения поверхности), так и отслеживать движение флюида в земной коре, а это дает возможность регулировать процесс добычи полезных ископаемых. Анализируются современные техногенные явления в районе Усть-Балыкского и Заполярного нефтегазовых месторождений Западной Сибири, в зоне водохранилища Саяно-Шушенской гидроэлектростанции (СШГЭС) и шахт Кузбасса. Представлены полученные скорости движений земной коры в зонах эксплуатации крупных техногенных объектов в отдельные эпохи измерений. По нашим наблюдениям, для гидротехнических сооружений они достигают 5 мм/год. В зоне эксплуатации нефтегазовых месторождений на севере Западной Сибири в начале 2000-х гг. скорость опускания составила 20–25 мм/год, что подтверждается высокоточными абсолютными измерениями силы тяжести, показывающими увеличение значения на 6–7 микрогал/год. Обсуждается возможность триггерного эффекта для возникновения слабой сейсмичности, связанного с высокой скоростью накопления напряжений (1 КПа/час) в зоне водохранилища СШГЭС, расположенной в Западно-Саянском регионе. В работе проанализирована связь земного прилива и техногенных событий. Результаты наблюдений, выполненных в сентябре 2017 г., свидетельствуют о том, что подземные ядерные взрывы в КНДР не приводят к значимым смещениям земной поверхности на юге Приморья.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: смещения и наклоны земной поверхности; нивелирование; космическая геодезия; гравиметрия; техногенная нагрузка; опускание земной поверхности; скорость накопления напряжений; землетрясение; триггерный эффект

1. ВВЕДЕНИЕ

Нарушения природного равновесия человеком, такие как создание больших по размерам водохранилищ, разработка месторождений полезных ископаемых, вызывают ряд сопутствующих явлений – быстрых движений земной поверхности, оползней, землетрясений и выбросов газа в угольных шахтах. Опыт подобного рода исследований в нашей стране обобщен и широко отражен в работах [Sidorov et al., 1989; Sidorov, Kuzmin, 1989; Kuzmin, 1999; Adushkin, Turuntaev, 2005; Marchuk A.N., Marchuk N.A., 2006]. При этом нивелированием были определены скорости вертикальных движений (до 70 мм/год) и предложены модели для нефтегазовых месторождений и высотных плотин. Эти вопросы освещаются и в зарубежных работах. Известны повышения сейсмичности в районе плотины Гувер, США (высота 221 м) [Bolt, 1981]. Строительство гидротехнических комплексов в Индии, Китае и Замбии приводило к землетрясениям магнитудой до 6. Известно, что в Сибири расположены крупнейшие в России по площади и напору водохранилища и плотины гидроэлектростанций

(ГЭС), что требует изучения современного деформирования земной поверхности в зоне влияния ГЭС. Использование закачки технической воды в скважины на нефтяных месторождениях в штате Колорадо в Денвере в 1962–1963 и Рейнджи в 1969–1973 гг. привело к увеличению количества регистрируемых региональных землетрясений (M от 0.5 до 4.3) [Bolt, 1981]. Откачка значительных объемов различных видов флюидов вызывает катастрофические опускания земной поверхности, например в Мексике и в Китае [Bolt, 1981]. Со временем с развитием аппаратного комплекса в исследовании техногенных процессов были добавлены высокоточные гравиметрические измерения, что позволяет отслеживать помимо движений земной поверхности и распространение флюидов в пластах земной коры. На первом этапе использовались относительные гравиметры, позволяющие проводить измерения с ошибкой 20–40 мкгал. Так, на нефтегазовом месторождении, расположенном на юге Венгрии, на гравиметрическом профиле (длина 34 км) за пять лет было зафиксировано изменение силы тяжести величиной

до +110 мкГал и опускание земной поверхности до 70 мм [Yuzefovich, 2014], что, возможно, свидетельствует о движении флюидов в пластах. Теоретический расчет смещений поверхности нефтегазового месторождения в процессе его эксплуатации является сложной задачей [Szostak-Chrzanowski et al., 2006; Baranov, Kouteny, 2018; Kuzmin, 2020]. При этом обычно ограничивались лишь изучением скоростного режима опускания земной поверхности, осредненного на многолетней временной базе. Появление методов космической геодезии [Shestakov et al., 2011; Sankov et al., 2017; Timofeev et al., 2019], абсолютной гравиметрии [Arduykov et al., 2015; Timofeev et al., 2018] и существующий опыт геодинимических исследований позволяют выходить на миллиметровый уровень непрерывного определения 3D-смещений, существенно увеличивать базу измерений и рассматривать движение флюидов в пластах. Так, в последние десятилетия появился 4D-микрोगравиметрический метод, позволяющий вести мониторинг процесса заводнения на газовой шапке коллектора месторождения на Аляске (Prudhoe Bay) [Ferguson et al., 2008]. Задачей настоящей работы является анализ техногенных эффектов в Сибири, зарегистрированных авторами в отдельные эпохи комплексом геофизических методов, интерпретация и изучение их природы.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения современных техногенных процессов в конце прошлого века в основном были использованы классические методы измерения смещений и деформаций – нивелирование и наклонометрия. Измерения наклонов земной поверхности с помощью приливных наклономеров обычно использовались в зонах строительства плотин крупных ГЭС для контроля современных деформаций [Ostrovsky, 1978; Gridnev et al., 1989]. В последние десятилетия в исследованиях используются в основном методы космической геодезии и абсолютные гравиметрические наблюдения, позволяющие получать результаты с миллиметровой точностью. С использованием обширных банков данных проводится специальный анализ для поиска периодичности в сейсмическом процессе. Полагаем, что быстрые подвижки, землетрясения и выбросы газа связаны с появлением дополнительной нагрузки различного вида на природную среду. Это может быть заполнение водохранилищ, процесс и условия разработки месторождений полезных ископаемых, приливная сила. Они могут служить триггером катастрофических явлений.

Хорошо известно использование классического геодезического метода нивелирования для регистрации техногенных эффектов, например, на Усть-Балыкском геодинимическом полигоне [Sidorov et al., 1989] или в районе плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Spiridonov, 1998].

Измерения современных смещений земной поверхности в настоящее время в основном проводятся методами космической геодезии с помощью двухчастотных геодезических приемников. Для обработки результатов

нами использована программа GAMIT-GLOBK [Herring et al., 2006a, 2006b] с опорой на постоянные станции северной части Евразии (от 10 до 40 станций международной GPS-сети IGS). Ошибка мониторинговых наблюдений зависит от условий установки антенн, продолжительности измерений и изменяется от 1 до 10 мм. При проведении наблюдений на нефтегазовых месторождениях Западной Сибири использованы реперы из обсадных труб с заглублением 10 м. К сожалению, в условиях вечной мерзлоты и неравномерного таяния и промерзания грунтов повышается ошибка измерений.

Для определения величины опускания, исследования движения флюида и изучения природы движений геодезические наблюдения дополняются гравиметрическими измерениями. В последние годы появилась возможность при измерениях использовать абсолютные гравиметры различных конструкций. Абсолютные гравиметрические наблюдения выполнялись с помощью баллистического лазерного гравиметра ГАБЛ и его модификаций [Arnautov et al., 1994; Arnautov, 2005] в специально подготовленных помещениях. Контрольные измерения проводятся в платформенной области: на специальных гравиметрических пунктах, расположенных на сейсмостанции Ключи, и в Институте автоматизации и электротехники СО РАН в г. Новосибирске. Погрешность измерения вариаций силы тяжести на этих пунктах составляет около 1–2 мкГал ($1 \text{ мкГал} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$).

Результаты астрономических и геофизических исследований позволяют в настоящее время точно рассчитывать приливную силу в любой момент времени и в любой точке Земли [Melchior, 1983; Molodensky, 1984]. Отметим, что периодическое изменение во времени взаимного расположения Луны и Солнца (на одной линии или на ортогональных линиях) приводит к изменению амплитуды приливного воздействия в три раза в течение лунного месяца. Амплитуда приливной деформации на средних широтах достигает $3 \cdot 10^{-8}$. Измерение реакции на приливную силу выполнялось нами с помощью приливных гравиметров, наклономеров и деформографов. Многолетние исследования показали, что в зонах глубинных разломов и трещин реакция увеличивается лишь на несколько процентов относительно нормального значения [Timofeev et al., 2019, 2020a, 2020b, 2020c], соответственно с такой точностью можно рассчитать приливное воздействие в отдельных регионах Земли. Для выделения периодичности в сейсмологических данных был использован метод накопления гистограмм HiCum [Van Ruymbeke et al., 2001; Gol'din et al., 2008].

Проявление воздействия приливной силы разнообразно. Так, эффекты изменения уровня или выделения воды с приливной периодичностью наблюдаются в скважинах и в пещерах. Пример таких исследований в карстовой пещере Рошфор (Бельгия) проиллюстрирован на рис. 1. Здесь получены записи приливных вариаций деформаций в области трещин и разломов. Приливные силы придают периодический характер

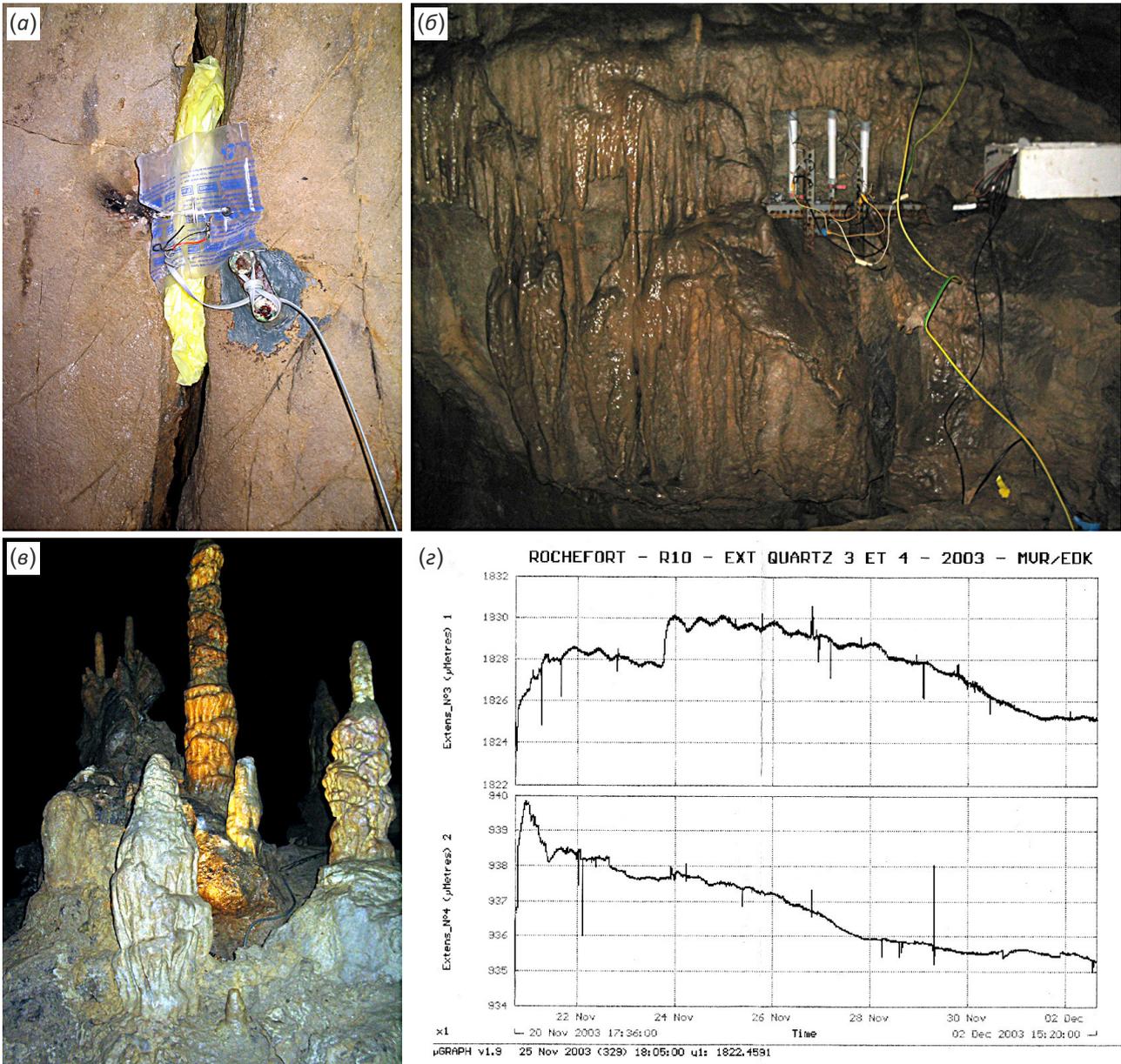


Рис. 1. Измерения в карстовой пещере Рошфор (Rochefort, Бельгия, глубина 65 м). (а) – сталактиты, сталагмиты (размеры до нескольких метров); (б) – датчики, регистрирующие периодичность капель, образующих сталактиты и сталагмиты, регистрация количества капель в единицу времени, анализ показывает приливную периодичность [Van Ruymbeke et al., 2001]; (в) – емкостной датчик смещений (база 0.1 м), установленный на трещине в разломной зоне; (г) – запись приливных вариаций деформации на трещинах, период измерений с 20.11.2003 по 2.12.2003 г.

Fig. 1. Measurements in a karst cave (Rochefort, Belgium). Depth of 65 m. (a) – stalactites and stalagmites (few meters long); (b) – sensors to record the periodicity of drops forming stalactites and stalagmites, the number of drops per unit time, and tidal periodicity [Van Ruymbeke et al., 2001]; (c) – displacement sensor (0.1 m base) installed at a fracture in the fault zone; (d) – recorded tidal variations in deformation at fractures (measurements taken from November 20, 2003 to December 02, 2003).

флюидо- и газовыделениям в почвах, в особенности в скважинах, пещерах и подземных галереях, и могут являться триггером для более мощных событий.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ В РАЙОНЕ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Изучение эффектов, связанных с эксплуатацией нефтегазовых месторождений, начато нами в 1989 г.

с наблюдений на Усть-Балыкском месторождении (Западная Сибирь, остров на р. Обь, г. Нефтеюганск), где для вытеснения нефти закачивалась вода (по объему в три раза больше извлекаемой нефти) и применяются другие методы интенсификации добычи (химические реагенты, подземные атомные взрывы). Город Нефтеюганск построен на намывном песке, расположен на территории месторождения, протянувшегося на десятки

километров. Периодические вибрации пятиэтажных зданий в городе, интерпретируемые жителями как землетрясения, вызвали необходимость исследования этих явлений. Мониторинговые исследования на Усть-Балыкском нефтегазовом месторождении (в эксплуатации 20 лет) в черте г. Нефтеюганска проводились различными методами в 1989–1992 гг. (рис. 2) силами ИГиГ СО АН СССР и Тюменской геодинимической экспедиции.

Здесь были использованы нивелирование, сейсмический метод, гравиметрическая съемка и измерения наклонов земной поверхности. Периодические нивелировки, проводимые через весь город (от берега Юганской Оби до аэропорта и другие линии) в 1990–1991 гг., показали значения годовой скорости вертикальных опусканий до 20 мм/год. Сейсмологические наблюдения из-за высокого уровня промышленных шумов в черте города не позволили определить источник сотрясений. Гравиметрические измерения выполнялись относительными гравиметрами с ошибкой 40 микрогал. Известно, что вертикальный градиент силы тяжести составляет 308 микрогал на метр и вертикальные опускания в 20 мм могут привести к вариациям в 7 микрогал, что не измеримо при ошибке 40 микрогал. Остановимся на результатах, полученных с помощью приливных кварцевых наклономеров с записью результатов на ленты самописцев. Только этот метод в тот период времени позволял проводить непрерывную

регистрацию деформации земной поверхности. Измерения проводились на постаменте в отдельно стоящем подвале глубиной 4 м (координаты пункта 61.13° с.ш., 72.70° в.д.) (рис. 2). За два года измерений выделен систематический тренд наклона на ЮВ. Азимут хода наклона параллелен руслу реки. Скорость изменений наклона в зимние месяцы составляет несколько микроградан (4.8·10⁻⁶ радиан = 1 с дуги), значительный ход отмечен в весенние месяцы – до 100 мкрад, что связано с сезонными вариациями уровня грунтовых вод. В первый год наблюдений общий ход наклона составил 350 мкрад, во второй упал до 40 мкрад. К сожалению, из-за коммерческих ограничений не удалось выяснить характер применяемых методов интенсификации добычи в отдельные годы, с которыми и могут быть связаны различия в характере движений. Наблюдались и обратные движения – резкие изменения наклонов на СЗ, что может вызывать сотрясение отдельных зданий, т.е. эффект, подобный землетрясению (рис. 2). Соотношение, связывающее наклон, величину опускания и базу изменений, записывают как

$$\psi = h / L. \tag{1}$$

Используя значение наклона ($\psi=40\text{--}350$ мкрад) и величину годовой скорости опускания земной поверхности ($h=20$ мм), получаем базу смещений в 60–500 м, что свидетельствует о локальном характере эффекта. Быстрые движения (5–10 мкрад, рис. 2), зарегистрированные

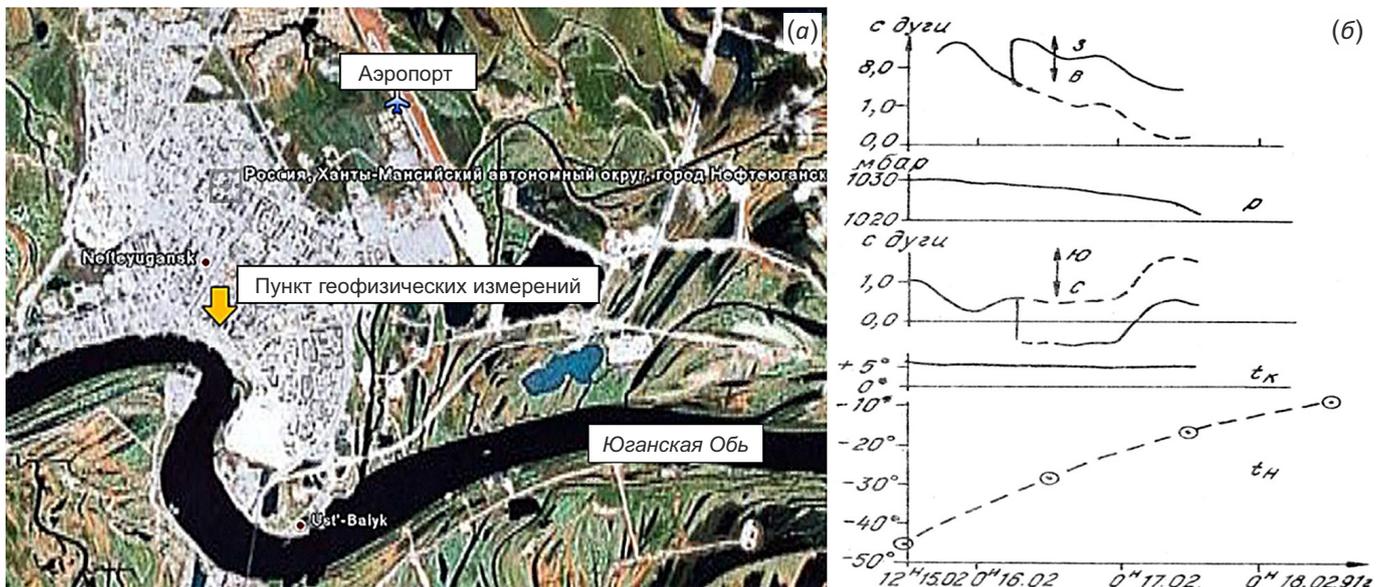


Рис. 2. Положение пункта наблюдений (а) и пример записи (б) с резким изменением наклона в двух азимутах (сверху вниз: наклон в азимуте ВЗ в секундах дуги (1 с дуги = 4.8·10⁻⁶), изменение атмосферного давления в миллибарах, наклон в азимуте СЮ, изменение температуры в камере и наружная температура в градусах).

Период измерений на представленной записи с 12 ч 15.02.1991 до 00 ч 19.02.1991 г. Профили нивелирования (от берега до аэропорта) и по улицам города составляли 2–3 км.

Fig. 2. Observation point (a), and a record (b) showing a sharp tilt change in two azimuths. From top to bottom: tilt in EW azimuth EW (1 arc second = 4.8·10⁻⁶), atmospheric pressure change (millibar), tilt in azimuth NS, temperature change in the chamber and outside temperature (degree).

Measurements from 12:00 hours on February 15, 1991 to 00:00 hours on February 19, 1991. Length of leveling profiles (from the shoreline to the airport zone, and along the city streets): 2–3 km.

наклономерами, ощущаются в зданиях города как слабое землетрясение.

Известно, что результаты повторных нивелировок на Усть-Балыкском геодинимическом полигоне детально рассмотрены в работах [Sidorov et al., 1989; Kuzmin, 1999], где было показано, что проседания шириной 500–1000 м достигают среднегодовых скоростей порядка 50–70 мм/год. Авторы связывают их с разломной структурой региона. По данным, приведенным в работе [Yuzefovich, 2014], на Уренгойском месторождении в Западной Сибири по мере отбора газа зафиксировано увеличение значения силы тяжести до 79 мкГал за семь лет (11 мкгал/год), что можно проинтерпретировать как опускание земной поверхности со скоростью 35 мм/год.

В настоящее время на нефтегазовых месторождениях Западной Сибири для определения уровня техногенных деформаций в период эксплуатации используются двухчастотные приемники космической геодезии и абсолютные гравиметры. Рассмотрим полученные

в 2006–2008 гг. изменения смещений и вариации силы тяжести в районе Заполярного газового месторождения, расположенного на севере Западной Сибири (табл. 1, рис. 3).

Комплексные исследования позволяют определить скорости вертикального опускания поверхности и оценить изменения плотности или движения флюида в земной коре. Наблюдения абсолютными гравиметрами ГАБЛ проводились на близкорасположенных пунктах с координатами 66.88° с.ш., 79.70° в.д. и высотой 50 м в помещениях с массивными постаментами. При обработке данных использованы все поправки, рекомендованные международными научными центрами (приливная, за движение полюса Земли, барическая и аппаратурные). Результаты гравиметрических измерений с ошибками и датами наблюдений приведены на рис. 4 и в табл. 2. Увеличения значений силы тяжести за год составляют 5.7–6.7 микрогал. С учетом вертикального градиента ($\gamma=308$ микрогал/м или $1/\gamma=3.2$ мм/микрогал) зависимость зарегистрированных

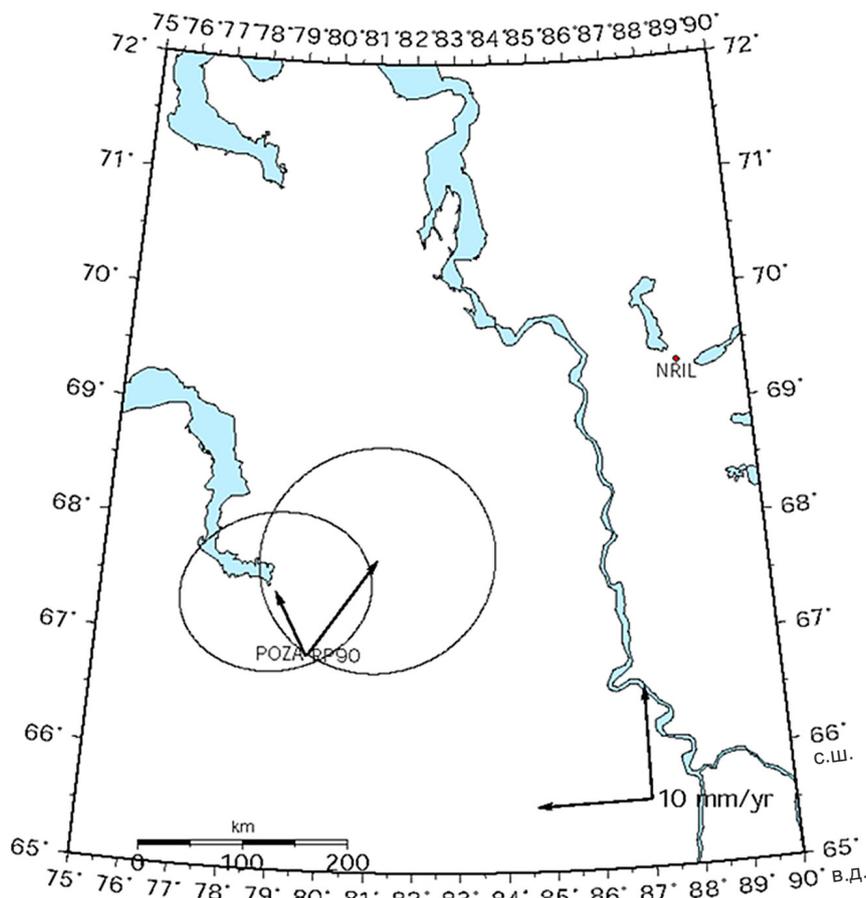


Рис. 3. Скорости горизонтальных смещений на пунктах, расположенных в районе нефтегазового месторождения (2006–2007 гг.) относительно пункта Норильск (код пункта NRIL в сети IGS).

Координатная сеть (широта и долгота) в градусах. Приведен масштаб в километрах, и стрелками показан масштаб скорости смещений в мм в год.

Fig. 3. Horizontal displacement rates at measurement points in the oil-gas field (2006–2007) relative to Norilsk (point NRIL in the IGS network).

Coordinate network (latitude and longitude) in degrees. The scale is shown in kilometers. Arrows mark the displacement rate scale (mm per year).

вариаций Δg от изменений высоты пункта наблюдений Δh записывается как

$$\Delta g = -\gamma \cdot \Delta h. \tag{2}$$

Опускание поверхности приводит к увеличению силы тяжести. Рассматривая полученные значения (см. табл. 1; табл. 2), можно отметить хорошее соответствие полученных величин нормальному вертикаль-

ному градиенту силы тяжести ($-21.5 \text{ мм}/6.7 \text{ мкГал} = -3.2 \text{ мм}/\text{микрогал}$). Таким образом, приходим к выводу, что вариации силы тяжести вызваны опусканием земной поверхности на большой площади, а значимых изменений плотности земной коры в районе месторождения не обнаружено.

При эксплуатации Заполярного месторождения выделены горизонтальные смещения от 5 до 8 мм в год

Таблица 1. Координаты пунктов измерений и скорости вертикальных движений, определенные методом космической геодезии в зоне Заполярного газового месторождения (2006–2007 гг.) относительно пункта Ключи на пунктах POZA и RP90

Table 1. Coordinates of measurement points, and vertical movement rates determined by the space geodesy technique at the Zapolyarnoye gas field (2006–2007) relative to the Klyuchi point (points POZA and RP90)

Код пункта	Широта, градусы	Долгота, градусы	Вертикальная скорость, мм/год	Ошибка, мм/год
NVSK (Ключи, Новосибирск)	54.84	83.23	0.00	0.00
POZA	66.87	79.69	-24.57	13.09
RP90	66.85	79.65	-21.50	9.27

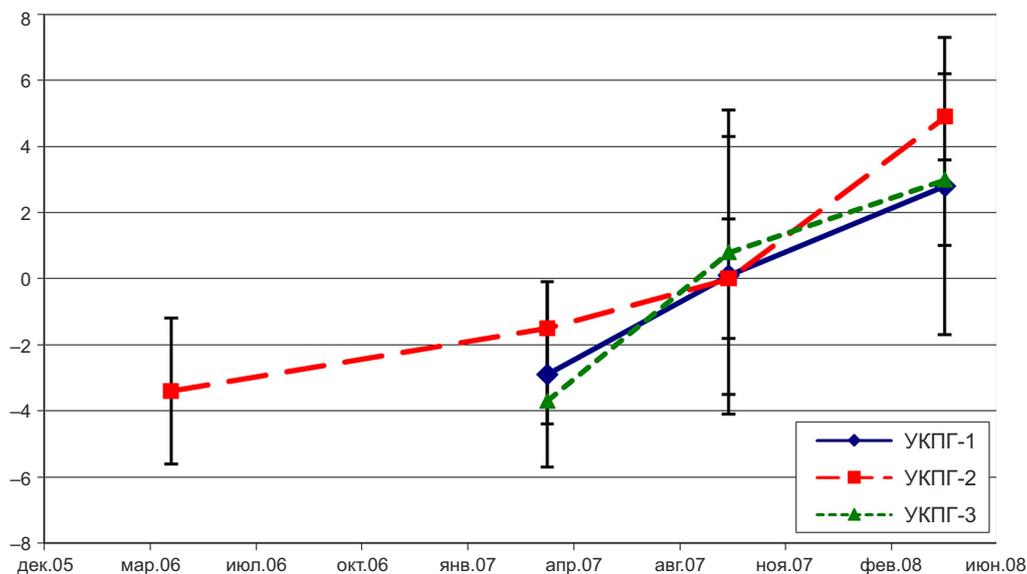


Рис. 4. Изменение значений силы тяжести на трех пунктах в районе Заполярного месторождения по наблюдениям гравиметром ГАБЛ с 2006 по 2008 г. Вертикальная шкала в микрогалах, приведены ошибки измерений.

Fig. 4. Changes in gravity values at three observation points at the Zapolyarnoye gas field, according to the records taken by a GABL absolute gravimeter (2006–2008). Vertical scale in microhals; see measurement errors.

Таблица 2. Вариации значения силы тяжести по годам (относительно средних значений по пунктам измерений) на Заполярном месторождении по измерениям с абсолютным гравиметром ГАБЛ

Table 2. Gravity variations in the Zapolyarnoye gas field by years (relative to the average values at measurement points), according to the records taken by a GABL absolute gravimeter

Код пункта	УКПГ-1	УКПГ-2	УКПГ-3
Период наблюдений	Значение с ошибкой, микрогалы	Значение с ошибкой, микрогалы	Значение с ошибкой, микрогалы
2006 год, апрель		-3.4 ± 2.2	
2007 год, апрель	-2.9 ± 2.8	-1.5 ± 1.4	-3.7 ± 0.7
2007 год, сентябрь	+0.1 ± 4.2	+0.0 ± 1.8	+0.8 ± 4.3
2008 год, апрель	+2.8 ± 4.5	+4.9 ± 1.3	+3.0 ± 2.0

Таблица 3. Скорость опускания поверхности, вызванного откачкой флюидов или добычей полезных ископаемых ([Nikonov, 1976; Kukal, 1987; Sidorov et al., 1989; Kuzmin, 1999; Yuzefovich, 2014], с дополнениями)**Table 3.** Rates of surface subsidence due to operations to pump out fluids or mining (after [Nikonov, 1976; Kukal, 1987; Sidorov et al., 1989; Kuzmin, 1999; Yuzefovich, 2014], including additional data)

Район	Вид техногенного воздействия	Скорость опускания, мм/год
Донбасс	Добыча угля	Максимальная 3
Ставрополь, землетрясения 7 баллов	Откачка газа	0.3
Апшеронский полуостров	Откачка нефти	4
Дельта реки По, включая Венецию	Откачка воды и газа	5–10
Мехико, Мексика	Откачка воды	Максимальная 70
Осака, Япония	Откачка воды	Максимальная 80
Тайбей, остров Тайвань	Откачка воды	Максимальная 100
Фресно, США	Откачка воды	500
Уилмингтон, США	Откачка нефти и газа	Максимальная 740
Усть-Балыкское месторождение, Западная Сибирь	Откачка нефти и газа	50–70
Уренгойское месторождение, Западная Сибирь	Откачка газа	35
Усть-Балыкское месторождение, Западная Сибирь, г. Нефтеюганск	Откачка нефти и газа	20
Заполярье месторождение, Западная Сибирь	Откачка газа	21–25

к северу (см. рис. 3) и значительные опускания земной поверхности, зарегистрированные двумя независимыми методами измерений (см. табл. 1; табл. 2).

В целом, можно отметить, что полученные значения вертикальных скоростей соответствуют результатам, полученным в различных регионах мира (табл. 3). Локальные опускания в зоне эксплуатации нефтегазовых месторождений Западной Сибири изменяются от 20 до 70 мм/год, горизонтальные смещения меньше в два-три раза. Зарегистрированные положительные изменения силы тяжести по измерениям относительными и абсолютными гравиметрами составляли от 5 до 11 мкгал/год. Быстрые локальные просадки грунтов, отмеченные наклономерами, могут ощущаться как слабые землетрясения.

4. НАБЛЮДЕНИЯ В ЗОНЕ ВОДОХРАНИЛИЩ И СЕЙСМИЧНОСТЬ

Известны два региона на юге Сибири, отличающиеся природной сейсмичностью, – Байкальский и Алтае-Саянский [Melnikova, Radziminovich, 1998; Sankov et al., 2017; Imaeva et al., 2017; Dobrynina et al., 2019]. Кратко остановимся на некоторых особенностях Алтае-Саянского региона. Распределение сильных землетрясений известно здесь за 250 лет (1761–1962 гг.) [Leskova, Emanov, 2013]. В южной части область включает горные территории Саян и Горного Алтая, отличающиеся высокой сейсмической активностью. В северной равнинной части области землетрясения происходили и в доиндустриальную эпоху, например Бердское землетрясение (1882 г.), Кузнецкое землетрясение в Кузбассе (1903 г.), землетрясение в Камне-на-Оби (1914 г.), но значительно реже относительно южной горной части территории. Кроме данных сейсмологии,

для этой территории известны результаты нивелирования в Горном Алтае и в Саянах. В Горном Алтае по линии Иня – Кош-Агач за период 1939–1994 гг. получены значения вертикальных скоростей смещения земной поверхности от 0.5 до 2.0 мм/год. В Западных Саянах (1949–1969 гг.) по Усинскому тракту, от Минусинской впадины до Саянских хребтов, определены значения скоростей от –11 мм/год (южная часть водохранилища Красноярской ГЭС и Минусинская впадина) до +12 мм/год (зона Саянских хребтов). На территории Сибири во второй половине XX в. построено несколько крупных ГЭС. Данные нивелирования показывают уровень вертикальных скоростей без промышленного вмешательства (Горный Алтай, 0.5–2.0 мм/год) и с учетом строительства Красноярской ГЭС (от –11 до +12 мм/год). Во втором случае высокие скорости вертикальных движений могут быть связаны с появлением водохранилища Красноярской ГЭС (площадь 2000 км², средняя глубина 36.6 м, строительство 1956–1972 гг.). Строительство плотины и водохранилища крупнейшей Саяно-Шушенской ГЭС (площадь 621 км², максимальная глубина 220 м, высота плотины 245 м) закончено в 1990 г. (рис. 5), а заполнение водохранилища проводилось с 1979 по 1991 г. [Kuskovsky, Zolotarev, 1988].

Нагрузка воды на земную поверхность в зоне водохранилища и плотины СШГЭС составляет 2.3 МПа, при этом сезонные вариации в 0.4 МПа (изменение уровня до 40 м) приводят к опусканиям поверхности у плотины СШГЭС на 4.4 мм [Stefanenko, 2010]. В целом периодическое нагружение водохранилищем земной поверхности можно рассматривать в рамках упругой модели. Зависимость вертикальных смещений (Δh) от изменения нагрузки (изменение уровня водохранилища ΔH)



Рис. 5. Плотина Саяно-Шушенской ГЭС.

(а) – верхний бьеф, высота плотины 245 м; (б) – основание плотины – нижний бьеф, на переднем плане – элемент турбины СШГЭС; (в) – август 2011 г, строительство канала для сброса воды, сооружаемого после аварии турбины СШГЭС в августе 2009 г; (г) – памятник геодезистам и строителям СШГЭС.

Fig. 5. Dam of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station (SSHPS).

(а) – headwater, dam height of 245 m; (б) – downstream, dam base (an element of the SSHPS turbine is in the foreground); (в) – construction of a water discharge channel in August 2011 (this construction was initiated after the turbine accident of August 2009); (г) – monument to surveyors and builders of the SSHPP.

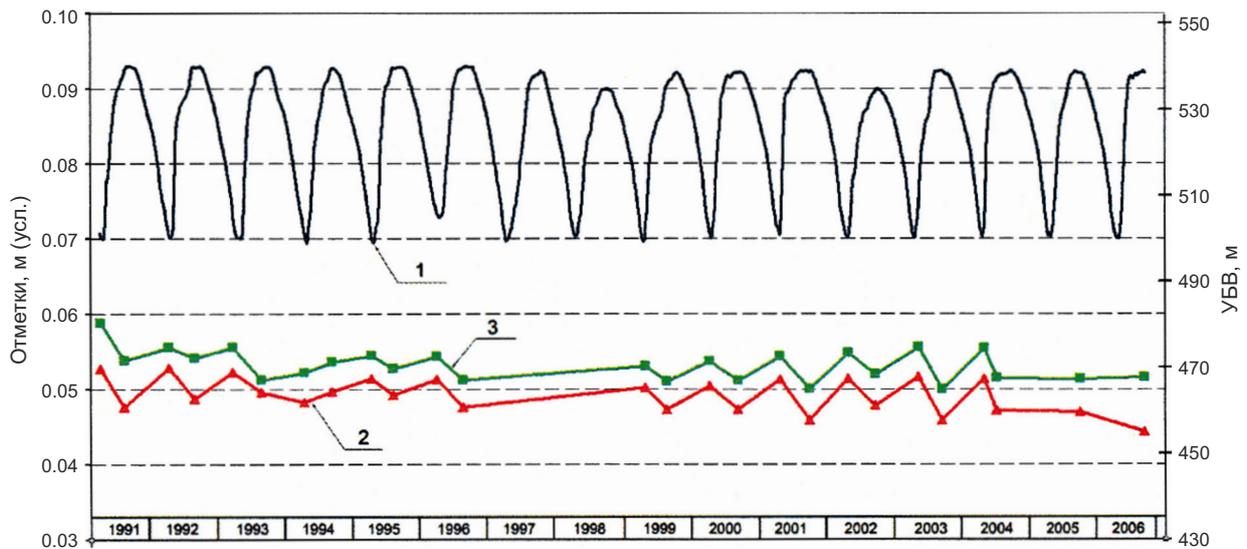


Рис. 6. Вариации уровня воды водохранилища СШГЭС на верхнем бьефе (1), изменение высоты репера у плотины СШГЭС (2) по правому берегу, изменение высоты репера у плотины СШГЭС (3) по левому берегу р. Енисей. Периодические вариации и многолетнее затухание смещений [Stefanenکو, 2010].

Fig. 6. Variations in the water level of the SSHPS water reservoir at the headwater (1). Change in the height of a reference point at the SSHPS dam on the right bank of the Yenisei river (2). Change in the height a reference point at the SSHPS dam on the left bank (3). Displacements: periodic variations and long-term decay [Stefanenکو, 2010].

в районе плотины описывается соотношением [Stefanenko, 2010]:

$$\Delta h = 0.000115 \times \Delta H \text{ (метры)}. \quad (3)$$

Согласно соотношению (3), заполнение водохранилища привело к опусканию ложа плотины на 26 мм,

с учетом вязкоупругого затухания смещений (рис. 6) полное опускание составит 30–35 мм.

Активная индустриализация Сибири в середине прошлого века началась одновременно с развитием сейсмологических наблюдений. Для поиска периодичностей в сейсмологической информации Алтае-Саянского

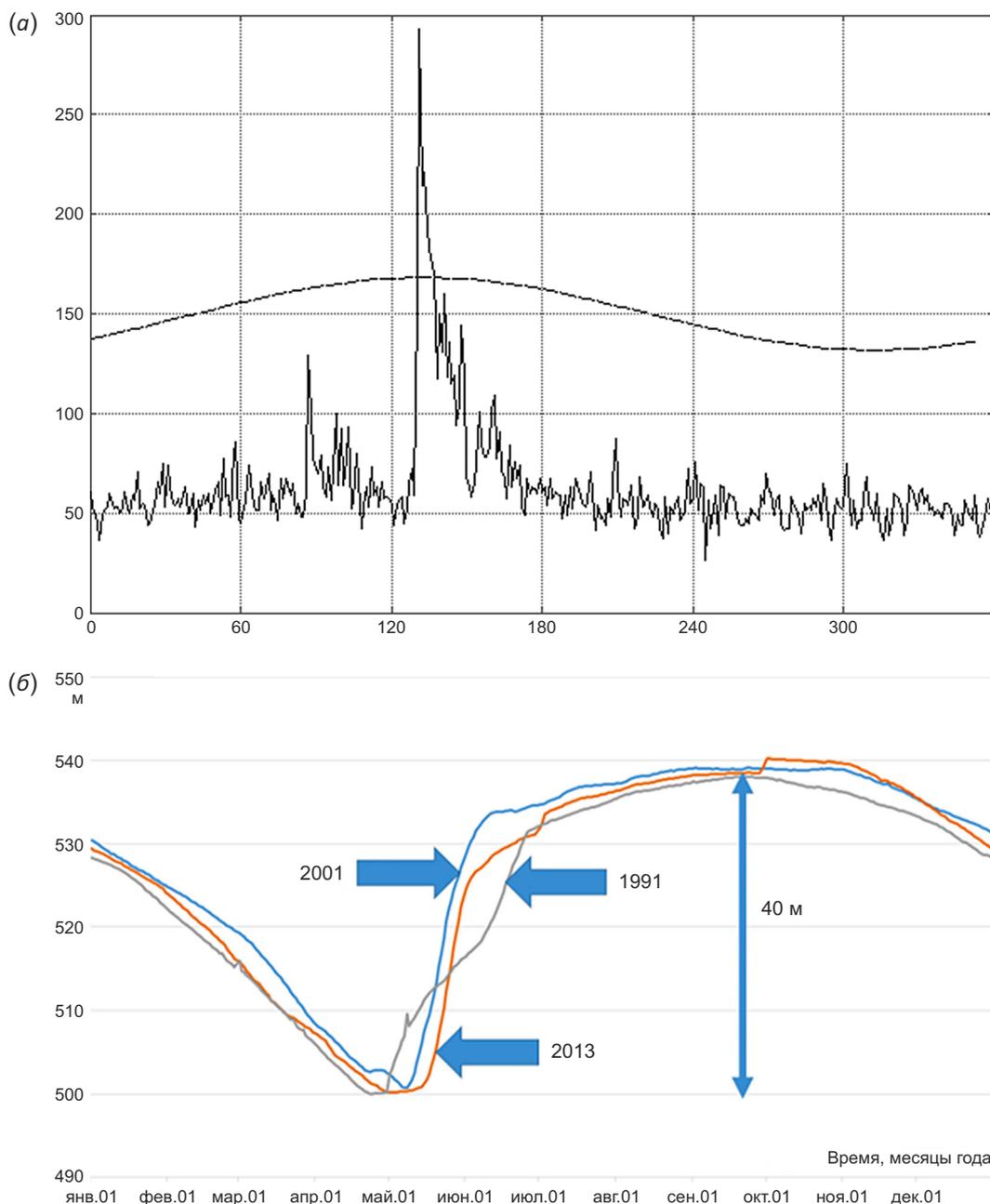


Рис. 7. Изменение в течение года количества землетрясений и уровня воды в водохранилище СШГЭС.

(а) – гистограмма распределения количества землетрясений на годовом периоде (средняя величина из анализа банка данных по сейсмичности региона, полученной из анализа по методу HiCum за период с 1970 по 2006 г.). По горизонтальной оси отложены дни с начала года. (б) – график годового изменения уровня воды водохранилища СШГЭС (верхний бьеф) в метрах за 1991, 2001 и 2013 гг. Сезонное изменение уровня достигает 40 м.

Fig. 7. Annual changes in the number of earthquakes and annual water level changes at the SSHP water reservoir.

(а) – distribution histogram of the annual number of earthquakes (average estimate based on the regional seismicity data base, using the HiCum method for the period from 1970 to 2006). Days since the beginning of the year are plotted along the horizontal axis. (б) – annual changes in the water level (m) of the SSHP water reservoir (headwater) in 1991, 2001, and 2013. A seasonal level variation amounts to 40 m.

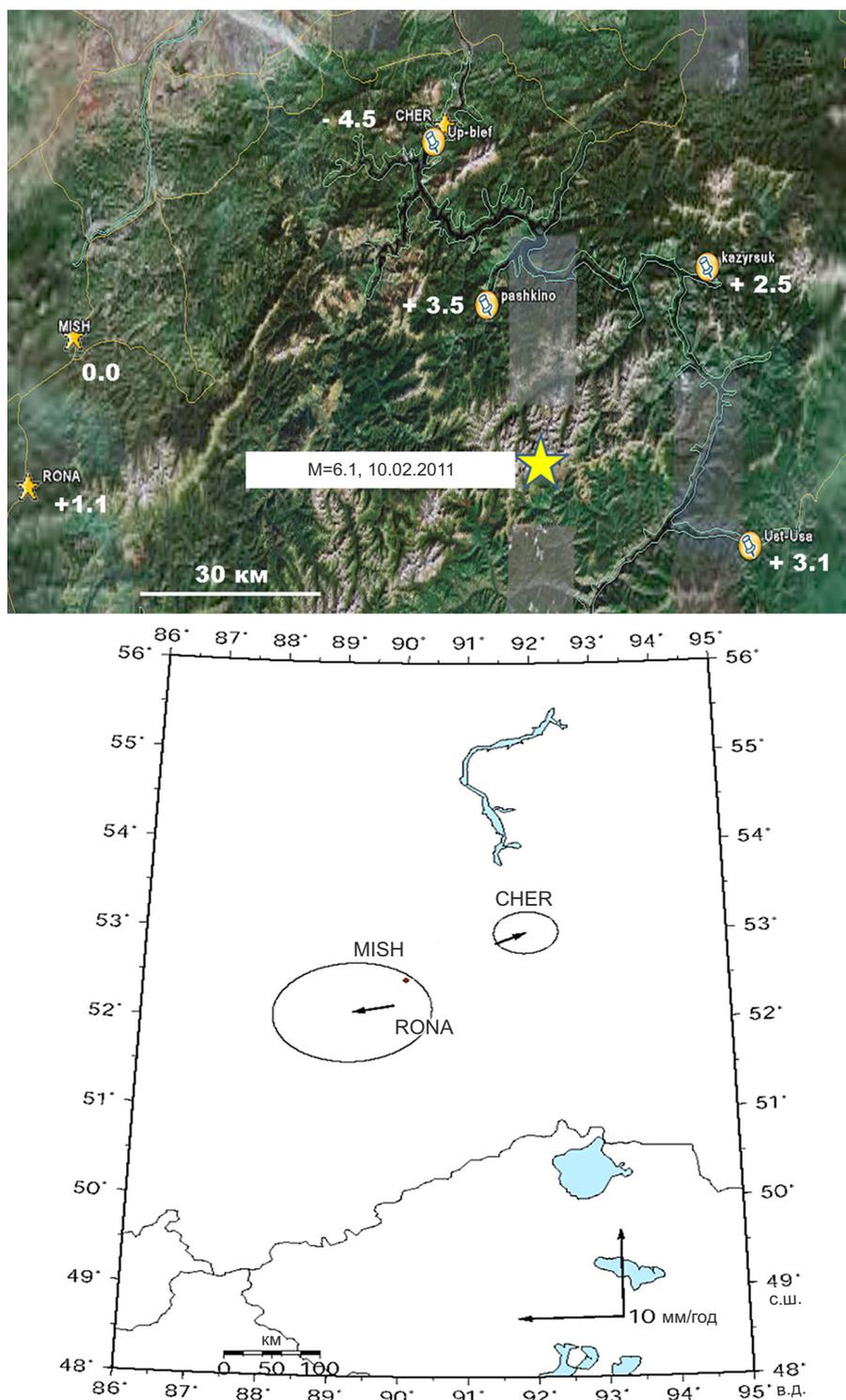


Рис. 8. Скорости современных вертикальных движений в районе водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС относительно пункта Мишиха (MISH).

Для пунктов ChER, MISH и RONA скорости определены методом GPS (2003–2011 гг.), ошибка 1 мм. Для пунктов по водохранилищу (Пашкино – Pashkino, Казырсук – Kazysuk, Усть-Уса – Ust-Usa) скорости определены методом гидронивелирования за период 1991–2006 г. Ошибка 2 мм. Приведено положение эпицентра землетрясения 10.02.2011 г. (магнитуда по Рихтеру M=6.1). Внизу показаны горизонтальные скорости смещения относительно пункта Мишиха (MISH), период наблюдений 2003–2006 гг., пункты космической геодезии расположены на северном и южном крыльях Западно-Саянского субширотного разлома.

Fig. 8. Modern vertical movement rates in the SSSRS water reservoir zone relative to the Mishikha (point MISH). For points on the water reservoir (Pashkino, Kazysuk, and Ust Usa), the rates were determined from hydraulic leveling data for 1991–2006 (2 mm error). An epicenter is shown for the February 10, 2011 earthquake (Richter M = 6.1). See below: horizontal displacement rates relative to point MISH (observations in 2003–2006); space geodesy at the northern and southern wings of the West Sayan sublatitudinal fault.

Таблица 4. Опускания земной поверхности, вызванные нагрузкой воды искусственных водохранилищ ([Nikonov, 1976; Kukul, 1987; Marchuk A.N., Marchuk N.A., 2006], с дополнениями)**Table 4.** Values of surface subsidence caused by water loading from man-made reservoirs (after [Nikonov, 1976; Kukul, 1987; Marchuk A.N., Marchuk N.A., 2006], including additional data)

Водоохранилище, период (годы)	Общее опускание, мм за период	Скорость опускания, мм/год
Озеро Мид, река Колорадо, 1935–1941	180	20
Шивайигатар, Койна, Индия, 1959–1968	80–140	12–23
Кариба, река Замбези, 1962–1968	127	3
Токтогульское, река Нарын, 1973	20–30	20–30
Красноярское, река Енисей, 1967–1971	30	6
Братское, река Ангара, 1971–1976	56	10
Саяно-Шушенское, река Енисей, 1979–1991	35	4

региона был использован спектральный анализ в форме накопления гистограмм (HiCum метод) [Gol'din et al., 2008]. Рассматривался банк данных землетрясений Западно-Саянской области (более 20 тыс. событий), включающий район водохранилища СШГЭС и окружающую его территорию, за период наблюдений с 1970 по 2006 г. Результаты анализа показали связь количества слабых землетрясений, главным образом энергетических классов 6–8 (магнитуда от 0.5 до 2.0), и режима заполнения водохранилища. Так, на рис. 7 показано распределение среднего количества землетрясений в течение года и графики сезонной разгрузки – нагружения в зоне водохранилища СШГЭС за несколько лет. Быстрое наполнение водохранилища может служить триггером для увеличения количества слабых землетрясений (минимум в три раза). При этом зарегистрирована высокая скорость накопления напряжений в зоне водохранилища (0.01 МПа/сут или до 1 КПа/ч) (рис. 7).

Скорости вертикальных движений, полученные методами космической геодезии, нивелирования и гидронивелирования в зоне водохранилища и его окружения, отличаются разной направленностью, а их величина изменяется от –4 мм/год до +4 мм/год (рис. 8), что приводит к деформации земной поверхности. В зоне влияния водохранилища (в 20 км) через 20 лет после его наполнения и эксплуатации случилось землетрясение магнитудой 6.1 (10.02.2011 г., 52.14° с.ш., 91.75° в.д.) в период быстрой разгрузки зоны водохранилища (рис. 8).

В целом, как следует из табл. 4, полученные значения скорости опускания ложа водохранилища СШГЭС находятся в хорошем согласии с данными по другим водохранилищам.

5. ПРИЛИВНЫЕ И ВЗРЫВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СРЕДУ

Известно, что приливная сила вызывает периодическое сжатие и растяжение земной коры, что сопровождается выделениями газа и флюида. Такие эффекты

наблюдались, например, в скважине Тарка Бридж (Крадок, Южная Африка) [Melchior, 1968]. Роль прилива как триггерного эффекта для землетрясений и природа его воздействия являются предметом многочисленных дискуссий [Tanka et al., 2002]. Подобные эффекты регистрируются также в областях вулканической активности. Так, в фазе высокого прилива зарегистрировано извержение вулкана Майон (Maun, координаты 13.28° с.ш., 123.51° в.д.), расположенного на севере Филиппин, на полуострове Биколь (Bicol) [Ramos et al., 1985]. Извержение сопровождалось лавовыми потоками, свечением кратера и слабыми землетрясениями.

Приливные эффекты проявляются в зоне влияния техногенных объектов выделениями газа, флюида и усилением сейсмичности. На угольных шахтах высокий уровень приливных деформаций может служить триггером для выброса метана и горных ударов. Так, на рис. 9 показан момент аварии на шахте «Ульяновская» в Кузбассе 19 марта 2007 г. Он совпадает с периодом максимального объемного сжатия горных пород в марте 2007 г. (рис. 9). Максимальный уровень сжатия горных пород вызывает максимальный выброс метана.

Существуют движения, обусловленные другими причинами, в том числе ядерными и прочими сильными взрывами. Так называемые движения третьего типа наблюдались при ядерном взрыве в Бэнэме в Неваде в декабре 1968 г., когда произошло опускание поверхности на 50 см в зоне взрыва [Bolt, 1981]. По данным мониторинговых измерений [Ardyukov et al., 2015] на мысе Шульца (юг Приморья, в 50 км к северу от границы с КНДР) при термоядерных испытаниях в КНДР в начале сентября 2017 г. значимых вариаций смещений и силы тяжести не было отмечено. На графиках (рис. 10) приведены вариации вертикальной ежесуточной координаты в первые две недели сентября для станции на мысе Шульца и в Южной Корее, практически около ее северной границы. Вариации вертикальных смещений на расстояниях 300 км от эпицентра не превысили ошибки измерений в 10 мм (рис. 10).

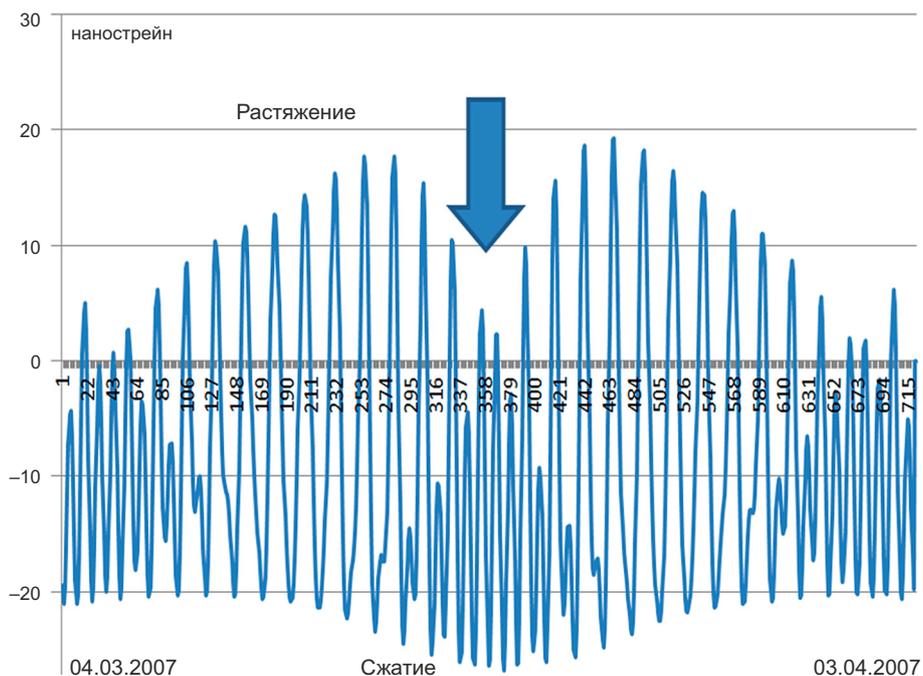


Рис. 9. Вычисленные приливные вариации объемной деформации в период с 4 марта по 3 апреля 2007 г. Стрелкой показан момент аварии (выброс метана, погибло 110 человек) 19 марта 2007 г. на шахте «Ульяновская» в Кемеровской области.

Fig. 9. Calculated tidal variations in volumetric deformation from March 04, 2007 to April 03, 2007. Arrow – accident (methane emission caused 110 fatalities) on March 19, 2007 at the Ulyanovskaya mine in the Kemerovo region.

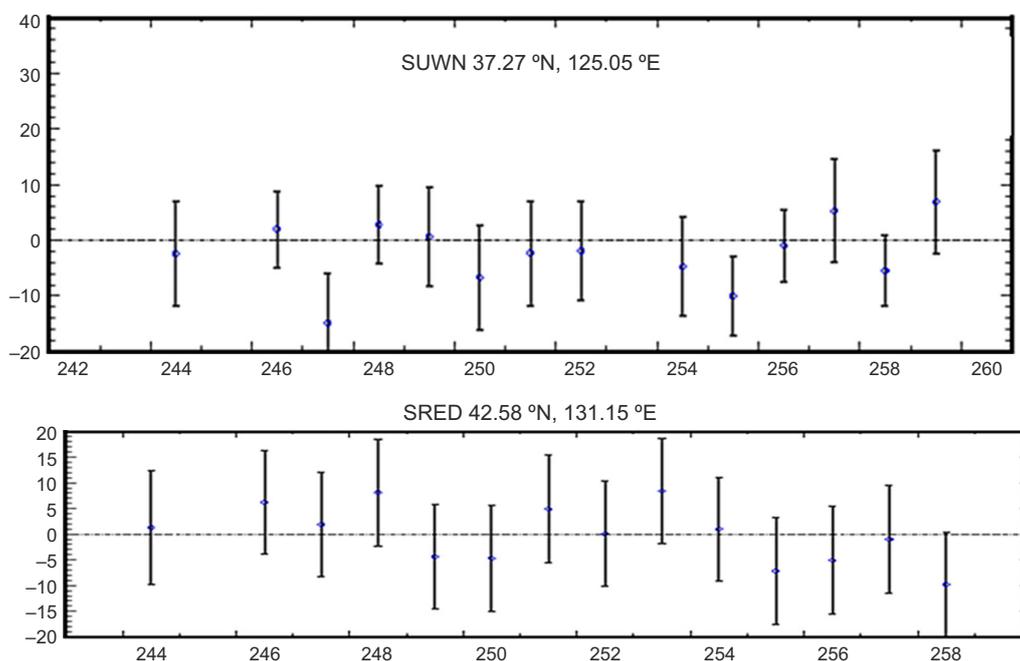


Рис. 10. Посуточные вариации вертикальных смещений земной поверхности в сентябре 2017 г. в период ядерных испытаний КНДР на пунктах SUWN (пункт международной сети IGS, Южная Корея, южнее эпицентра) и SRED (научный полигон ТОИ ДВО РАН «Мыс Шульца», РФ, севернее эпицентра). Испытания приходятся на 247-й день года (горизонтальная шкала в сутках с начала года). Приведены координаты пунктов. Вертикальная шкала в миллиметрах.

Fig. 10. Daily variations in vertical displacements at points SUWN (IGS international network, South Korea, south of the epicenter) and SRED (Shults Cape scientific polygon of Pacific Oceanological Institute FB RAS, Russia, north of the epicenter) in September 2017 during nuclear tests in DPRK. The tests were on the 247th day of the year. Coordinates of the above-mentioned points are shown. Horizontal scale (days from the year start); vertical scale (mm).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение, отметим, что нами были рассмотрены несколько видов техногенных движений. Не претендуя на полное освещение вопроса, авторы рассмотрели только движения, зарегистрированные нами в определенные эпохи и в отдельных регионах. Первые движения вызваны строительством, искусственными нагрузками на земной поверхности, примером служит сооружение искусственных водохранилищ. Вторые движения вызваны изменениями гидродинамических или гидростатических условий в земной коре. Их причиной является откачка подземных вод, нефти, газа, изменение водного уровня или горные выработки. Движения в зонах водохранилищ Сибири обычно не превышают 10 мм в год. Скорости опускания земной поверхности в зоне нефтегазовых месторождений Западной Сибири получены авторами методами космической геодезии и абсолютной гравиметрии (период 2006–2008 гг.). При этом удалось получить согласованные значения вертикальных смещений разными методами (20 мм в год). Известные источники по Западной Сибири [Sidorov et al., 1989; Kuzmin, 1999] свидетельствуют о скоростях опускания до 70 мм в год, а движения, по их мнению, отражают разломную структуру региона. Анализ зарегистрированных по различным районам мира результатов показывает, что скорости опускания земной поверхности в областях откачки воды или нефти могут достигать и более значительных величин (100–700 мм в год). Высокие скорости опускания земной поверхности могут иметь катастрофические последствия, требуют контроля условий эксплуатации и режима откачивания флюида. Анализ связи вариаций приливной силы и выделения метана показал, что наибольшая вероятность выброса газа приходится на фазу высокого прилива, т.е. приливная сила может служить триггером события. Наблюдения в зоне СШГЭС показали, что быстрое увеличение нагрузки на дно водохранилища (до 0.01 МПа/сут) приводит к увеличению количества слабых землетрясений в регионе в несколько раз. Мониторинг смещений и значений силы тяжести (сентябрь 2017 г.) показал, что подземные ядерные взрывы в КНДР не приводят к значимым смещениям земной поверхности на юге Приморья.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Adushkin V.V., Turuntaev S.B., 2005. Technogenic Processes in the Earth's Crust (Hazards and Disasters). INEK, Moscow, 254 p. (in Russian) [Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). М.: ИНЭК, 2005. 254 с.].

Arduykov D.G., Kalish E.N., Nosov D.A., Sizikov I.S., Smirnov M.G., Stus Yu.F., Timofeev V.Yu., Kulinich R.G., Valitov M.G., 2015. Absolute Gravity Measurements at Shults Cape. Gyroscopy and Navigation 3 (90), 13–18 (in Russian) [Ардюков Д.Г., Калиш Е.Н., Носов Д.А., Сизиков И.С., Смирнов М.Г., Стусь Ю.Ф., Тимофеев В.Ю., Кулинич Р.Г., Валитов М.Г. Измерения абсолютного значения ускорения

силы тяжести на мысе Шульца // Гироскопия и навигация. 2015. № 3 (90). С. 13–18].

Arnautov G.P., 2005. Results of International Metrological Comparison of Absolute Laser Ballistic Gravimeters. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing 41 (1), 126–136.

Arnautov G.P., Kalish E.N., Smirnov M.G., Stus' Yu.F., Tarasyuk V.G., 1994. Laser Ballistic Gravimeter GABL-M and Gravity Observation Results. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing 3, 3–11.

Baranov V.N., Kouteny J.A., 2018. Determination of the Surface Subsidence Profile on the Territory of Oil Production for Designing Geodesic Observations. Vestnik of SSUGT 23 (2), 5–17 (in Russian) [Баранов В.Н., Кутени Д.А. Определение профиля поверхности оседания на территории нефтедобычи при проектировании геодезических наблюдений // Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23. № 2. С. 5–17].

Bolt B., 1981. Earthquakes: Public Essay. Mir, Moscow, 256 p. (in Russian) [Болт Б. Землетрясения: Общедоступный очерк. М.: Мир, 1981. 256 с.].

Dobrynina A.A., Predein P.A., Sankov V.A., Tubanov Ts.A., Sanzhieva D.P., Gorbunova E.A., 2019. Spatial Variations of Seismic Wave Attenuation in the South Baikal Basin and Adjacent Areas (Baikal Rift). Geodynamics & Tectonophysics 10 (1), 147–166 (in Russian) [Добрынина А.А., Предеин П.А., Саньков В.А., Тубанов Ц.А., Санжиева Д.П., Горбунова Е.А. Пространственные вариации затухания сейсмических волн в Южнобайкальской впадине и прилегающих областях (Байкальский рифт) // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 1. С. 147–166]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-1-0408>.

Ferguson J.F., Klopping F.J., Chen T., Seibert J.E., Hare J.L., Brady J.L., 2008. The 4D Microgravity Method for Waterflood Surveillance: Part 3–4D Absolute Microgravity Surveys at Prudhoe Bay, Alaska. Geophysics 73 (6), 1ND–Z105. <https://doi.org/10.1190/1.2992510>.

Gol'din S.V., Timofeev V.Yu., van Raumbek M., Arduykov D.G., Lavrentiev M.E., Sedusov R.G., 2008. Tidal Modulation of Weak Seismicity in Southern Siberia. Physical Mesomechanics 11 (4), 81–93 (in Russian) [Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., ван Раумбеке М., Ардюков Д.Г., Лаврентьев М.Е., Седусов Р.Г. Приливная модуляция слабой сейсмичности для южной части Сибири // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 4. С. 81–93].

Gridnev D.G., Sarycheva Yu.K., Timofeev V.Yu., 1989. The Slopes of the Earth's Surface in the Water Reservoir Zone of the Irkutsk Hydroelectric Power Station. Russian Geology and Geophysics 3, 116–122 (in Russian) [Гриднев Д.Г., Сарычева Ю.К., Тимофеев В.Ю. Наклоны земной поверхности в районе водохранилища Иркутской ГЭС // Геология и геофизика. 1989. № 3. С. 116–122].

Herring T.A., King R.W., McClusky S.C., 2006a. GAMIT Reference Manual. GPS analysis in MIT. Release 10.3. Massachusetts Institute of Technology, USA, 87 p.

Herring T.A., King R.W., McClusky S.C., 2006b. Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program. Release 10.3. Massachusetts Institute of Technology, USA, 87 p.

- Imaeva L.P., Gusev G.S., Imaev V.S., Ashurkov S.V., Melnikova V.I., Seredkina A.I., 2017. Geodynamic Activity of Modern Structures and Tectonic Stress Fields in Northeast Asia. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 737–768 (in Russian) [Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С., Ашурков С.В., Мельникова В.И., Середкина А.С. Геодинамическая активность новейших структур и поля тектонических напряжений северо-востока Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 737–768]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0315>.
- Kukul Z., 1987. Rates of Geological Processes. Mir, Moscow, 246 p. (in Russian) [Кукал З. Скорость геологических процессов. М.: Мир, 1987. 246 с.].
- Kuskovsky V.S., Zolotarev G.S. (Eds), 1988. Formation of the Banks of the Angara-Yenisei Reservoirs. Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics of the USSR Academy of Sciences. Vol. 725. Nauka, Novosibirsk, 113 p. (in Russian) [Формирование берегов Ангаро-Енисейских водохранилищ // Труды ИГиГ АН СССР / Ред. Г.С. Золотарёв, В.С. Кусковский. Новосибирск: Наука, 1988. Вып. 725. 113 с.].
- Kuzmin Yu.O., 1999. Modern Geodynamics and Geodynamic Risk Assessment in Subsoil Use. Agency of Economic News, Moscow, 220 p. (in Russian) [Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. М.: Агентство экономических новостей, 1999. 220 с.].
- Kuzmin Yu.O., 2020. Topical Issues of Use of Geodetic Measurements at Geodynamic Monitoring of Objects of Oil and Gas Complex. *Vestnik of SSUGT* 25 (1), 43–54 (in Russian) [Кузьмин Ю.О. Актуальные вопросы использования геодезических измерений при геодинамическом мониторинге объектов нефтегазового комплекса // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25. № 1. С. 43–54]. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-1-43-54>.
- Leskova E.V., Emanov A.A., 2013. Hierarchical Properties of the Tectonic Stress Field in the Source Region of the 2003 Chuya Earthquake. *Russian Geology and Geophysics* 54 (1), 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.12.008>.
- Marchuk A.N., Marchuk N.A., 2006. Dams and Geodynamics. IPE RAS Publishing House, Moscow, 156 p. (in Russian) [Марчук А.Н., Марчук Н.А. Плотины и геодинамика. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2006. 156 с.].
- Melchior P., 1968. The Earth Tides. Mir, Moscow, 482 p. (in Russian) [Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.].
- Melchior P., 1983. The Tides of the Planet Earth. Second Edition, Pergamon Press, Oxford, 641p.
- Melnikova V.I., Radziminovich N.A., 1998. Focal Mechanisms of the Earthquakes of the Baikal Region for 1991–1996. *Russian Geology and Geophysics* 39 (11), 1598–1607 (in Russian) [Мельникова В.И., Радзиминович Н.А. Механизм очагов землетрясений Байкальского региона за 1991–1996 гг. // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 11. С. 1598–1607].
- Molodensky S.M., 1984. Tides, Nutation and the Internal Structure of the Earth. Publishing House of the Institute of the Physics of the Earth of the USSR Academy of Science, Moscow, 215 p. (in Russian) [Молоденский С.М. Приливы, нутация и внутреннее строение Земли. М.: Изд-во ИФЗ АН СССР, 1984. 215 с.].
- Nikonov A.A., 1976. Modern Technogenic Movements of the Earth's Crust. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Geological Series* 12, 135–150 (in Russian) [Никонов А.А. Современные техногенные движения земной коры // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1976. № 12. С. 135–150].
- Ostrovsky A.E., 1978. The Earth's Surface Deformations According to Tilt Observations. Nauka, Moscow, 184 p. (in Russian) [Островский А.Е. Деформации земной поверхности по наблюдениям наклонов. М.: Наука, 1978. 184 с.].
- Ramos E.G., de Torres C.B., Calderon A.C., 1985. Earth Tide Influence on the Recent Activities of Mayon Volcano. *Philippine Journal of Volcanology* 2 (1–2), 172–190.
- Sankov V.A., Parfeevets A.V., Miroshnichenko A.I., Byzov L.M., Lebedeva M.A., Sankov A.V., Dobrynina A.A., Kovalenko S.N., 2017. Late Cenozoic Faulting and the Stress State in the South-Eastern Segment of the Siberian Platform. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (1), 81–105 (in Russian) [Саньков В.А., Парфеевец А.В., Мирошниченко А.И., Бызов Л.М., Лебедева М.А., Саньков А.В., Добрынина А.А., Коваленко С.Н. Позднекайнозойское разломообразование и напряженное состояние юго-восточной части Сибирской платформы // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 1. С. 81–105]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0233>.
- Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., Takahashi H., Kasahara M., Bormotov V.A., Bykov V.G., Kolomiets A.G., Gerasimov G.N. et al., 2011. Present Tectonics of the Southeast of Russia as Seen from GPS Observations. *Geophysical Journal International* 184 (2), 529–544. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04871.x>.
- Sidorov V.A., Bagdasarov M.V., Atanasyan S.V., Burova E.G., Avramenko N.D., Aleksandrov S.I., Bogino V.A., Bulyga V.Kh., 1989. Modern Geodynamics and Petroleum Potential. Nauka, Moscow, 200 p. (in Russian) [Сидоров В.А., Багдасаров М.В., Атанасян С.В., Бурова Е.Г., Авраменко Н.Д., Александров С.И., Богино В.А., Булыга В.Х. Современная геодинамика и нефтегазоносность. М.: Наука, 1989. 200 с.].
- Sidorov V.A., Kuzmin Yu.O., 1989. Contemporary Movements of the Earth's Crust in Sedimentary Basins. Nauka, Moscow, 183 p. (in Russian) [Сидоров В.А., Кузьмин Ю.О. Современные движения земной коры осадочных бассейнов. М.: Наука, 1989. 183 с.].
- Spiridonov Yu.V., 1998. Complex of Geodetic Observations of General Movements of the Sayano-Shushenskaya Hydroelectric Power Station's Dam. *Hydro Technical Construction* 9, 55–58 (in Russian) [Спиридонов Ю.В. Комплекс геодезических наблюдений за общими перемещениями плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. 1998. № 9. С. 55–58].
- Stefanenko N.I., 2010. Improvement of the Geodetic Monitoring System for the Arch-Gravity Dam of the Sayano-Shushenskaya Hydroelectric Power Station. PhD Thesis (Candidate of Technical Sciences). Novosibirsk, 128 p. (in Russian) [Стефаненко Н.И. Совершенствование системы

геодезического мониторинга арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС: Дис. ... канд. тех. наук. Новосибирск, 2010. 128 с.].

Szostak-Chrzanowski A., Chrzanowski A., Ortiz A., 2006. Modeling of Ground Subsidence in Oil Fields. Canadian Centre for Geodetic Engineering 9, 133–146.

Tanka S., Ohtake M., Sato H., 2002. Evidence for Tidal Triggering of Earthquakes as Revealed from Statistical Analysis of Global Data. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 107 (B10). <https://doi.org/10.1029/2001JB001577>.

Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Timofeev A.V., Boiko E.V., 2019. Modern Movements of the Crust Surface in Gorny Altai from GPS Data. Geodynamics & Tectonophysics 10 (1), 123–146 (in Russian) [Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Бойко Е.В. Современные движения земной поверхности Горного Алтая по GPS-наблюдениям // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 1. С. 123–146]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-1-0407>.

Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Timofeev A.V., Boiko E.V., Kalish E.N., Stus Y.F., Nosov D.A., Sizikov I.S., 2018. Gravity and Displacement Variations in the Areas of Strong Earthquakes in the East of Russia. Izvestiya. Physics of the Solid Earth 54 (3), 430–443. <https://doi.org/10.1134/S1069351318030084>.

Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Timofeev A.V., Boiko E.V., Semibalamut V.M., Fomin Yu.N., Panov S.V., Parushkin M.D., 2020a. The Use of Strain Gauges for Studying Oscillatory

Processes in a Wide Frequency Range. Seismic Equipment 56 (1), 5–24 (in Russian) [Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Бойко Е.В., Семибаламут В.М., Фомин Ю.Н., Панов С.В., Парушкин М.Д. Применение деформографов в исследовании колебательных процессов в широком частотном диапазоне // Сейсмические приборы. 2020. Т. 56. № 1. С. 5–24]. <https://doi.org/10.21455/si2020.1-1>.

Timofeev V.Yu., Timofeev A.V., Ardyukov D.G., Boyko E.V., 2020b. Quartz Tiltmeters and Their Use in Geophysical Studies. Seismic Instruments 56, 134–151. <https://doi.org/10.3103/S0747923920020115>.

Timofeev V.Yu., Valitov M.G., Ardyukov D.G., Timofeev A.V., Ducarme B., Kulinich R.G., Kolpashchikova T.N., Proshkina Z.N., Boyko E.V., Naymov S.B., 2020c. Ocean Tidal Models and Tidal Gravity Observation. Oceanology 60 (1), 29–39. <https://doi.org/10.1134/S0001437020010221>.

Van Ruymbeke M., Beauducel Fr., Somerhausen A., 2001. The Environmental Data Acquisition System (EDAS) Developed at the Royal Observatory of Belgium. Journal of the Geodetic Society of Japan 47 (1), 40–46. <https://doi.org/10.11366/sokuchi1954.47.40>.

Yuzefovich A.P., 2014. The Field of Gravity and Its Study. Textbook. Publishing House of the Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, 194 p. (in Russian) [Юзефович А.П. Поле силы тяжести и его изучение: Учебное пособие. М.: Изд-во МИИГАиК. 2014. 194 с.].