

ПОСТОЯННАЯ СТАНЦИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ NVSK И ИСКИТИМСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Владимир Юрьевич Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-53-75, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Геннадьевич Ардюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Елена Валерьевна Бойко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-53-75, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

Антон Владимирович Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

В работе приводится обзор результатов техногенных воздействий на природные объекты. Представлены результаты измерений смещений и наклонов земной поверхности на станции Ключи (в 11 км от г. Новосибирска) в период Искитимских землетрясений 2017-2019 годов, случившихся в зоне угольных разрезов, расположенных в 50 км от г. Новосибирск и в 20 км от г. Бердск. Рассматриваются зарегистрированные эффекты, связанные со строительством и эксплуатацией водохранилищ и месторождений полезных ископаемых. На станции космической геодезии NVSK (Ключи) используется комплекс ГЛОНАСС-GPS, наклонометры и гравиметры. Подобные приборные комплексы были использованы и при сетевых измерениях. Мы представляем результаты обработки данных о смещениях и наклонах в зоне Усть-Балыкского и Заполярного нефтегазовых месторождений, в области водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС.

Ключевые слова: космическая геодезия, смещения и наклоны земной поверхности, техногенные нагрузки, смещения, деформации и землетрясения.

PERMANENT STATION OF SPACE GEODESY NVSK AND ISKITIM EARTHQUAKES

Vladimir Yu. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, 630090, Novosibirsk, 3 Akademika Koptyug Prospect., D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Dmitriy G. Ardyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, 630090, Novosibirsk, 3 Akademika Koptyug Prospect., D. Sc., Senior Researcher, phone (383)335-64-42, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Elena V. Boyko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, 630090, Novosibirsk, 3 Akademika Koptyug Prospect., D. Sc., Researcher, phone (383)335-64-42, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

Anton V. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, 630090, Novosibirsk, 3 Akademika Koptyug Prospect., D. Sc., Researcher, phone (383)335-64-42, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

We discuss technical-ecological problems. Displacement and tilt results, received at permanent station Klyuchi (11 km from Novosibirsk) during Iskitim earthquakes period, were presented for 2017-2019 yy. These earthquakes happened at Iskitim coal-mines territory, 50 km from Novosibirsk and 20 km from Berdsk. We review effects connected with building of water-reservoirs and with exploitation of deposits. Space geodesy receivers GLONASS-GPS type, tilt-meters and gravimeters were used at NVSK (Klyuchi) station. This complex was used for network measurement. We discuss the results of displacement-strain observation at Ust-Balyk gas-oil deposit, Zapolyarnii gas deposit and for water-reservoir of Sayan-Shushenskoe Electric Power Station (SSEPS).

Key words: space geodesy, displacements and tilt of earth surface, technical press, displacement-strain and earthquakes.

Появление больших по размерам водохранилищ, разработок месторождений полезных ископаемых и других технических объектов вызывает ряд сопутствующих явлений – землетрясений, оползней и опусканий земной поверхности. Известным фактом является усиление сейсмичности в районе плотины Гувер (221 м) водохранилища Мид на границе штатов Невада и Аризона, регистрируемое после заполнения водохранилища в 1935 году [1]. Оно продолжалось до землетрясения 1940 года (магнитуда по Рихтеру $M = 5$, глубина $H = 8$ км), а далее активность убывает. Через 30 лет после строительства гидротехнического комплекса Ван-Норман в южной Калифорнии произошло землетрясение в Сан-Фернандино в 1971 году, при этом, сошел крупный оползень грунта с плотины и была угроза прорыва плотины (эвакуировано 80 тысяч человек). Строительство плотин в Замбии, Индии и Китае приводило к землетрясениям магнитудой до 6, хотя исследование гидростроительства и землетрясений показало низкий уровень связи этих явлений (из 500 объектов только 4%). Возможно, сейсмические эффекты проявляются только в сейсмоактивных районах. Известно, что закачка воды в скважины на нефтяных месторождениях в штате Колорадо в Денвере в 1962-1963 гг. и Рейнджи в 1969-1973 гг. привела к увеличению количества регистрируемых региональных землетрясений (M от 0.5 до 4.3). В нашей стране в последние годы известны катастрофические события в зоне водохранилища Бурейской ГЭС (оползень 11.12.2018 объемом $24.5 \cdot 10^6$ м³ грунта). Также, регистрируются землетрясения в Кузбассе (на Бачатском угольном разрезе (19.06.2013, глубина 4 км, $M = 6.1$) и т.д.) и в Новосибирской области. Задачей работы является анализ известных видов техногенных эффектов и способов регистрации для определения их природы.

Для решения задачи обычно проводится анализ наведённой сейсмичности, связанной с индустриализацией территорий. Положение эпицентров сильных землетрясений в Алтае-Саянской области и на прилегающих территориях за 250 лет приведено на рис. 1, а [2]. На территории северной не горной части области землетрясения происходили и в доиндустриальную эпоху, но случались реже и слабее по энергии (Бердские землетрясения, землетрясения в Камне-на-Оби, землетрясения на юге Кузбасса). С 60-70-х годов прошлого столетия начата систематическая регистрация землетрясений специальными сейсмологическими экспедициями и в слабой энергетической части, к сожалению, в этот же период происходит активная индустриализация юга Сибири и задача разделения природной и техногенной сейсмичности становится трудно решаемой. Так, анализ приливной модуляции на годовом периоде по сейсмологическим данным, полученным в зоне водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС, не выявил значимых эффектов. При этом, заполнение водохранилища закончено в 1990 году, а нагрузка воды на земную поверхность в зоне водохранилища и плотины СШГЭС (245 м) составляет 2.4 МПа, при этом сезонные вариации (40 м) в 0.4 МПа приводят к опусканиям поверхности у плотины на 4.4 мм. На рис. 1, б показаны скорости вертикальных движений в зоне водохранилища и его окружения, которые отличаются разной направленностью, здесь же приведено положение землетрясения магнитудой 6.1 (10.02.2011), случившегося в 20 км от водохранилища [3].

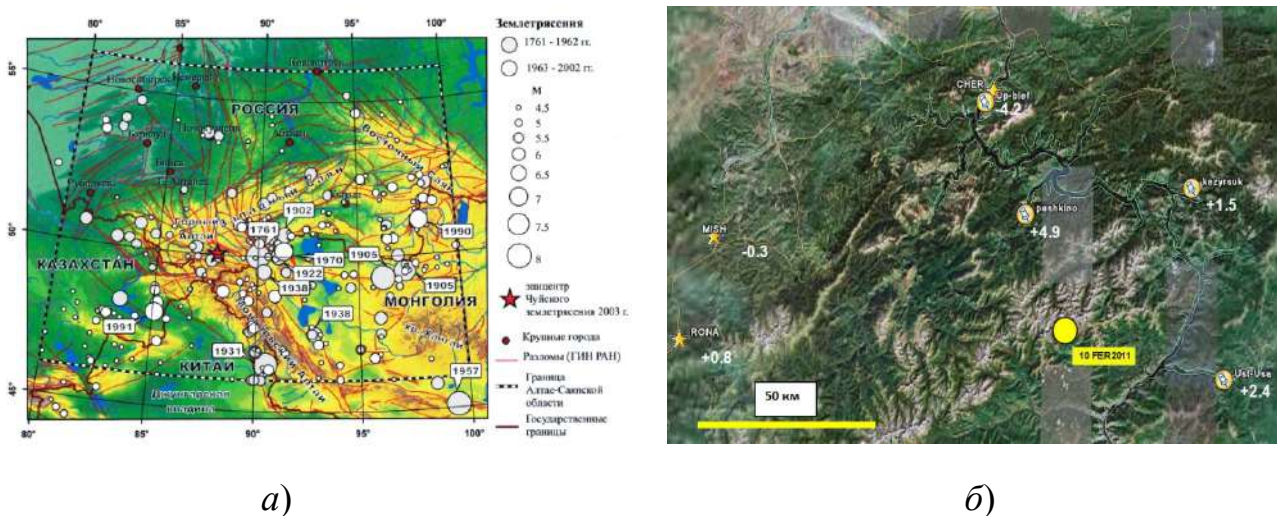


Рис. 1. а) сильные землетрясения Алтае-Саянской горной области ($M \geq 4.5$) и на окружающей территории, случившиеся за период 1761-2003 гг. [1]; б) схема Западных Саян и водохранилища с плотиной СШГЭС и рекой Енисей.

Скорости современных вертикальных движений, пунктов СHER (52.80°N, 91.42°E), MISH и RONA определены методом GPS (2003-2011 гг.). Скорости водомерных пунктов: плотина - Up-Bief, Pashkino, Kazysuk, Ust-Usa, расположенных на берегах водохранилища, определены методом гидро-нивелирования (1991-2001 гг.). Скорости в мм/год. Ошибка составляет от 1 мм до 3 мм. Приведено положение эпицентра землетрясения 10.02.2011 ($M = 6.1$)

Изучение эффектов, связанных с эксплуатацией нефтегазовых месторождений, начато нами с наблюдений на Усть-Балыкском месторождении (Западная Сибирь, остров на р. Обь), здесь для вытеснения нефти закачивается большее количество воды (в 3 раза больше получаемой нефти). Периодические вибрации зданий в г. Нефтеюганск, интерпретируемые жителями как землетрясения, вызвали необходимость исследования этих явлений. Город построен на намывном песке. Мониторинговые исследования на Усть-Балыкском нефтегазовом месторождении (20 лет в эксплуатации) в черте г. Нефтеюганска проводились различными методами в 1989-1991 гг. Здесь использованы нивелирование, сейсмический метод и измерения наклонов земной поверхности. Периодические нивелировки (от берега до аэропорта и другие линии) показали значения смещений до 20 мм, отличающиеся локальным и эклектичным характером. Наблюдения сейсмографами оказались бесполезны из-за высокого уровня шумов в черте города.

Остановимся на результатах, полученных с помощью приливных кварцевых наклономеров. Данный тип приборов используется при земно-приливных исследованиях, т.е. обеспечивает возможность измерять деформации на уровне $10^{-9} \div 10^{-10}$ или до нанорадиан [4, 5]. Приборы были установлены на специальном постаменте в отдельно стоящем подвале глубиной 4 метра, расположенном во дворе детского сада в первом микрорайоне города. За два года измерений выделен систематический тренд на Ю-В, скорость изменений в зимние месяцы составляет несколько микрорадиан, значительный ход отмечен в весенние месяцы – до 100 мкрад, что, видимо, связано с сезонными влияниями. В первый год наблюдений общий ход составил 300 мкрад, во второй упал до 30 мкрад. Наблюдалась и обратные движения - резкие изменения наклонов на СЗ. В итоге сделан вывод, локальные опускания, зарегистрированные нивелировками, и скачки наклонов ощущаются как слабое землетрясение в отдельных зданиях города. К сожалению, с 1992 года наблюдения были прекращены. Отдельные работы проводятся на нефтегазовых месторождениях в этом столетии. Сейчас используются приёмники космической геодезии и гравиметры микрогальной точности (абсолютные баллистические приборы). Так, можно привести результаты обработки данных по опусканиям в районе Заполярного месторождения (таблица). Использован программный комплекс GAMIT-GLOBK [6, 7]. Наибольшую сложность при мониторинге месторождений в Западной Сибири составляет создание стабильных реперов в условиях болот и вечной мерзлоты. Неустойчивость реперов определяет большие ошибки в определениях (см. таблицу). В целом, можно отметить, что локальные опускания в области эксплуатации нефтегазовых месторождений Западной Сибири могут достигать 20-25 мм в год.

Существование обсерватории космической геодезии и гравиметрии Ключи позволяет рассмотреть результаты измерений смещений и наклонов земной поверхности в период Искитимских землетрясений 2017-2019 годов [8], случившихся в зоне угольных разрезов в 20-40 км от Ключей (рис. 2).

Координаты пунктов измерений и скорости вертикальных движений, определённые методом космической геодезии в зоне Заполярного газового месторождения (2006-2007 гг.) относительно пункта Новосибирск

| Код пункта | Широта в градусах | Долгота в градусах | Вертикальная скорость в мм/год | Ошибка в мм/год |
|---------------------------|-------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| NVSK (Ключи, Новосибирск) | 54.84 | 83.23 | 0.00 | 0.00 |
| POZA | 66.87 | 79.69 | -24.57 | 20.52 |
| RP90 | 66.85 | 79.65 | -21.50 | 13.09 |
| POL2 (Полигон, Бишкек) | 42.68 | 74.69 | 2.09 | 9.27 |

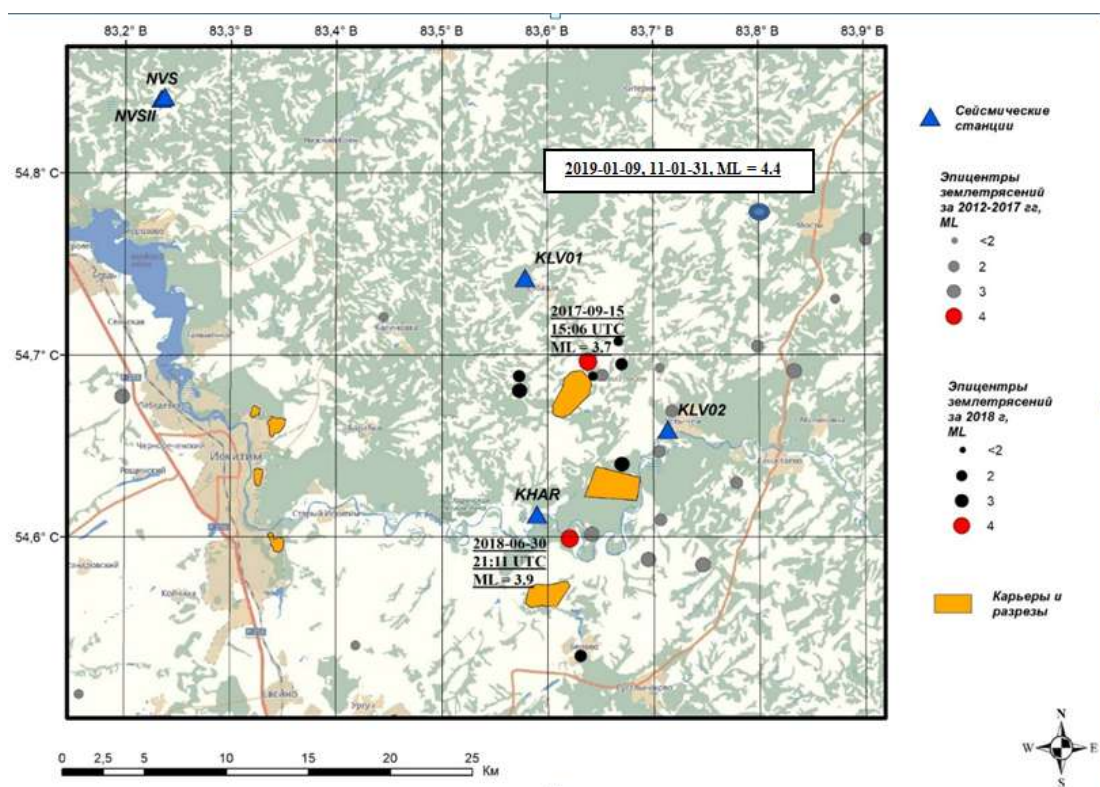


Рис. 2. Положение угольных месторождений в Искитимском районе Новосибирской области.

Станция космической геодезии, расположена на сейсмостанции Ключи (NVS). Представлены сейсмические станции [8] и землетрясения, произошедшие в районе в прошлые годы, по данным ФИЦ ЕГС

Использование на постоянной станции (NVSK, номер 12319 в международной геодинимической сети IGS) приёмника TRIMBLE 4700 с июля 2000 года до февраля 2016 года позволило определить координаты станции с точностью до долей миллиметра. В результате многолетних GPS наблюдений определены скорости горизонтальных смещений станции (-1.2 мм/год и 26.3 мм/год). Преобладает смещение станции на восток со скоростью около 3 см в год. С весны 2016 года

на станции используется приёмник TRIMBLE R7 GNSS (ГЛОНАСС-GPS). Пример записи смещений в эпоху Искитимского землетрясения с 15.06.2018 по 15.07.2018 показан на рис. 3 [9].

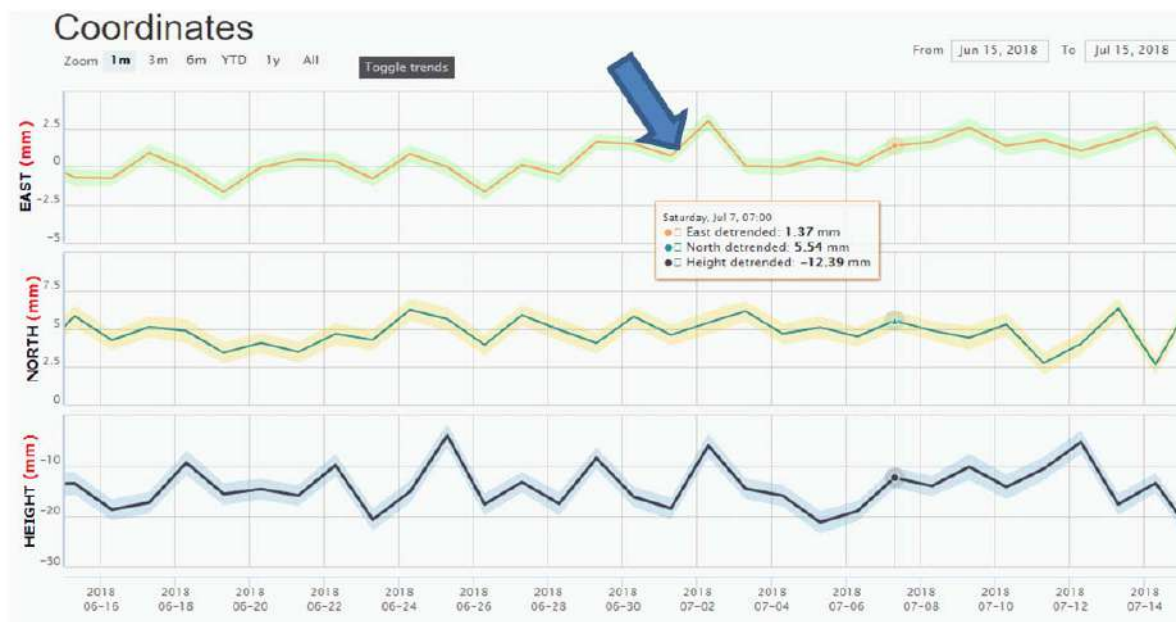


Рис. 3. 3-D смещение пункта NVSK (на В, на С и вверх) в миллиметрах в период с 00 ч. - 00 м. 15 июня по 00 ч. - 00 м. 15 июля 2018 года.

Стрелкой показан момент землетрясения: 2018-06-30, 21-11 UTC, ML = 3.9

При землетрясении 30.06.2018 косейсмические смещения зарегистрированы на уровне 1-2 мм. Такие же величины смещений отмечены при событии 09.01.2019 (ML = 4.4). Величина смещений на расстоянии 30-40 км от эпицентра соответствует результатам моделирования [10]. Для регистрации наклонов постаментов на станции Ключи использованы кварцевые приливные наклонометры [4, 5]. Ход наклона постамента на станции с 15.12.2018 по 02.02.2019 приведён на рис. 4. Здесь в период землетрясения 09.01.2019 зарегистрирован ход наклона на СВ, осложнённый скачками величиной 0.5 - 1.0 секунды дуги (2.4 – 4.8 микрорадиан). Подобного рода поведение наклонов земной поверхности отмечено на записях, полученных в г. Нефтеюганске (1989-1991 гг.).

В заключении, отметим, что нами были рассмотрены два вида техногенных движений. Первые, движения, вызванные строительством, искусственными нагрузками и разгрузками на земной поверхности, примером служит сооружение искусственных водохранилищ. И вторые, движения, вызванные изменениями гидродинамических или гидростатических условий. Причиной их является чрезмерная откачка подземных вод, нефти, газа, изменение водного уровня или горные выработки. Представленная в данной публикации информация о смещениях и деформациях, связанных с техногенным воздействием, служит лишь иллюстрацией и не претендует на полноту исследования вопроса.

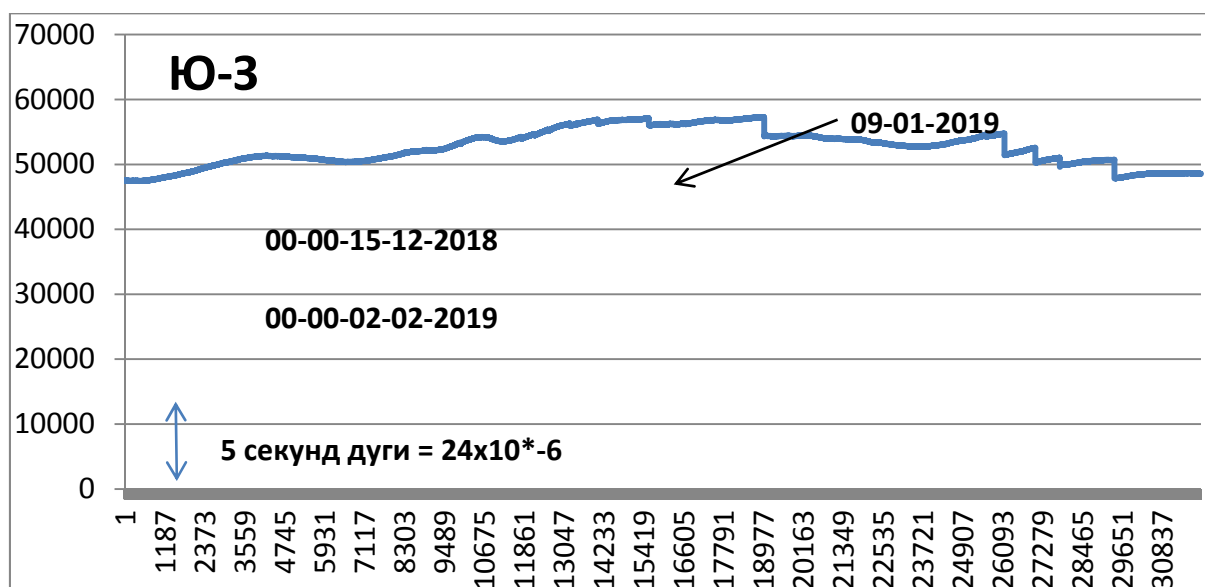


Рис. 4. Наклон постамента пункта NVSK (+ на Ю3).

Стрелкой показан момент землетрясения: 2019-01-09, 11-01-31 UTC, ($M_L = 4.4$, $H = 5$ км, $54.77^\circ N$, $83.80^\circ E$). Горизонтальная шкала времени в минутах начиная с 00 ч. 00 м. 15.12.2018 до 00 ч. 00 м. 02.02.2019. Вертикальная шкала: 1 секунда дуги = 2100 единиц по шкале. 1 секунда дуги = 4.8 микрорадиан

Для изучения и предсказания техногенных эффектов в области Искитимских угольных месторождений можно рекомендовать создание небольшой сети космической геодезии, обработка данных которой относительно постоянной станции Ключи (NVSK) позволит выходить на уровень точности до десятых долей миллиметра. Такие измерения дадут возможность уверенно регистрировать пред-сейсмические и ко-сейсмические эффекты в 3-D смещения земной поверхности для землетрясений в области Искитимских угольных месторождений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bolt В.А. Earthquakes. A primer. - San Francisco.: W. H. Freeman and Company, 1978. - 257 p.
2. Leskova E.V., Emanov A.A. Hierarchical properties of the tectonic stress field in the source region of the 2003 Chuya earthquake. // Russian Geology and Geophysics. - 2013. - Vol. 54. - issue 1. - P. 87-95. - <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.12.008>.
3. Block displacement fields in the Altai-Sayan region and effective rheologic parameters of the Earth's crust / V.Yu. Timofeev, D.G. Ardyukov, A.V. Timofeev, E.V. Boiko, B.V. Lunev // Russian Geology and Geophysics. - 2014. - Vol. 55. - issue 3. - P. 376-389.
4. Local deformation and rheological parameters by measurements in Talaya station gallery (Baikal region) / V.Yu Timofeev, O.K. Masalsky, D.G. Ardyukov, A.V. Timofeev // Geodynamics & Tectonophysics. - 2015. - №6 (2). - ISSN 2078-502X. - doi:10.5800/GT-2015-6-2-0xxx.
5. Tidal Analysis of Quartz-Tiltmeter Observations 1988-1998 at the Talaya Observatory (Baikal rift) / V.Y Timofeev, B. Ducarme, Y.K. Saricheva, L. Vandercoilden // Marees Terrestres. Bulletin D'Informations. - 2000. - № 133. - P. 10447-10458.

6. Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. GAMIT Reference Manual. GPS analysis in MIT. - Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology. : USA. - 2006-a. - Release 10.3.

7. Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. GLOBK Reference Manual. Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. - Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology. : USA. - 2006-b. - Release 10.3.

8. <http://www.ceme.gsras.ru>

9. <https://webigs.ign.fr/tfcc/en/station/NVSK/coordinates>

10. <http://quake.usgs>. - Coulomb 3. - Graphic-rich deformation & stress-change software for earthquake.

© В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, Е. В. Бойко, А. В. Тимофеев, 2019