

УДК 550.311; 622.278

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА СТЕПНОВСКОМ ПОДЗЕМНОМ ХРАНИЛИЩЕ ГАЗА МЕТОДАМИ СПУТНИКОВОЙ И НАЗЕМНОЙ ГЕОДЕЗИИ

Светлана Сергеевна Квятковская

Газпром ПХГ, 117420, Россия, г. Москва, ул. Наметкина, 12А, заместитель начальника службы главного маркшейдера, тел. (495)428-41-00, e-mail: s.kvyatkovskaya@phg.gazprom.ru

Юрий Олегович Кузьмин

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), 123242, Россия, г. Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией современной и прикладной геодинамики, тел. (499)254-65-65, e-mail: kuzmin@ifz.ru

Роман Сергеевич Никитин

Газпром ПХГ, 117420, Россия, г. Москва, ул. Наметкина, 12А, заместитель генерального директора, главный геолог, тел. (495)428-45-01, e-mail: R.Nikitin@phg.gazprom.ru

Евгений Альбертович Фаттахов

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), 123242, Россия, г. Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, младший научный сотрудник, тел. (499)254-65-65, e-mail: Fea@ifz.ru

Для рационального недропользования на подземных хранилищах газа (ПХГ) создаются геодинамические полигоны. На этих полигонах проводятся повторные геодезические (наземные и спутниковые) наблюдения за деформациями земной поверхности.

На Степновском ПХГ проведены 4 цикла повторных наблюдений, соответствующие режиму эксплуатации (закачка и отбор газа в течение 1 года). Для измерения вертикальных смещений земной поверхности применялось нивелирование 2-го класса, а горизонтальные смещения определялись с помощью ГНСС-наблюдений.

Анализ результатов нивелирных наблюдений показал наличие локальных деформаций земной поверхности в зонах разломов со скоростями относительных деформаций $2-3 \cdot 10^{-5}$ в год. Результаты измерения горизонтальных смещений выявили их неоднозначность. Из основ геомеханики следует, что горизонтальные смещения имеют значительно меньшую величину, чем вертикальные в центральной части пласта или в центре разломной зоны. Это не наблюдается во всех циклах повторных наблюдений. Предложено использовать для измерения горизонтальных смещений в зонах разломов наземные тахеометрические измерения в виде построения локальных трилатерационных сетей.

Ключевые слова: геодинамический полигон, подземное хранилище газа, наземно-космические методы измерения деформаций земной поверхности, разломная зона, трилатерационные сети.

Система наблюдений за деформацией земной поверхности (геодинамический полигон) на Степновском подземном хранилище газа создана в соответствии с «Проектом геодинамического полигона для наблюдений за деформацией земной поверхности в пределах Степновского ПХГ», разработанным в 2010 г.

ЗАО «Научно-производственный центр «ПромНедраЭксперт» согласно требованиям РД 07-603-03 «Инструкция по производству маркшейдерских работ» [1, 2].

В соответствии с проектными решениями в декабре 2011 – январе 2012 гг. по трем профилным линиям заложены 60 пунктов геодинимического полигона, представляющих собой 56 грунтовых реперов тип 162 оп. знак и 4 фундаментальных репера тип 160 оп. знак. Задачей наблюдений являлось определение планово-высотного положения реперов для дальнейшего определения величин горизонтальных и вертикальных смещений земной поверхности. Данный геодинимический полигон можно отнести к геодезическим сетям специального назначения [3, 4].

В соответствии с проектными решениями горизонтальные смещения измерялись спутниковой двухчастотной GPS/ГЛОНАСС-аппаратурой, а вертикальные – методом геометрического нивелирования II класса. Все используемое геодезическое оборудование сертифицировано и прошло поверку в метрологической службе ФГУ «СЦС им. Б. А. Дубовикова» и ФГУ Ростест–Москва.

Для проведения работ на полигоне использовался комплект двухчастотной спутниковой GPS/ГЛОНАСС аппаратуры Sokkia GSR 2700 ISX, Sokkia GRX1, в состав которого входили восемь приемников с оборудованием, необходимым для выполнения полевых работ. Обработка данных измерений выполнялась в программном пакете Spectrum Survey Office v.7.5. Все измерения проводились в режиме классической статики с 10-секундным интервалом накопления данных.

После обработки данных и определения координат всех пунктов в геоцентрической прямоугольной системе координат WGS-84 осуществлялся их перевод в государственную систему координат СК-95. При измерениях использовалось максимально возможное число одновременно работающих GPS-приемников (8 шт.).

Определение планового положения пунктов геодинимического полигона в каждом цикле производилось от четырех исходных пунктов государственной геодезической сети (ГГС): «Советский», «Буденовка», «Канал» и «Мечетка» (рис. 1).

Предварительная камеральная обработка данных заключалась в определении приращений геоцентрических координат каждого определяемого пункта по отношению к базовой станции. Определение указанных приращений автоматически производилось в процессе компьютерной обработки с выдачей результата в виде геоцентрических координат определяемых пунктов. По завершению предварительной обработки определяемые пункты создаваемой сети имели координаты только в системе WGS84.

Окончательная обработка заключалась в переводе (трансформации) координат пунктов создаваемой сети из системы WGS84 в государственную систему координат СК-95. Трансформация выполнялась с помощью четырех исходных пунктов ГГС с известными координатами, которые использовались при выполнении первого цикла наблюдений в качестве трансформационных после оценки их качества (погрешностей взаимного положения).

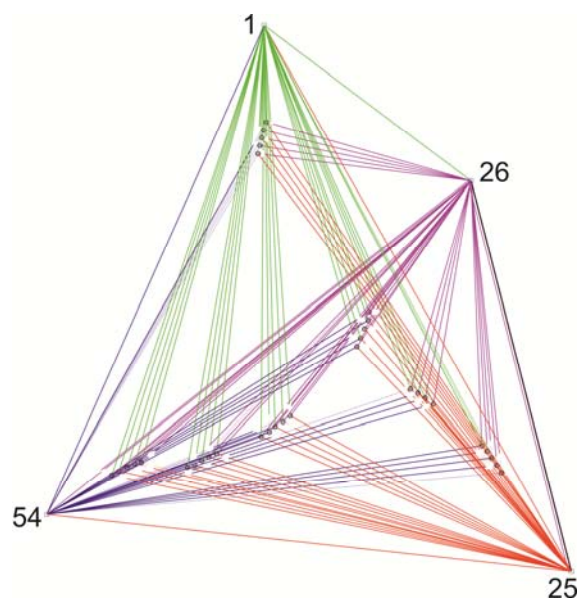


Рис. 1. Схема выполнения GPS-наблюдений на геодиническом полигоне Степновского ПХГ. Разным цветом показано одновременное взятие отсчетов с четырех фундаментальных реперов

В связи с наличием в съёмочной сети трех узловых реперов работы по высокоточному нивелированию были организованы в виде проложения восьми нивелирных ходов: одного, замкнутого на пункт ГГС «Мечетка» протяженностью 27,6 км, по фундаментальным реперам, и семи нивелирных ходов между парами «узловой репер – фундаментальный репер» и «узловой репер – узловой репер».

Для выполнения высокоточного нивелирования был использован цифровой нивелир Leica DNA03 со средней квадратической погрешностью определения превышения на 1 км двойного хода 0,3 мм и инварные трехметровые штрих-кодовые рейки с круглыми уровнями.

После производства нивелирных измерений в каждом цикле вычислялись средние квадратические, случайные и систематические погрешности и производилось их сравнение с допустимыми погрешностями. Уравнивание системы нивелирных ходов с несколькими узловыми точками было выполнено методом последовательных приближений. В результате камеральной обработки в каждом цикле наблюдений были получены отметки реперов профильных линий.

На геодиническом полигоне Степновского ПХГ было проведено четыре цикла наблюдений в течение двух лет. Первый цикл наблюдений приходится на окончание нейтрального периода после отбора газа, остальные три цикла наблюдений приурочены к нейтральным периодам после закачки газа в хранилище.

Анализ результатов высокоточных нивелирных наблюдений

Анализ и интерпретация повторных нивелирных наблюдений сводится к реализации двух взаимодополняющих процедур: построению «эволюционных»

и «пульсационных» графиков изменения превышений вертикальных отметок реперов и морфолого-генетическому анализу выявленных аномалий вертикальных движений земной поверхности.

Известно, что результаты повторных геодезических (нивелирных) наблюдений обычно представляются в виде набора профильных графиков, которые отображают зависимость $\delta\Delta h = f(L, \delta t)$, где L – длина профиля, а δt – интервал между повторными наблюдениями.

Мониторинговая информация, как правило, отображается в двух вариантах: эволюционном и пульсационном. В первом варианте все изменения вертикальных смещений земной поверхности определяются вычитанием текущих значений превышений от значений, полученных при первом наблюдении, т. е. 2–1, 3–1, 4–1 и т. д. В этом случае прослеживается временная динамика (эволюция) поведения земной поверхности, когда каждая эпоха характеризует смещения (итоговые), накопленные к данному моменту времени. Во втором случае используются разности между смежными эпохами 2–1, 3–2, 4–3 и т. д. В этом случае имеется возможность выявлять периоды возникновения (пульсаций) современных вертикальных движений и определять длительность протекания аномального процесса. В результате совместного анализа двух представлений удастся полностью охарактеризовать пространственно-временные характеристики современных геодинамических процессов [5].

Конфигурация измерительной сети представляет собой два протяженных профиля (1 и 2), которые пересекают территорию ПХГ, и локальный профиль (3), который пересекает разломную зону. Таким образом, анализу было подвергнуто четыре цикла нивелирных наблюдений и, следовательно, три временных интервала вертикальных смещений.

Профиль 1

На рис. 2 представлены результаты повторного нивелирования вдоль профиля 1, которые совмещены с местоположением разломных зон, выявленных по геолого-геофизическим данным, по методике, которая применяется для палеогеодинамического анализа локальных поднятий платформенных областей, характерных для мест организации ПХГ [6, 7].

Как известно, для анализа циклических процессов целесообразнее использовать пульсационные кривые, поскольку именно они позволяют выявлять знакопеременную составляющую движений. Вместе с тем, эволюционные графики позволяют определять накопленную деформацию.

Первое, на что следует обратить внимание, – это отсутствие знакопеременных изменений смещений земной поверхности вдоль всего профиля. Если считать, что ошибка нивелирования II класса составляет величину 2–3 мм, то незначительные изменения в 1–2 мм являются непредставительными. Однако, если учитывать короткие расстояния (200–500 м), на которых выявлены аномальные деформации в разломных зонах, то для этих случаев среднеквадратическая

случайная погрешность будет иметь величину около 1 мм. Именно величины в 1 мм и более далее будут приниматься за истинные смещения.

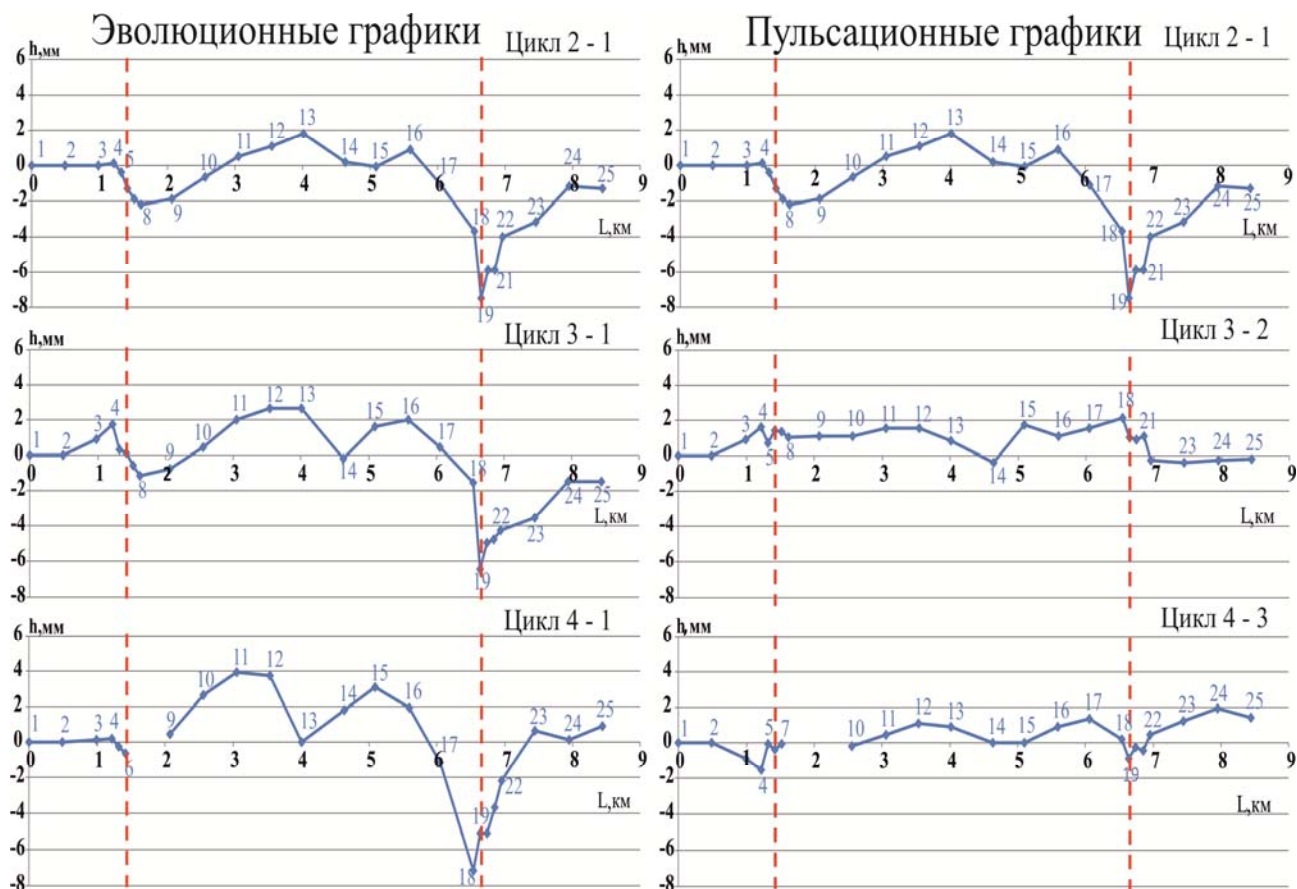


Рис. 2. Результаты повторных нивелирных наблюдений на профиле 1, представленные в «эволюционной» и «пульсационной» формах. Красным пунктиром отмечены разломные зоны

На профиле отчетливо видны три аномалии вертикальных движений. При этом, если идентифицировать аномалии слева направо, то первая и третья аномалии приурочены к зонам разломов, а вторая – нет.

Если обратиться к эволюционному графику, то очевидно, что наиболее интенсивная аномалия с амплитудой 11 мм (в окрестностях реперов № 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23) выявлена в период между циклами 4 и 1. В предыдущих циклах эта аномалия развивалась. При этом характерно, что ширина аномалии в цикле 2–1 составляла 0,5 км и имела амплитуду 4 мм. Характерно, что эта аномалия полностью уместилась в границах зоны разлома. В цикле 3–1 она расширялась и увеличила свою амплитуду до 7 мм.

Данный тип аномалии полностью соответствует представлениям о техногенно-индуцированных деформациях разломных зон. Морфологически эта аномалия представляет собой пикообразное, локальное оседание земной поверхности. Подобный «пикообразный» тип аномалий в разломных зонах ши-

роко распространен. Он получил название «аномалия типа гамма», так как по форме напоминает соответствующую букву греческого алфавита – γ [8].

Как правило, для этих аномалий характерны пикообразные оседания в окрестностях разлома. Уровень относительных среднегодовых деформаций для этой аномалии составляет около $2,1 \cdot 10^{-5}$ в год. Такой уровень скоростей относительных деформаций позволяет отнести данный участок разломной зоны к категории опасного разлома [9, 10].

Если обратиться к анализу пульсационного графика, то видно, что эта аномалия вертикальных движений земной поверхности меняет знак в период между 3-м и 2-м циклами измерений. Однако величина этого знакопеременного изменения находится на уровне среднеквадратической погрешности измерений II класса нивелирования. Это относится и к аномалиям 1 и 2. Их накопленные амплитуды не превосходят по величине двукратную ошибку измерений.

Профиль 2

Анализ результатов повторного нивелирования вдоль профиля 2 (рис. 3) показал, что практически все аномальные смещения земной поверхности, которые либо незначительно, либо существенно превышают ошибки измерений, приурочены к выявленным по результатам геофизики разломным зонам. Исключение составляет аномалия, которая расположена в крайней правой стороне графика с центром в районе репера № 27.

Нумеруя, как и для предыдущего профиля, аномалии слева направо, можно отметить, что практически все аномальные изменения имеют знакопеременный характер. Рассматривая динамику изменений амплитуды аномалии № 1, которая расположена в окрестностях реперов № 51, 50, 49, 48, можно отметить влияние знакопеременного характера смещений на итоговую, накопленную амплитуду в цикле 4–1. В период между циклами 2–1 ее амплитуда составляет величину 3 мм, затем, в период 3–2, за счет знакопеременности движений ее амплитуда выросла всего на 1,8 мм. Затем, в цикле 4–3, она увеличилась на 1 мм. Накопленная амплитуда составляет величину порядка 4 мм. Учитывая малую ширину аномалии (200 м), можно отметить, что среднегодовая скорость относительных деформаций составляет величину порядка $4 \cdot 10^{-5}$ в год. Что позволяет характеризовать данную разломную зону как опасную.

Аномалия № 2 характеризуется четкими знакопеременными смещениями с амплитудами около 2–3 мм. Итоговая накопленная величина смещений земной поверхности у этой аномалии имеет небольшую величину – 4 мм. Но, учитывая, что ширина аномалии равна 0,6 км, ее относительная среднегодовая деформация равна всего $8 \cdot 10^{-6}$ в год. Поэтому этот разлом является активным, но не опасным за весь период инструментальных наблюдений.

Аномалия № 3 также имеет пульсационный знакопеременный характер. Амплитуды знакопеременных импульсов составляют величины около 1–1,5 мм, что при ширине аномалии в 0,5 км даст уровень относительных среднегодовых

деформаций, равный всего $5 \cdot 10^{-6}$ в год. Поэтому интенсивность современной деформационной активности данного разлома не позволяет отнести его к категории опасных разломов.

Аномалия № 4 морфологически выглядит как «двойная» аномалия, приуроченная к одной разломной зоне.

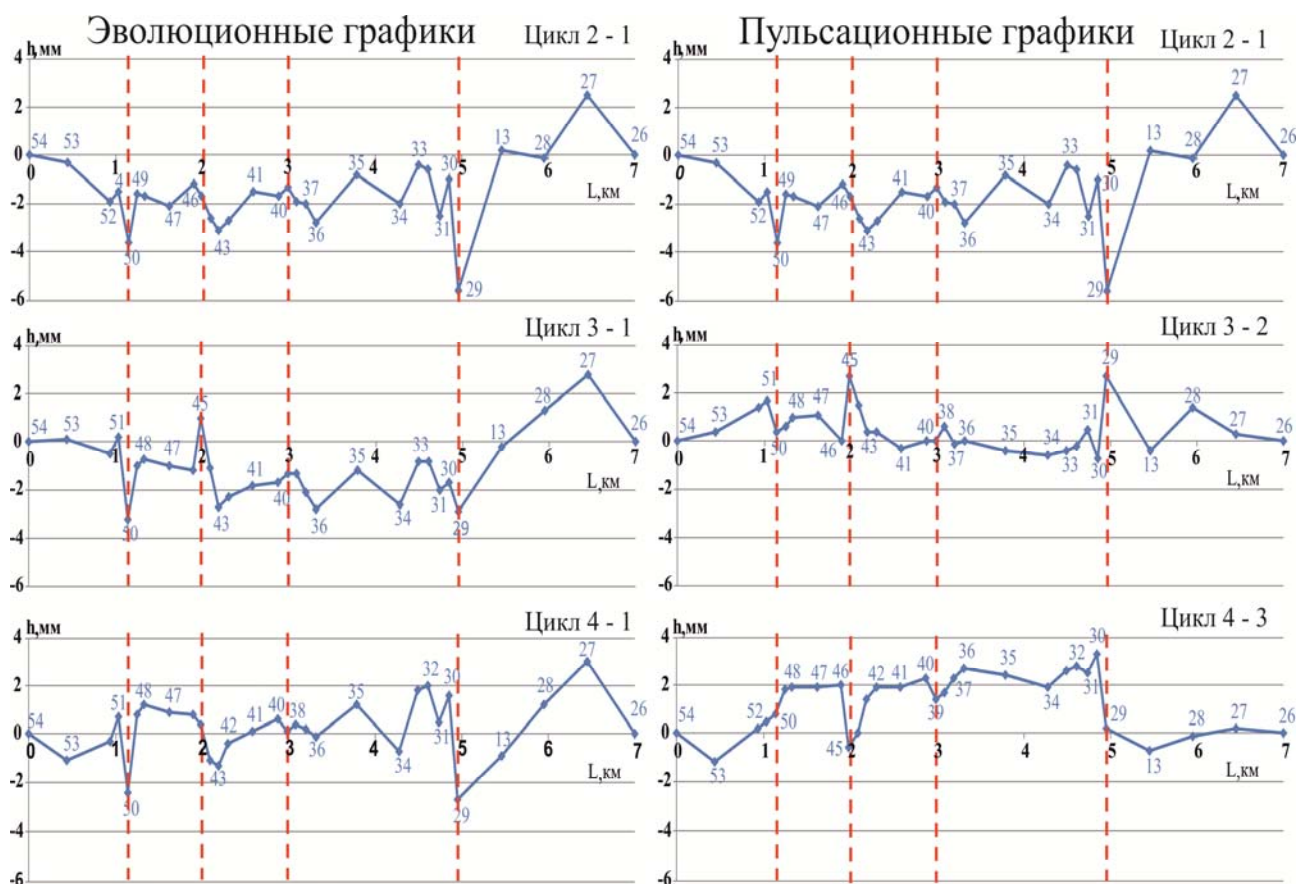


Рис. 3. Результаты повторных нивелирных наблюдений на профиле 2, представленные в «эволюционной» и «пульсационной» формах. Красным пунктиром отмечены разломные зоны

Отчетливо выделяются два «пика» оседаний: в окрестностях репера № 31 и в окрестностях репера № 29. По всей вероятности, данная разломная зона является еще и областью повышенной трещиноватости, имеющей несколько разрывных нарушений, которые по результатам сейсморазведки определяются как единый разлом [11]. Если рассматривать наибольшую по амплитуде из сдвоенной аномалии, то следует отметить ее высокую интенсивность. В период между циклами 2 и 1 ее амплитуда (смещение вниз) составляет 6 мм при ширине 0,6 км. В период между циклами 3–2 (смещение вверх) она имеет амплитуду 4 мм. В период между циклами 4–3 она меняет свою форму, и земная поверхность в окрестностях репера № 29 оседает на 3,6 мм. Если оценивать среднегодовую скорость относительных деформаций земной поверхности в зоне этого

разлома, то она равна $6 \cdot 10^{-6}$ в год. Поэтому данная зона разлома относится к категории опасного разлома.

Пятая аномалия, которая не связана с разломами, в основном фиксируется смещениями реперов № 27 и № 28. Поскольку они не испытывают систематического хода в «эволюционном» графике и знакопеременно не изменяются в «пульсационном», то можно констатировать, что их смещения не связаны ни с эксплуатацией ПХГ, ни с активизацией разломов. По всей вероятности, они обусловлены причинами экзогенного характера.

Профиль 3

На рис. 4 приведены данные повторных нивелирных наблюдений вдоль локального профиля 3.

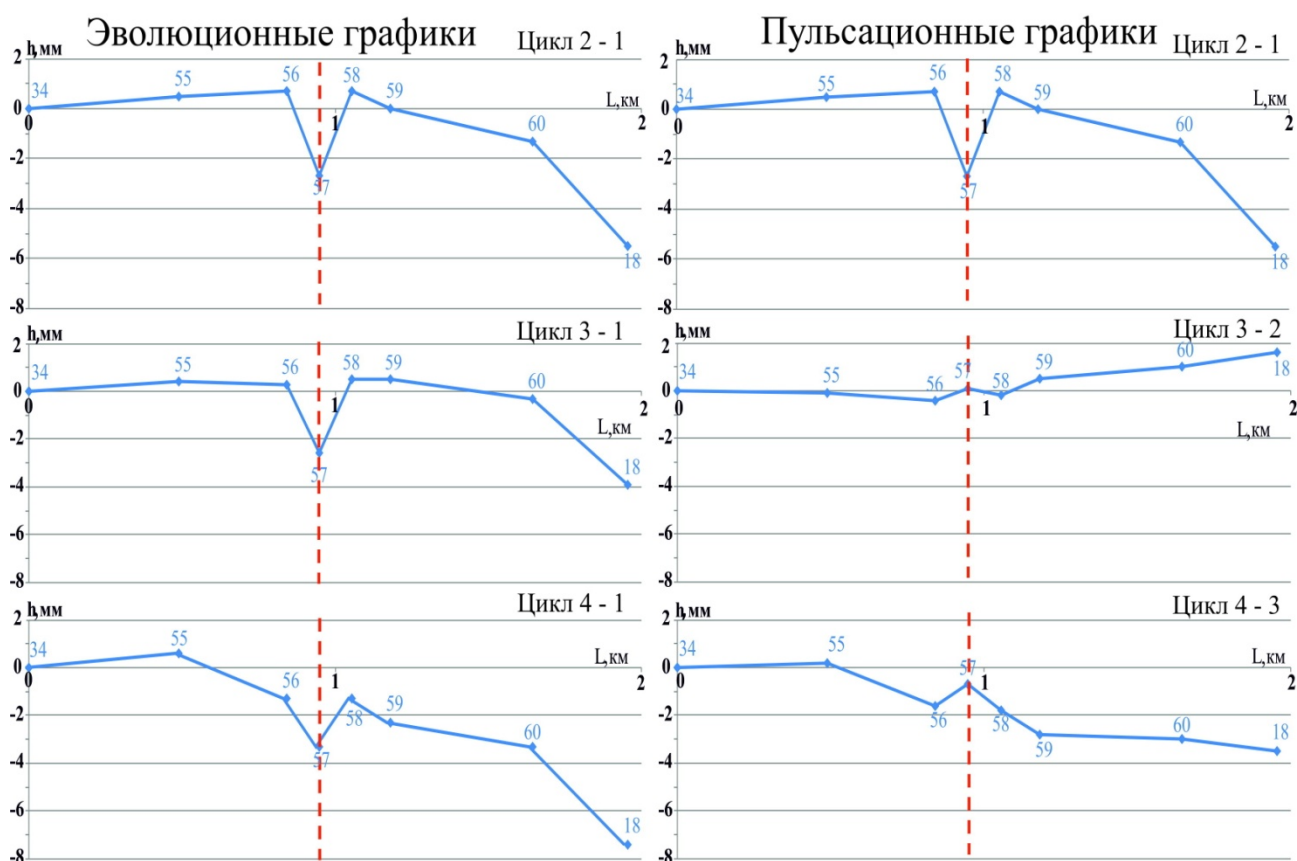


Рис. 4. Результаты повторных нивелирных наблюдений на профиле 3, представленные в «эволюционной» и «пульсационной» формах.

Красным пунктиром отмечены разломные зоны по данным сейсморазведки

Как следует из рис. 4, в зоне разлома имеет место аномалия типа γ с амплитудой в цикле 2–1 3,6 мм. Ширина аномалии составляет величину 0,2 км. Среднегодовая относительная деформация будет равна $3,6 \cdot 10^{-5}$ в год. Естественно,

что данный разлом следует отнести к категории опасных. Анализируя пульсационный график, можно отметить наличие знакопеременных смещений земной поверхности. Причем наибольшая амплитуда переменного знака, равная 1,5 мм, отмечается в цикле 4–3.

Резюмируя в целом все результаты нивелирных наблюдений, необходимо констатировать следующее.

1. На протяженных профилях 1 и 2, пересекающих Степновское ПХГ, не отмечено знакопеременных смещений земной поверхности территории всего подземного газохранилища.

2. Выявлены аномальные деформации в зонах разломов, которые соответствуют раздвиговому морфолого-генетическому типу разломов.

3. Выделены разломные зоны, которые по своей деформационной активности относятся к категории опасных.

Раздвиговой тип разлома характерен тем, что кривая вертикальных смещений носит практически симметричный характер. Знак смещения определяется конкретными условиями внутри самой зоны разлома. Учитывая, что данные разломы флюидонасыщены, при увеличении пластового давления происходит смещение земной поверхности вверх, а при снижении – вниз.

Тот факт, что на протяженных профилях не отмечаются знакопеременные обширные деформации всей территории Степновского ПХГ, свидетельствует о том, что наблюдения не были проведены во временные интервалы наибольшего изменения пластового давления: в нейтральные периоды после отбора и закачки газа. В то же время, очевидно, что разломные зоны, которые являются усилителями напряженно-деформированного состояния, отображают знакопеременные смещения даже при очень малых перепадах пластового давления, которые имеют место между циклами нивелирования.

Анализ результатов GPS-измерений

Для определения горизонтальной составляющей векторов движения реперов (пунктов геодезического полигона) на начальном этапе выполнена оценка точности взаимного положения пунктов государственной геодезической сети, являющихся исходными для системы профильных линий. С этой целью были произведены одновременные статические наблюдения на четырех пунктах с последующим уравниванием измерений и трансформацией уравненных координат WGS-84 в систему координат СК-95.

Оценка точности ГЛОНАСС/GPS-измерений производилась в специализированном программном обеспечении Spectrum Survey Office v.7.5. Координаты реперов профильных линий определены путем одновременных двухчастотных спутниковых наблюдений на четырех фундаментальных пунктах и четырех определяемых реперах профильных линий. После обработки данных полученные координаты фундаментальных реперов планируется использовать в качестве исходных в последующих циклах наблюдений.

Результаты измерений были проанализированы путем определения невязок геоцентрических координат в замкнутых геодезических построениях и по внутренней сходимости между сеансами в пределах одной серии, а также величин средних квадратических погрешностей определения длин GPS-хорд. На основании анализа полученных результатов были определены среднеквадратические ошибки измерения длины линий и эллипсоидальных превышений для каждой пары пунктов полигона. Погрешность плановой привязки спутниковыми геодезическими двухчастотными приемниками Sokkia GSR 2700 ISX, Sokkia GRX1 составляет $3,0 \text{ мм} + 0,5 \text{ ppm}$ на 1 км длины вектора. Фактическая среднеквадратическая погрешность определения планово-высотного положения реперов относительно пунктов ГГС после уравнивания в программном комплексе Spectrum Survey Office v.7.5 не превышает $\pm 9 \text{ мм}$ в плане и $\pm 14 \text{ мм}$ по высоте.

Перед непосредственным определением планового положения реперов была выполнена работа по оценке точности взаимного положения пунктов ГГС, после анализа в программном комплексе Spectrum Survey Office v.7.5 за базовый пункт принят пункт «Мечетка».

Для изучения горизонтальных смещений земной поверхности на Степновском ПХГ использовались GPS наблюдения на пунктах, которые расположены в зонах разломов и вдоль профилей нивелирования (рис. 5). При этом пункты спутниковых наблюдений были строго приурочены к нивелирным. Это обстоятельство позволило построить профили изменения горизонтальных смещений в режиме пульсационного представления.

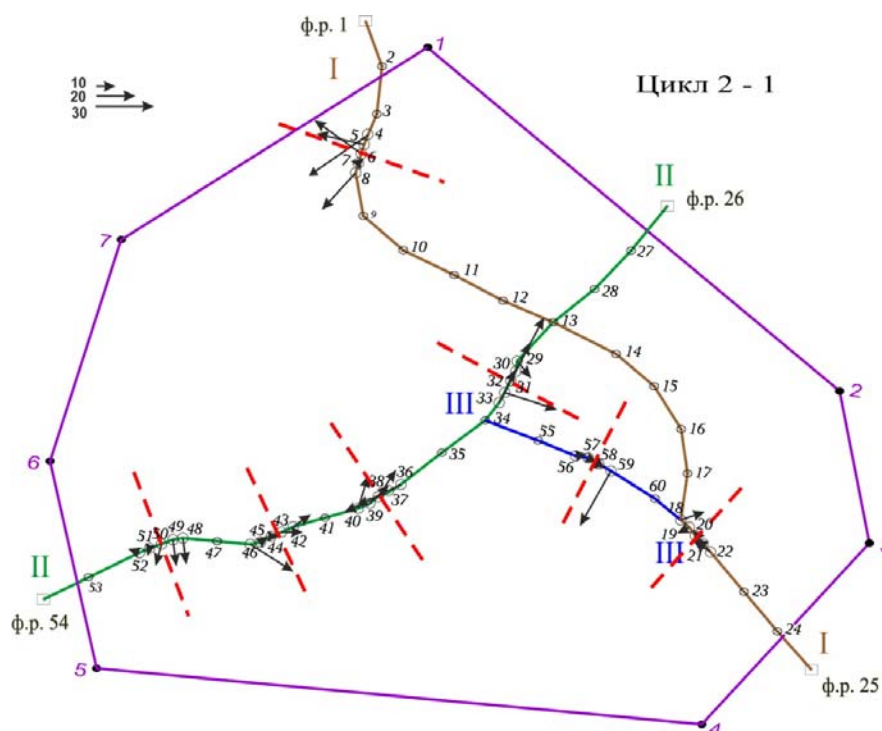


Рис. 5. Результаты повторных GPS-наблюдений в разломных зонах Степновского ПХГ (цикл 2–1). Стрелками показаны амплитуды смещений в миллиметрах и их направления (азимуты)

Как следует из рис. 5, во всех разломных зонах векторы горизонтальных смещений ориентированы хаотично. Исключение составляют разломные зоны вдоль локального профиля между реперами № 46 и № 42 и профили между реперами № 18 и № 21. За исключением первого и второго векторов все реперы имеют смещения вдоль профиля, т. е. вкост простираения разломов. Амплитуды горизонтальных смещений составляют величины около 8–10 мм. На остальных локальных профилях имеют место «гигантские» горизонтальные смещения, достигающие 30 мм.

Сравнивая рис. 5 и 6, отметим, что вновь наблюдается хаотичная картина. Имеют место и знакопеременные смещения. Однако их величины вновь достигают амплитуд 20–30 мм. И вновь практически не наблюдаются систематические горизонтальные смещения вдоль локальных профилей (вкост разломов).

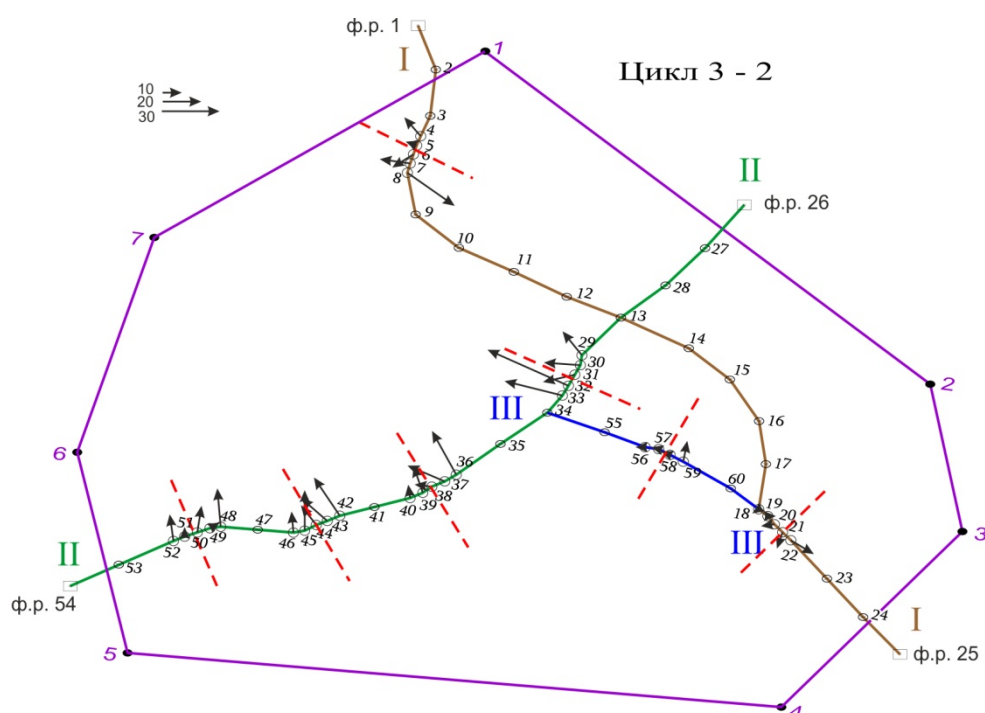


Рис. 6. Результаты повторных GPS-наблюдений в разломных зонах Степановского ПХГ (цикл 3-2). Стрелками показаны амплитуды смещений в миллиметрах и их направление (азимут)

На рис. 7 представлены горизонтальные смещения в период между циклами 4 и 3. И вновь наблюдаются интенсивные знакопеременные (относительно цикла 3–2) смещения, которые в некоторых местах превосходят амплитуду в 30 мм. При этом все векторы направлены в сторону от направления профилей.

Согласно основам геомеханики, при локальных раздвиговых смещениях в зонах разломов векторы горизонтальных смещений должны быть равны нулю в центральной части разлома, а в самой зоне их амплитуды должны уступать вертикальным (рис. 8) [8, 12].

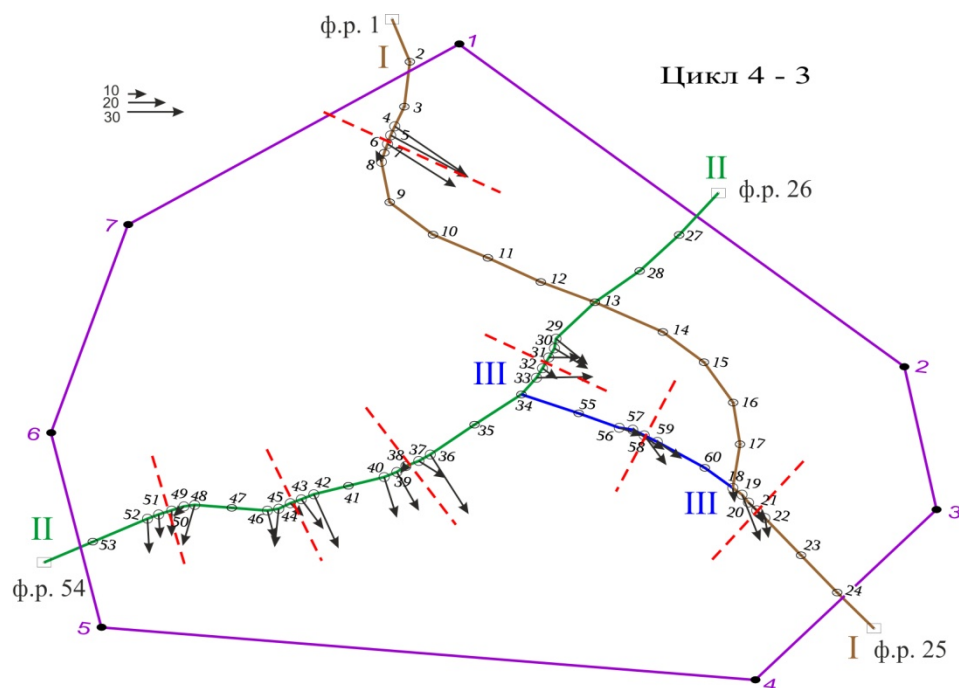


Рис. 7. Результаты повторных GPS-наблюдений в разломных зонах Степновского ПХГ (цикл 3-2). Стрелками показаны амплитуды смещений в миллиметрах

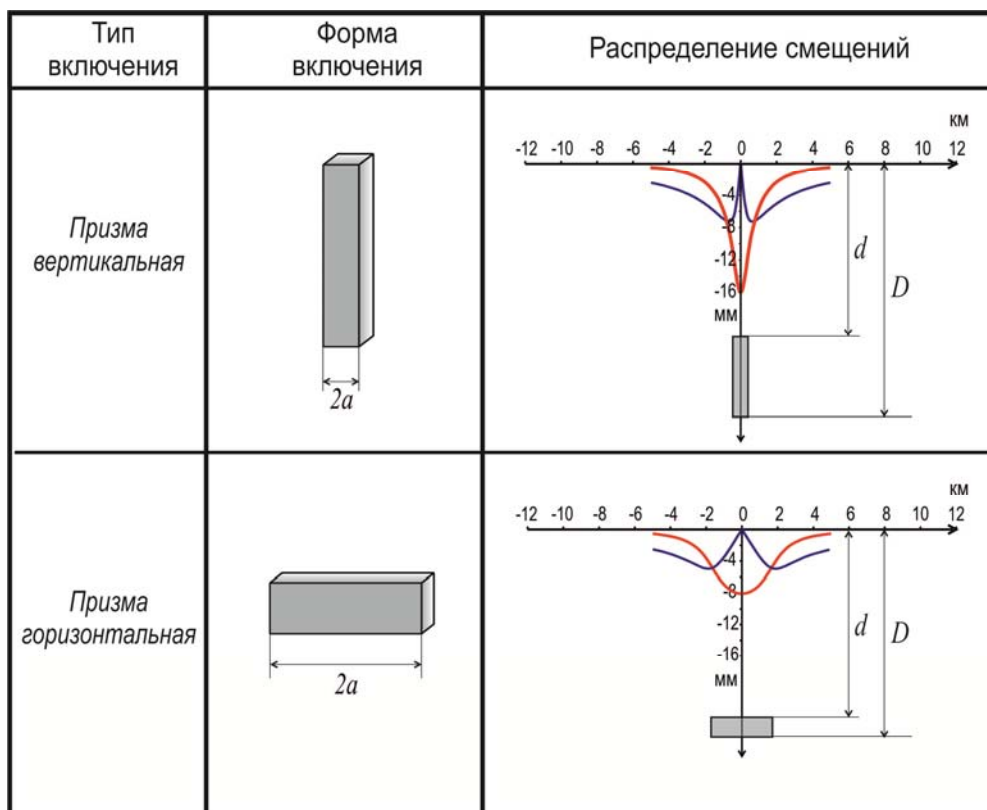


Рис. 8. Распределение вертикальных смещений поверхности в окрестности разлома (вертикальная призма) и пласта (горизонтальная призма)

Для прямого сопоставления вертикальных и горизонтальных смещений земной поверхности на рис. 9 представлены результаты нивелирных и GPS-измерений, проведенных на совмещенных наблюдательных пунктах.

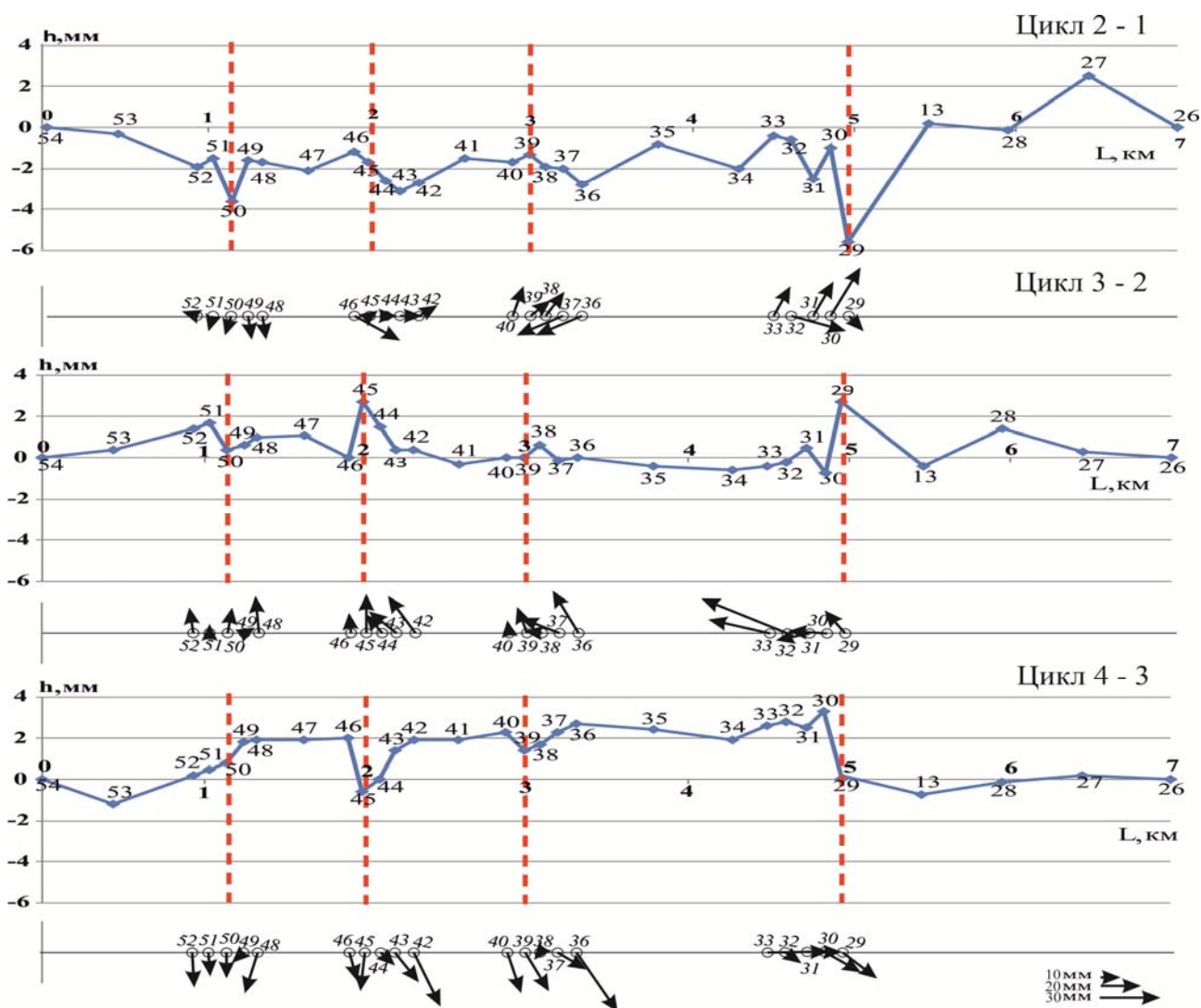


Рис. 9. Сопоставление нивелирных и GPS-наблюдений вдоль профиля II-II

Как видно из графика, величины аномальных горизонтальных смещений на порядок и более превосходят вертикальные. Кроме того, в точках локального максимума (или минимума) кривых вертикальных смещений горизонтальные смещения отличны от нуля, что явно противоречит рис. 8.

Амплитуды горизонтальных смещений никогда не могут превышать амплитуды вертикальных смещений, так как происходят в условиях горизонтального стеснения со стороны окружающих горных пород. Вертикальные смещения происходят на поверхности, которая практически свободна от напряжений.

Резюмируя, следует отметить, что изучение горизонтальной компоненты смещений земной поверхности в зонах разломов на эксплуатируемых ПХГ ме-

тодами GPS-измерений неэффективно, так как длины локальных приразломных профилей имеют малые величины (1–3 км). В связи с этим в качестве метода измерений целесообразней использовать высокоточную тахеометрическую съемку, развивая с ее помощью локальных трилатерационных микросетей.

В конечном счете, построение свободных трилатерационных сетей в разломных зонах в виде цепочки из треугольников или геодезических четырехугольников позволит уменьшить затраты на определение горизонтальной составляющей векторов смещения земной поверхности за счет отказа от проведения дорогостоящих спутниковых GPS/ГЛОНАСС-измерений.

Проведенный анализ выполненных циклов измерений на геодинамическом полигоне Степновского ПХГ позволил подтвердить местоположение разломных зон, выделенных на этапе проектирования по данным сейсморазведочных работ и линеаментного анализа, а также выявить закономерности развития деформационных процессов в этих разломных зонах [13, 14]. В очередной раз была подтверждена необходимость использования, в качестве основного, именно метода высокоточного геометрического нивелирования для наблюдений на геодинамических полигонах, как единственного на сегодняшний день метода, позволяющего получать достоверную информацию об изменении высотного положения пунктов геодинамического полигона в пределах 1–2 мм. По результатам анализа спутниковых измерений была констатирована их непригодность для определения горизонтальных смещений земной поверхности в разломных зонах в связи с невозможностью достижения точности на уровне первых миллиметров при проведении повторных измерений. В качестве альтернативы был предложен способ измерений горизонтальных смещений путем построения микротрилатерационных сетей в разломных зонах, что позволяет не только многократно повысить точность измерений и достоверность их результатов по сравнению со спутниковыми методами, но и значительно сократить финансовые расходы на выполнение работ по геодинамическому мониторингу территории горных отводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по производству маркшейдерских работ (РД 07-603–03). – М. : Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России». – 120 с.
2. Маркшейдерия : учебник для вузов / под ред. М. Е. Певзнера, В. Н. Попова. – М. : МГГУ, 2003. – 419 с.
3. Кузьмин Ю. О. Проблемные вопросы изучения деформационных процессов в современной геодинамике // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № 3. – С. 98–107.
4. Грунин А. Г., Кузьмин Ю. О., Фаттахов Е. А. Проблемные вопросы проектирования геодинамических полигонов на месторождениях УВ // Маркшейдерский вестник. – 2014. – № 6. – С. 24–31.
5. Кузьмин Ю. О. Актуальные проблемы идентификации результатов наблюдений в современной геодинамике // Физика Земли. – 2014. – № 5. – С. 51–64.

6. Никонов А. И. Проблемы несовершенства геологических моделей и оптимизации разработки месторождений УВ и подземных хранилищ газа // Гео-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля). – Новосибирск : СГГА, 2006. Т. 3, ч. 1. – С. 203–211.
7. Кравцов В. В., Никонов А. И., Юрова М. П. Роль геодинамики в формировании пространственно-временной неоднородности геологической среды как фактора геозекологического риска (на примере Касимовской структуры) // Перспективы развития экологического страхования в газовой промышленности. – М. : ВНИИГАЗ, 1999. – С. 351–369.
8. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2014. – Т. 5, № 2. – С. 401–443.
9. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика опасных разломов // *Физика Земли*. – 2016. – № 5. – С. 87–101.
10. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика системы разломов // *Физика Земли*. – 2015. – № 4. – С. 25–30.
11. Кузьмин Ю. О. Геодинамический риск // *Российская Газовая Энциклопедия*. – М. : Большая Российская Энциклопедия, 2004. – С. 121–124.
12. Dzurisin D. Volcano deformation. *Geodetic monitoring techniques*. – UK : Springer, 2007. – 441 p.
13. Кузьмин Ю. О., Фаттахов Е. А. Анализ деформации земной поверхности на Степновском подземном хранилище газа // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле» : сб. материалов. – 2016. – С. 102–107.
14. 3D geomechanics in UGS projects. A comprehensive study in northern Italy / N. Castelletto, M. Ferronato, G. Gambolati, C. Janna, P. Teatini, D. Marzorati, E. Cairo [et. al] // 44th US rock mechanics symposium and 5th U.S. Canada rock mechanics symposium. – 2010.

Получено 03.05.2017

© С. С. Квятковская, Ю. О. Кузьмин, Р. С. Никитин, Е. А. Фаттахов, 2017

ANALYSIS OF THE DEFORMATIONS OF THE GROUND SURFACE ON STEPNOVSKAYA UNDERGROUND GAS STORAGE BY METHODS OF SATELLITE AND GROUND-BASED GEODESY

Svetlana S. Kwiatkowska

Gazprom UGS, 117420, Russia, Moscow, 12A Nametkina St., Deputy Chief of Surveyor Services, phone: (495)428-41-00, e-mail: s.kvyatkovskaya@phg.gazprom.ru

Yuriy O. Kuzmin

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, 123242, Russia, Moscow, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St., Dr. Sc., Professor, Head of the Laboratory of Recent and Applied Geodynamics, phone: (499)254-65-65, e-mail: kuzmin@ifz.ru

Roman S. Nikitin

Gazprom UGS, 117420, Russia, Moscow, 12A Nametkina St., Deputy General Director, Chief Geologist, phone: (495)428-45-01, e-mail: R.Nikitin@phg.gazprom.ru

Evgeniy A. Fattakhov

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, 123242, Russia, Moscow, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St., Junior Staff Scientist, phone: (499)254-65-65, e-mail: Fea@ifz.ru

For rational subsoil use on underground gas storage (UGS) geodynamic polygons are created. On these ranges, repeated geodetic (ground-based and satellite) observations of deformations of the earth's surface are carried out.

Stepnovskoe UGS has conducted 4 cycles of repeated observations, corresponding to the operation regime (injection and selection of gas for 1 year). To measure the vertical displacements of the earth's surface, grade 2 was applied, and horizontal displacements were determined by GNSS observations.

Analysis of the results of leveling observations showed the presence of local deformations of the earth's surface in fault zones with the rates of relative deformations - $2-3 \cdot 10^{-5}$ per year. The results of measuring horizontal displacements revealed their ambiguity. It follows from the fundamentals of geomechanics that horizontal displacements are much smaller than vertical ones in the central part of the reservoir or in the center of the fault zone. This is not observed in all cycles of repeated observations. It is proposed to use ground-based tachometric observations for the measurement of horizontal displacements of fault zones in the form of building local trilateration networks.

Key words: geodynamic polygon, underground gas storage, ground-based and satellite measurement methods, the deformations of the earth surface, fault zone, trilateration network.

REFERENCES

1. Guidance Document. (2003). Instructions for the production of mine surveying (GD 07-603-03). Moscow [in Russian].
2. Pevzner, M. E., & Popov, V. N. (Ed.). (2003). *Markshejderija [Mine surveying]*. Moscow: MSMU [in Russian].
3. Kuzmin, Yu. O. (2008). Problematic issues of studying the deformation processes in recent geodynamics. *Gornij informacij-analyticheskij bulletin [Mountain Information and Analytical Bulletin]*, 3, 98–107 [in Russian].
4. Grunin, A. G., Kuzmin, Yu. O., & Fattakhov, E. A. (2014). Problematic issues of design of geodynamic grounds on UV fields. *Markshejderskij vestnik [Mine Surveying Bulletin]*, 6, 24–31 [in Russian].
5. Kuzmin, Yu. O. (2014). The topical problems of identifying the results of the observations in recent geodynamics. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 50(5), 641–654.
6. Nikonov, A. I. (2006). The problem of the imperfection of the geological models and optimize the development of hydrocarbon fields and underground gas storage facilities. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2006: T. 3, ch. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2006: Vol. 3, Part 1]* (pp. 203–211). Novosibirsk: SSGA [in Russian].
7. Kravcov, V. V., Nikonov, A. I., & Jurova, M. P. (1999). The role of geodynamics in the formation of spatio-temporal heterogeneity of the geological environment geoenvironmental risk factors (by the example of Kasimov structure). In *Perspektivy razvitija jekologicheskogo strahovanija v gazovoj promyshlennosti [Prospects of environmental insurance development in the gas industry]* (pp. 351–369). Moscow: VNIIGAZ [in Russian].
8. Kuzmin, Yu. O. (2014). Recent geodynamics of fault zones: faulting in real time scale. *Geodynamics & Tectonophysics*, 5(2), 401–443 [in Russian].
9. Kuzmin, Yu. O. (2016). Recent geodynamics of dangerous faults. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 52(5), 709–722.

10. Kuzmin, Yu. O. (2015). Recent geodynamics of a fault system. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 51(4), 480–485.
11. Kuzmin, Yu. O. (2004). Geodynamic risk. In *Rossijskaja Gazovaja Jenciklopedija [Russia's Gas Encyclopedia]* (pp. 121–124). Moscow: Great Russian Encyclopedia [in Russian].
12. Dzurisin, D. (2007). *Volcano deformation. Geodetic monitoring techniques*. UK: Springer.
13. Kuzmin, Yu. O., & Fattakhov, E. A. (2016). Analysis of deformation of the earth's surface on stepnovskaya underground gas storage. In *Sbornik materialov Chetvertoy tektonofizicheskoy konferencii v IFZ RAN, Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle, materialy докладov vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem [Proceedings of the Fourth Tectonophysical Conference in IPE RAS, Tectonophysics and Actual Problems of Earth Sciences, Proceedings of All-Russian Conference with International Participation]* (pp. 102–107). Moscow: IPE RAS [in Russian].
14. Castelletto, N., Ferronato, M., Gambolati, G., Janna, C., Teatini, P., Marzorati, D., & Cairo E. et. al. (2010). 3D geomechanics in UGS projects. A comprehensive study in northern Italy. *44th US rock mechanics symposium and 5th U. S. Canada rock mechanics symposium*.

Received 03.05.2017

© S. S. Kwiatkowska, Yu. O. Kuzmin, R. S. Nikitin, E. A. Fattakhov, 2017