

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»

Шевчук Степан Васильевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА В РАЙОНАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ
ХРАНИЛИЩ ГАЗА

Специальность 1.6.21.
«Геоэкология»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – д.т.н. Батугин Андриан Сергеевич

Москва, 2022

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Подземные хранилища газа (ПХГ) являются опасными производственными объектами, часть из которых расположена вблизи населенных пунктов. Низкий уровень изученности геодинамических процессов и эффектов, происходящих при эксплуатации подземных хранилищ газа, таких, например, как утечки газов в окружающую среду через геодинамические зоны, аномальные сдвигения земной поверхности, техногенная сейсмичность, ведет к опасным экологическим последствиям и неоправданным затратам на проведение геодинамического мониторинга маркшейдерско-геодезическими методами.

Существующие подходы к геодинамическому мониторингу на ПХГ основаны на методе аналогии, который подразумевает использование теоретических исследований и практических данных, полученных на геодинамических полигонах (ГДП) месторождений углеводородов. Единственным существенным отличием при проектировании геодинамического полигона на подземных хранилищах газа является периодичность систематических наблюдений. Для оценки знакопеременных сдвижений земной поверхности при изменении пластового давления наблюдения проводят два раза в год в нейтральные периоды между отбором и закачкой газа без предпочтения по контролю геодинамических зон, что делает процесс мониторинга достаточно трудоемким.

При разработке проекта ГДП принимается допущение о том, что за пределами горного отвода влияние эксплуатации ПХГ не существует, поэтому фундаментальные реперы закладываются в непосредственной близости от горного отвода. Однако, эмпирические данные, подтверждающие или опровергающие данное допущение, отсутствуют. В то же время существуют многочисленные данные и предположения о геодинамическом взаимодействии различных объектов освоения недр, что не нашло пока

обоснования в теории и практике проектирования геодинамических полигонов.

На зарубежных ПХГ известны проявления техногенной сейсмичности с воздействием на окружающую среду, однако регистрация данных явлений в нашей стране не осуществляется ввиду слабой изученности вопроса и отсутствия опыта проведения непрерывных сейсмологических наблюдений на ПХГ.

Таким образом, совершенствование подходов к геодинамическому мониторингу районов расположения подземных хранилищ газа в пористых структурах для повышения уровня геэкологической безопасности при их эксплуатации является актуальной научно–технической задачей.

Степень разработанности темы.

Значительный вклад в развитие теоретических вопросов геодинамики недр внесли отечественные ученые: Адушкин В.В., Батугина И.М., Батугин А.С., Кузьмин Ю.О., Опарин В.Н., Петухов И.М., Шабаров А.Н. Вопросам совершенствования маркшейдерско-геодезических методов наблюдений на геодинамических полигонах посвящены работы Ашихмина С.Г., Кафтана В.И., Кашникова Ю.А., Панжина А.А., Татаринов В.Н. Необходимость включения сейсмологических наблюдений в состав геодинамического мониторинга в своих работах обосновывали: Еманов А.Ф., Нестеренко М.Ю., Никонов А.И., Огаджанов В.А. Оценкой геэкологической опасности при недропользовании, в том числе и на подземных хранилищах газа, занимались: Жуков В.С., Казанкова Э.Р., Корнилова Н.В., Нестеренко Ю.М., Шестаков Н.В.

Целью исследования является развитие научных основ геодинамического мониторинга на подземных хранилищах газа для комплексного изучения значимых геодинамических процессов по результатам маркшейдерско-геодезических и сейсмологических наблюдений и повышения геэкологической безопасности при эксплуатации объектов недропользования.

Идея работы заключается в том, что протекание геодинамических процессов в районе ПХГ имеет свои характерные особенности, связанные с уникальностью и цикличностью работы этого типа объектов освоения недр, что накладывает специфические требования и к проведению геодинамического мониторинга.

Основные задачи исследования.

1. Выявить возможные экологические опасности при эксплуатации ПХГ на основании анализа мирового опыта подземного хранения газа.
2. Исследовать влияние эксплуатации ПХГ на активизацию разломных зон за пределами горного отвода и обосновать размеры локального геодинамического полигона, в пределах которого должны проводиться систематические маркшейдерско-геодезические наблюдения для обеспечения геоэкологической безопасности на ПХГ.
3. Обосновать размеры и конфигурацию территориального геодинамического полигона для проведения сейсмологического мониторинга.
4. Выдвинуть и исследовать гипотезу о природе сейсмических явлений в районах эксплуатации подземных хранилищ газа Саратовской области.
5. Усовершенствовать метод создания геодезических сетей при геодинамическом мониторинге на ПХГ и обосновать периодичность систематических маркшейдерско-геодезических наблюдений на ПХГ.

Методы исследований включают: анализ и обобщение научно-технической информации по проблеме исследования; изучение, систематизация и интерпретация результатов геодинамического мониторинга на подземных хранилищах газа.

Основные научные положения, выносимые на защиту.

1. Геодинамическое воздействие ПХГ на горный массив распространяется за пределы его горного отвода и может отслеживаться двухуровневой системой мониторинга с проведением региональных наблюдений в зоне геодинамического влияния потенциально

взаимодействующих объектов освоения недр и локальных наблюдений в зоне не менее $3H \times \operatorname{ctg} \delta$ от границы горного отвода, где H – максимальная глубина кровли эксплуатируемого пласта коллектора на границах контура ГВК; δ – граничный угол.

2. Возникновение сейсмических явлений в районах расположения Елшано-Курдюмского, Песчано-Уметского и Степновского ПХГ связано с режимом их эксплуатации и является новым для России видом техногенной сейсмичности, оказывающим влияние на окружающую среду.

3. Для прогнозирования развития геодинамических процессов и их влияния на геэкологическую ситуацию достаточно проводить маркшейдерско-геодезические наблюдения в осенний нейтральный период на совокупности локальных геодезических сетей, заложенных с учетом зон динамического влияния разломов в районах ПХГ.

Научная новизна выполненных исследований заключается в следующем:

1. Установлена характерная особенность процесса сдвижения, заключающаяся в том, что наибольшие значения аномального процесса сдвижения при цикличной эксплуатации приурочены к разломным зонам, а вне разломных зон оседание и поднятие земной поверхности незначительны.

2. Установлен ранее неизвестный факт развития опасных техногенных процессов сдвижения земной поверхности за пределами горного отвода.

3. Разработан способ выбора параметров территориального геодинамического полигона, отличающийся тем, что его размеры и конфигурацию выбирают с учетом суммарной площади взаимодействующих объектов недропользования.

4. Разработан способ выбора конфигурации и размеров геодезических сетей на локальном геодинамическом полигоне для обеспечения геэкологической безопасности эксплуатации ПХГ, учитывающей ширину зоны геодинамического влияния разломов.

5. Разработан способ геодинамического мониторинга, направленный на обеспечение экологической безопасности эксплуатации ПХГ, отличающийся периодичностью проведения маркшейдерско-геодезических наблюдений (только в осенний нейтральный период).

6. Установлена связь проявления сейсмических явлений в районах расположения Елшано-Курдюмского, Песчано-Уметского и Степновского ПХГ с режимом их эксплуатации, что доказывает существование нового для России вида техногенной сейсмичности.

Теоретическая значимость работы заключается в расширении научной базы изучения воздействия объектов освоения недр на окружающую среду за счет совершенствования методов проведения геодинамического мониторинга на ПХГ.

Практическая значимость заключается в том, что на базе усовершенствованных методов появляется возможность разработать технические проекты геодинамического мониторинга, включающие комплексные маркшейдерско-геодезические и сейсмологические наблюдения для контроля и прогноза развития опасных техногенных процессов.

Обоснованность и достоверность исследования опирается на результаты анализа фактических данных по наблюдениям на геодинамических полигонах в районах Карашурского, Совхозного и Щелковского ПХГ с общей длиной профильных линий более 50 км, анализом данных по сейсмичности регионального геодинамического полигона Саратовской области за 2005-2007 гг. (29 событий), а также на соответствие основных выводов представлениям о наличии взаимодействия региональных геодинамических и локальных геомеханических процессов на объектах освоения недр.

Личный вклад автора.

Лично автором была выполнена систематизация и интерпретация имеющихся данных геодинамического мониторинга на ПХГ, разработаны способы определения размеров локального и регионального геодинамических полигонов, доказана необходимость и достаточность проведения

маркшейдерско-геодезических наблюдений в осенний нейтральный период, выполнен анализ проявления сейсмичности в районах расположения ПХГ.

Апробация работы.

Результаты работы были доложены на: II научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Новые идеи в геологии нефти и газа» (г. Тюмень, 2019), Всероссийском конкурсе «Новая идея» на лучшую научно-техническую разработку среди молодежи предприятий и организаций топливно-энергетического комплекса проводимого под эгидой Министерства энергетики Российской Федерации (г. Москва, 2020), международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2021), XIX Всероссийском конференции-конкурсе студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2021), XVII Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2021), XI научно-практической конференции молодых работников ООО «Газпром ПХГ» (г. Санкт-Петербург, 2021). Имеются внедрения предложенных изобретений в проекты геодинамических полигонов на подземных хранилищах газа: патент RU № 2757387 С1 от 14.10.2021-Невское ПХГ; Патент РФ RU № 2761547 С1 от 09.12.2021 - Канчурино-Мусинский комплекс ПХГ; заявка на изобретение № 2021119199 от 30.06.2021 (решение о выдаче патента от 23.05.2022) – Калужское, Невское, Гатчинское, Пунгинское ПХГ и Канчурино-Мусинский комплекс ПХГ.

Публикации.

Основное содержание работы отражено в четырех научных статьях, рекомендованных ВАК и включенных в наукометрическую базу Scopus. Получено два патента РФ и зарегистрировано три рационализаторских предложения.

Объем и структура работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка используемой литературы и приложений. Работа

изложена на 140 страницах и содержит 64 рисунка, 8 таблиц, список используемых источников из 92 наименований и 4 приложения.

Благодарности.

Автор выражает особую благодарность научному руководителю д.т.н. Батугину А.С. за помощь, оказанную при работе над диссертацией, начальнику службы-главному маркшейдеру ООО «Газпром ПХГ» Квятковской С.С. за предоставленные консультации по теме исследования. Кроме того, автор благодарит коллектив кафедры безопасности и экологии горного производства во главе с заведующим кафедрой д.т.н. Коликовым К.С. за помощь в организационных вопросах.

Также автор выражает благодарность своим родителям – Шевчуку Василию Ивановичу и Шевчук Лилии Владимировне, и брату – Шевчуку Роману Васильевичу за их поддержку, помощь и опору на всех жизненных этапах и выражает благодарность Никулиной Анне Сергеевне за мотивацию.

Отдельную благодарность автор выражает д.т.н., И.о. заведующего кафедрой общей и неорганической химии Пестряк И.В. за моральную поддержку и помощь.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, раскрыта степень ее разработанности, определены цель, задачи, предмет, методология и методы исследований, научная новизна, отражены теоретическая и практическая значимости, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения о степени достоверности и об апробации работы.

В первой главе выполнен анализ опыта проведения геодинамического мониторинга на подземных хранилищах газа, научно-технической литературы, нормативно-правовых актов, регламентирующих вопросы, актуальные для настоящего диссертационного исследования. Изучены полученные результаты геодинамического мониторинга на ПХГ. Оценены геомеханические и геодинамические эффекты, вызванные цикличной эксплуатацией подземного хранилища газа, и основные опасности эксплуатации ПХГ для окружающей среды. Определены основные принципы при разработке проекта геодинамического полигона.

В связи с имеющимися представлениями по геодинамике недр были сформулированы задачи исследования по анализу возможных геоэкологических опасностей при эксплуатации ПХГ, существующего опыта изучения геодинамических процессов на подземных хранилищах газа и обоснованию площади геодинамического полигона, в пределах которого должны проводиться систематические маркшейдерско-геодезические наблюдения.

Опыт изучения геоэкологической обстановки в районах расположения ПХГ показывает, что существуют факты миграции газа в вышележащие горизонты вплоть до выхода на земную поверхность.

Цикличная эксплуатация подземных хранилищ газа оказывает значительное влияние на изменение напряженно-деформированного состояния массива и, следовательно, геодинамическую обстановку в районе расположения объекта. В работе (Никонов, 2003) на примере Щелковского и Касимовского ПХГ доказывается, что причиной зафиксированных фактов

миграции газа являются образующиеся зоны трещиноватости в осадочном чехле, связанные с современными геодинамическими процессами. В работе (Жуков, 2006) на примере анализа состояния эксплуатационных колонн Пунгинского ПХГ было установлено, что формирование скоплений газа вокруг скважины происходит в течение определенного периода времени, характеризующегося активизацией геодинамических процессов. Кузьмин Ю.О. по результатам многолетних наблюдений на Степновском ПХГ подтверждает активизации разломных зон в пределах горного отвода объекта со скоростями относительных деформаций, позволяющих отнести разломы к категории опасных. На основе численно-аналитического подхода при моделировании сдвижения земной поверхности, вызванных циклической эксплуатацией Шатровского ПХГ, было получено предположение, что процесс сдвижения земной поверхности затухает на расстоянии 1-2 км от границ газоводяного контакта (ГВК). Данное предположение не получило отражение в нормативной и проектной документации. В работах Петухова И.М., Батугиной И.М. по геодинамическому районированию показано, что развитие геодинамических процессов связано с напряженным состоянием земной коры и ее блочным строением и проявляется в любых тектонических зонах.

Мировой опыт показывает, что существуют многочисленные случаи проявления сейсмической активности при эксплуатации подземных хранилищ газа.

В нашей стране опыт по проведению сейсмологических наблюдений на подземных хранилищах газа отсутствует, хотя имеются предложения по включению этих работ в состав геодинамического мониторинга (Шабаров и др., 1997; Никонов, 2003). Однако регламент по выбору площади, подлежащей сейсмологическим наблюдениям, до сих пор отсутствует, что ставит задачу обоснованного выбора площади для проведения сейсмологических наблюдений.

В сложившейся практике геодинамический мониторинг включает высокоточное нивелирование по программе II класса по профильным линиям, пересекающим горный отвод, и ГНСС наблюдения, которые, как правило, проводятся только на реперах, расположенных вблизи разломных зон, и выполняют не реже двух раз в год в нейтральные периоды между закачкой и отбором газа. Оценка флюидодинамических процессов, происходящих при эксплуатации ПХГ, выполняется геофизическими методами.

Существующие подходы по созданию системы геодинамического мониторинга на месторождениях углеводородов подвергаются обоснованной критике со стороны специалистов. Основными аргументами являются снижение точности из-за большой протяженности профильных линий и значительные затраты на проведение наблюдений.

Таким образом, возникла необходимость совершенствование подхода к геодинамическому мониторингу в районах расположения подземных хранилищ газа, в связи с чем были сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе выполнена оценка зоны влияния подземных хранилищ газа на геодинамическую обстановку района по результатам многолетних маркшейдерско-геодезических наблюдений на геодинамических полигонах подземных хранилищ газа.

В качестве объектов исследования были взяты Карашурское, Совхозное и Щелковское ПХГ, на которых проектом было предусмотрено заложение фундаментальных реперов на удалении от горного отвода более чем на 2 км. Все остальные геодинамические полигоны на подземных хранилищах газа нашей страны созданы таким образом, что фундаментальные реперы заложены вне контура ГВК, но при этом в непосредственной близости от горного отвода.

Проведенная комплексная оценка результатов геодинамического мониторинга позволила опровергнуть существующую гипотезу об отсутствии влияния эксплуатации подземного хранилища газа за пределами контура ГВК

и горного отвода. На примере Совхозного ПХГ было показано, что изучение разломных зон при разработке горно-геологического обоснования должно выполняться, в том числе и за пределами горного отвода. Так, по двум профильным линиям были отмечены сдвигения земной поверхности за пределами горного отвода, характерные для аномалии типа γ (пример приведен на рис. 1,2).

По результатам структурного дешифрирования выявлено, что профильные линии пересекают разломные зоны за пределами горного отвода, которые не были учтены на этапе проектирования ГДП, в районе реперов 2-4, 31-33 и наиболее выраженную разломную зону типа γ в районе 52-55 реперов.

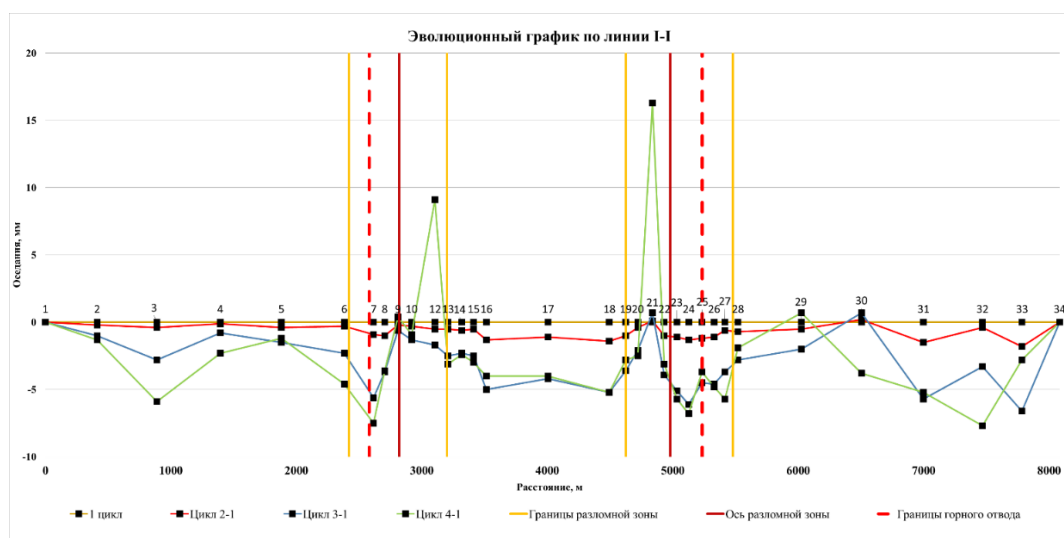


Рисунок 1 – Эволюционный график по профильной линии I-I геодинамического полигона Совхозного ПХГ

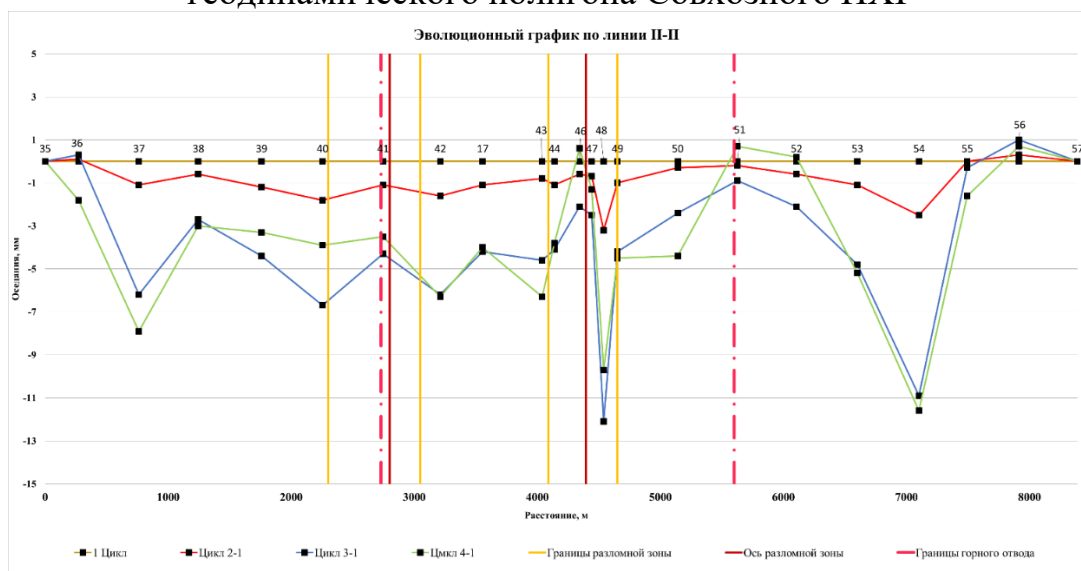


Рисунок 2 – Эволюционный график по профильной линии II-II геодинамического полигона Совхозного ПХГ

На исследуемых ПХГ подтвержден знакопеременный характер сдвижения земной поверхности, обусловленный цикличной эксплуатацией подземных хранилищ газа. При этом ни на одном ПХГ в России, в том числе и на рассмотренных выше, не было зафиксировано обширных просадок земной поверхности за весь период проведения наблюдений. Амплитуда сдвижения земной поверхности в следствие цикличной эксплуатации ПХГ достаточно мала и не способна повлиять на безопасность как самого ПХГ, так и объектов окружающей среды. Также по результатам маркшейдерско-геодезических и гравиметрических наблюдений подтвержден факт о концентрации аномальных значений процесса сдвижения в зонах повышенной трещиноватости и разломов, в том числе расположенных за пределами горного отвода.

В третьей главе рассмотрены доказательства техногенного характера сейсмичности района расположения Елшано-Курдюмского, Песчано-Уметского, Степновского подземных хранилищ газа в Саратовской области.

За период времени с 2005 г. по 2007 г. здесь геофизическими службами было зарегистрировано 29 сейсмических событий, из которых 22 произошли вблизи Елшано-Курдюмского и Песчано-Уметского ПХГ, 5 – в зоне влияния Степновского ПХГ и 2 между всеми рассматриваемыми ПХГ.

На рисунках 3, 4 отражена сейсмичность района расположения одного из ПХГ на фоне изменения пластового давления во времени (режима эксплуатации). На рисунке 3 вертикальными линиями отмечены периоды окончания периода закачки и окончания периода отбора газа.

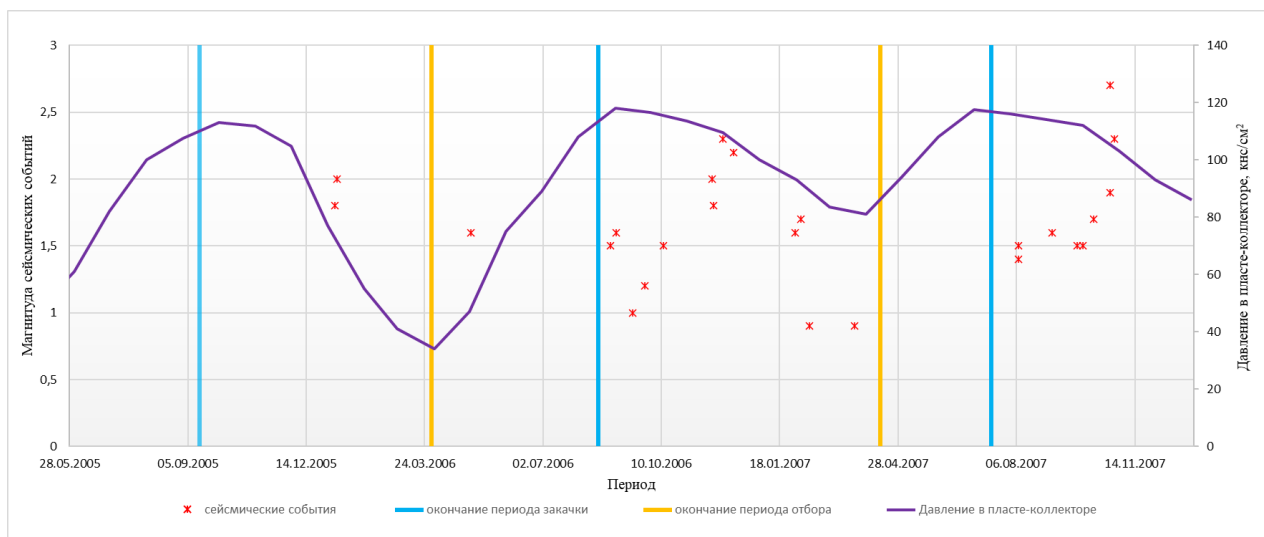


Рисунок 3 - Сейсмичность в районе Песчано-Уметском ПХГ в период его эксплуатации в 2005-2007 гг.



Рисунок 4 - Гистограмма распределения количества сейсмических событий по периодам эксплуатации на Песчано-Уметском ПХГ.

На рисунках видна характерная корреляция (коэффициент корреляции по Спирмену $R_s = 1$) сейсмической активности с режимом эксплуатации ПХГ. В таблице 1 представлен анализ признаков техногенной природы землетрясений с учетом международных разработок в этой области.

Таблица 1.

**Оценка техногенной природы сейсмичности в районе
Елшано-Курдюмского, Песчано-Уметского, Степновского ПХГ.**

Признак техногенной природы землетрясения	Выполнение признаков для районов расположения ПХГ		
	Елшано-Курдюмское	Песчано-Уметское	Степновское
1. Были ли отмечены ранее сейсмические события подобного генезиса в этом районе?	Нет	Нет	Нет
2. Имеется ли корреляция между эксплуатацией ПХГ и сейсмичностью?	Да	Да	Да
3. Как близко от ПХГ расположены эпицентры? Или: расположены ли эпицентры в зоне геодинамического влияния ПХГ?	Да	Да	Да
4. Произошли ли некоторые сейсмические события непосредственно вблизи ПХГ?	Да	Да	Да
5. Имеются ли вблизи активизированные разломы?	Да	Да	Да
6. Достаточно ли изменение давления в пласте-коллекторе ПХГ для возбуждения сейсмичности?	Да	Да	Да

По материалам таблицы 1 можно отметить выполнение всех условий, по которым сейсмические события на объектах освоения недр относят к техногенным. Таким образом, оценка ситуации с проявлением сейсмичности в районе Песчано-Уметского, Елшано-Курдюмского и Степновского ПХГ позволяет сделать вывод о том, что мы имеем дело с новым для России видом техногенной сейсмичности при инженерной деятельности.

В четвертой главе обосновываются рекомендации по совершенствованию геодинамического мониторинга на подземных хранилищах газа.

Учитывая развитие геодинамических процессов за пределами ПХГ предлагается создать двухуровневую систему геодинамического мониторинга, состоящую из локального геодинамического полигона, позволяющего контролировать сдвигание горных пород в разломных зонах маркшейдерско-геодезическими методами, и территориального, направленного на контроль геодинамических процессов в окрестности ПХГ, где возможно его взаимодействие с другими объектами освоения недр.

Оценка геодинамического взаимодействия объектов освоения недр выполнена на основании имеющихся представлений о предельно напряженном состоянии земной коры (Петухов И.М., Батугин А.С.). Глубина расположения сейсмоактивного слоя земной коры (H_{ca}) принята за размер зоны геомеханического возмущения. С учетом имеющихся результатов исследований в геомеханике (Смирнов В.А.) и сейсмологии (Добровольский И.П.) принято, что максимальный радиус геомеханического влияния объекта освоения недр составляет в среднем $(10-20)H_{ca}$.

Поскольку геодинамическое взаимодействие объектов рассматривается как важный геоэкологический фактор, параметры геодинамического полигона предлагается выбирать с учетом суммарной площади взаимодействующих между собой зон геодинамического взаимодействия объектов освоения недр. Размеры R зоны геодинамического взаимодействия объектов освоения недр предлагается оценивать по формуле:

$$R = nH_{ca},$$

где: n - соотношение между размером очага землетрясения и размером области его подготовки;

H_{ca} - мощность слоя земной коры, находящегося в предельно напряженном состоянии.

При пересечении нескольких областей геодинамического взаимодействия объектов освоения недр геодинамический полигон создают таким образом, чтобы он включал все области R , имеющие взаимные пересечения (см. рис. 5).

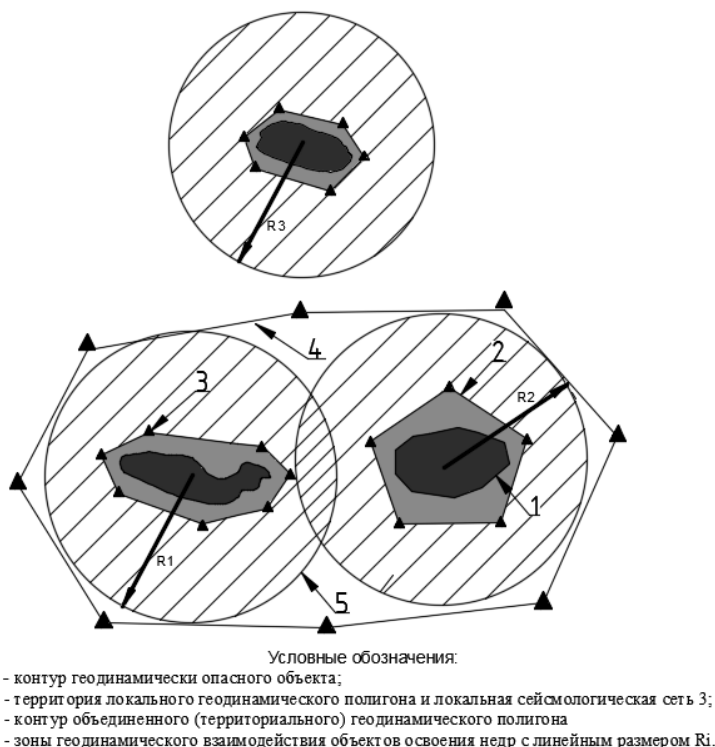


Рисунок 5 - Площадь объединенного геодинамического полигона для нескольких геодинамически взаимодействующих объектов

Для условий Саратовской области с учетом имеющихся данных о глубинах очагов сейсмических событий принято $H_{ca} = 10$ км. Если взять среднее значение $n = R/H_{ca}=10$, то размер зоны геодинамического взаимодействия R каждого ПХГ будет равен 100 км. Построенная схема территориального геодинамического полигона с учетом зон взаимодействия подземных хранилищ газа приведена на рисунке 6.

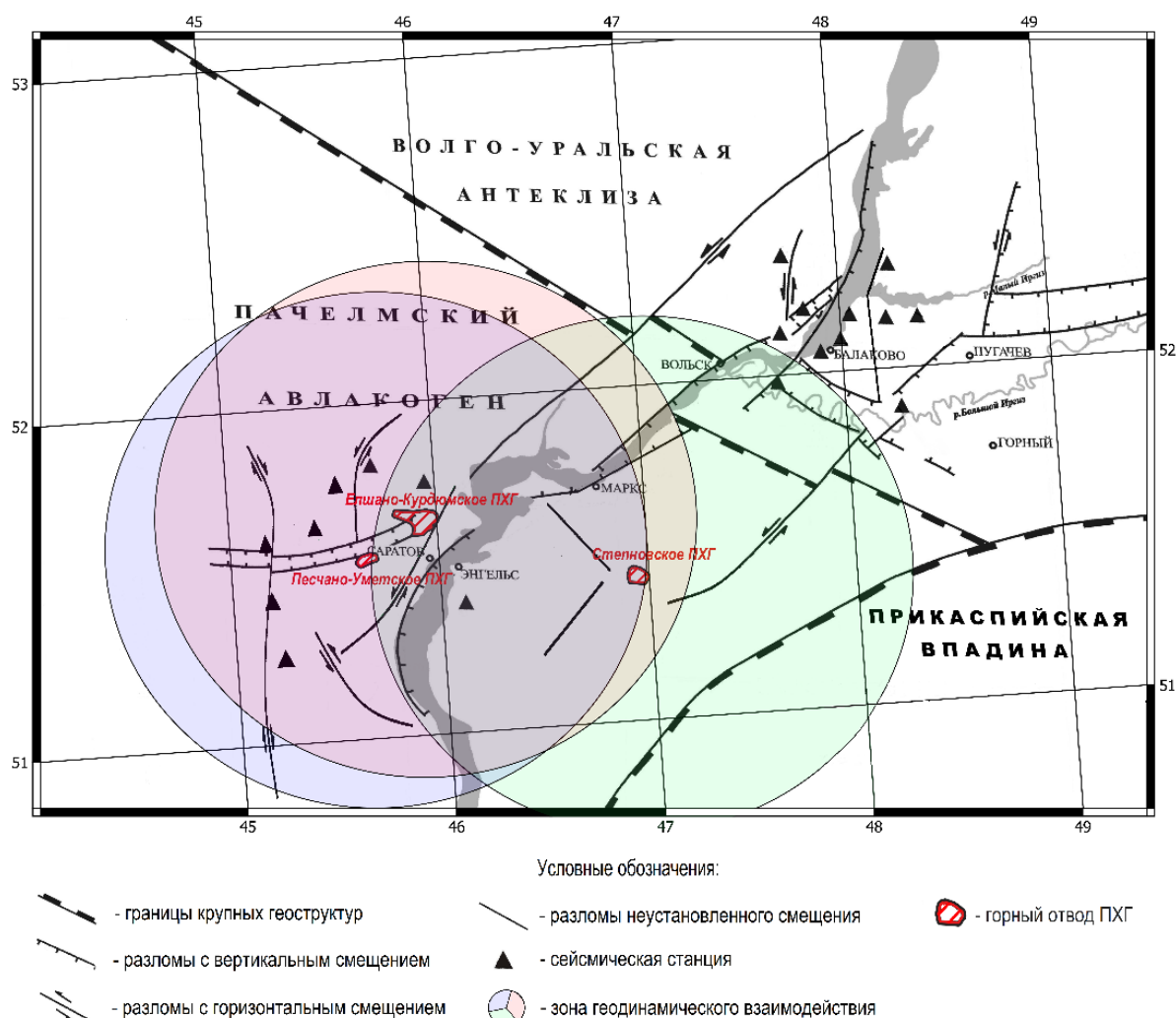


Рисунок 6 – Схема территориального геодинамического полигона для ПХГ Саратовской области

По результатам многочисленных наблюдений на геодинамических полигонах ПХГ предложено выбирать площадь локального геодинамического полигона с учетом расстояния от границ горного отвода (А) не менее $3H \times \text{ctg } \delta$, где H – максимальная глубина кровли эксплуатируемого пласта-коллектора на границах контура ГВК, δ – граничный угол.

При проектировании локального геодинамического полигона геодезические сети необходимо принимать длиной (L) не менее $B + 2l$ поперек зон влияния разломов, где l – расстояние между реперами, но не менее 100 м.; B – ширина зон динамического влияния разломов. Конфигурация профиля на местности создается таким образом, чтобы в каждом крыле разлома не менее

чем одна твердая сторона располагалась бы за пределами зоны влияния разлома.

Предложенный подход позволяет значительно повысить точность наблюдений и сократить затраты на проведение наблюдений, так как опорные реперы находятся вблизи исследуемой зоны, что не требует проложения ходов большой протяженности от фундаментальных реперов, которые находятся за пределами горного отвода и ошибочно считаются неподвижными.

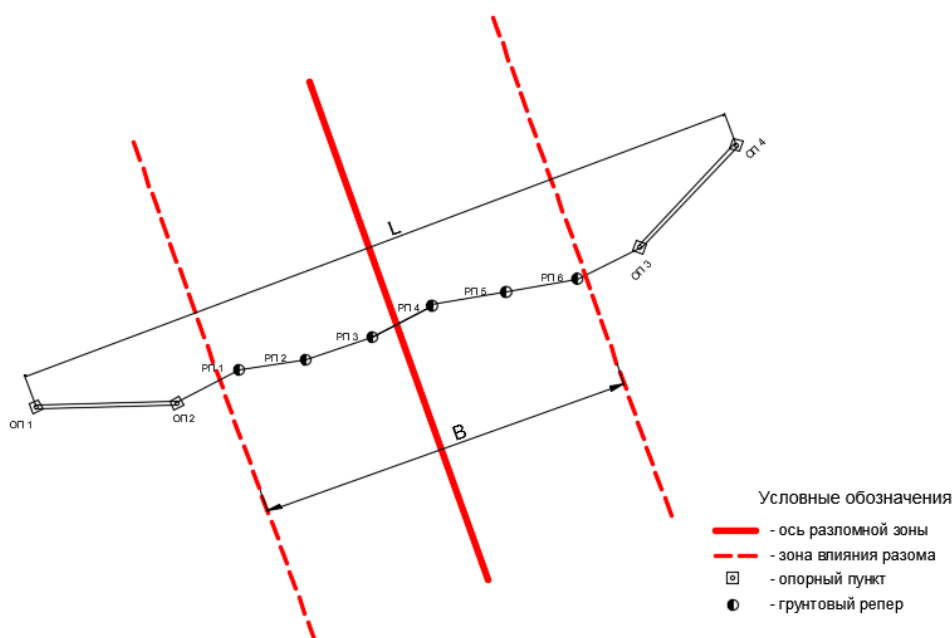


Рисунок 7 - Схема геодезической сети на геодинамическом полигоне

Данный способ был внедрен на геодинамическом полигоне Невского ПХГ, где большая часть территории занята лесами, лугами и болотами и где создание протяженных профильных линий реализовать технически невозможно. Применение ГНСС-наблюдений и спутниковой радиолокационной съемки по всей территории горного отвода также технически невозможно.

Локальный геодинамический полигон Невского ПХГ запроектирован в виде трех профильных линий, пересекающих разломную зону в западной, центральной и восточной частях горного отвода, выявленную по результатам бурения. Локальные профильные линии выбирались таким образом, чтобы их

расположение было в непосредственной близости от линейных объектов, и при этом были обеспечены наилучшие условия для проведения наблюдения.

По результатам моделирования сделан вывод, что обширных оседаний и аномальных поднятий земной поверхности не наблюдается. Происходящий циклический процесс сдвижения полностью компенсируется при закачке и отборе газа за пределами зоны динамического влияния разлома. В зоне динамического влияния разлома можно наблюдать незначительное накопление оседания земной поверхности. Максимальное поднятие земной поверхности при принятом уровне повышения давления в хранилище приурочено к разломной зоне и составляет 66 мм. Максимальное оседание земной поверхности тоже отмечено в этой области и составляет 76 мм.

Также в четвертой главе выполнено обоснование необходимости проведения систематических маркшейдерско-геодезических наблюдений в осенний нейтральный период, что позволяет исключить влияние на получаемый результат геомеханической составляющей, обусловленной изменением давления в пласте-коллекторе, т.е. оценить именно геодинамическую составляющую.

Обоснование периодичности наблюдений построено на результатах наблюдений в течение двух лет на геодинамическом полигоне Щелковского ПХГ. Рассматривались только результаты нивелирования по профильным линиям. На рисунках 8-9 приведены «эволюционные» и «пульсационные» графики. Первый цикл наблюдений был выполнен в весенний нейтральный период.

Положение эволюционных графиков (см. рис. 8) выше оси абсцисс является закономерным и обусловлено давлением в пласте-коллекторе. Подтверждены выявленные на стадии проектирования разломные зоны в районе реперов №№ 2-4; 17.

Расположение пульсационного графика в третьем цикле (см. рис. 9б) не согласуется с давлением в пласте-коллекторе, которое по сравнению с предыдущим циклом меньше. Также и в четвертом цикле (см. рис. 9в)

отсутствует зависимость между давлением в пласте-коллекторе и закономерностями в процессе сдвижения, характерном для ПХГ.

Так как Щелковское подземное хранилище газа имеет водонапорный режим эксплуатации и, учитывая геологическую особенность объекта, было сделано заключение о том, что поведение реперов профильной линии на периферии связано с процессом водооттеснения. Данное заключение полностью коррелируется с данными по пьезометрическим скважинам.

Сделан вывод, что полученный вектор сдвижения в зоне разлома состоит из геомеханической составляющей, отражающей процесс цикличной эксплуатации ПХГ, и геодинамической, показывающей степень активности разломной зоны. Примером является репер № 17, который имеет одинаковую геодинамическую составляющую и в третьем (см. рис. 8б), и в четвертом (см. рис. 8в) циклах, а его абсолютная отметка меняется в зависимости от изменения давления в пласте-коллекторе. Полученные результаты были также подтверждены для профильной линии II-II геодинамического полигона Щелковского ПХГ.

Проведение двух циклов в год и построение «пульсационных» и «эволюционных» графиков позволяют с высокой степенью достоверности выделить геомеханическую составляющую, однако, создают условия для неоднозначной интерпретации поведения реперов в разломных зонах. При таком подходе отсутствует возможность определить абсолютные значения сдвижения земной поверхности, вызванные активностью разломных зон.

Ещё одним недостатком существующего подхода является тот факт, что за первый (нулевой) цикл наблюдений принимаются значения, полученные в весенний нейтральный период. Давление в весенний нейтральный период в пласте-коллекторе определяется рядом факторов, что не обеспечивает одинаковых условий на момент проведения наблюдений.

Для исключения неоднозначности при изучении геодинамических процессов на локальном геодинамическом полигоне предложено проводить наблюдений один раз в год в осенний нейтральный период. Проведение одного

цикла наблюдений не исключает определение сдвижения земной поверхности, вызванного усталостью горных пород. Поскольку при обеспечении одинаковых условий, нахождение графика ниже оси абсцисс говорит о наличии необратимых деформаций.

Данное предложение апробировано на геодинамических полигонах Калужского, Гатчинского, Невского, Пунгинского ПХГ и Канчуринско-Мусинского комплекса ПХГ.

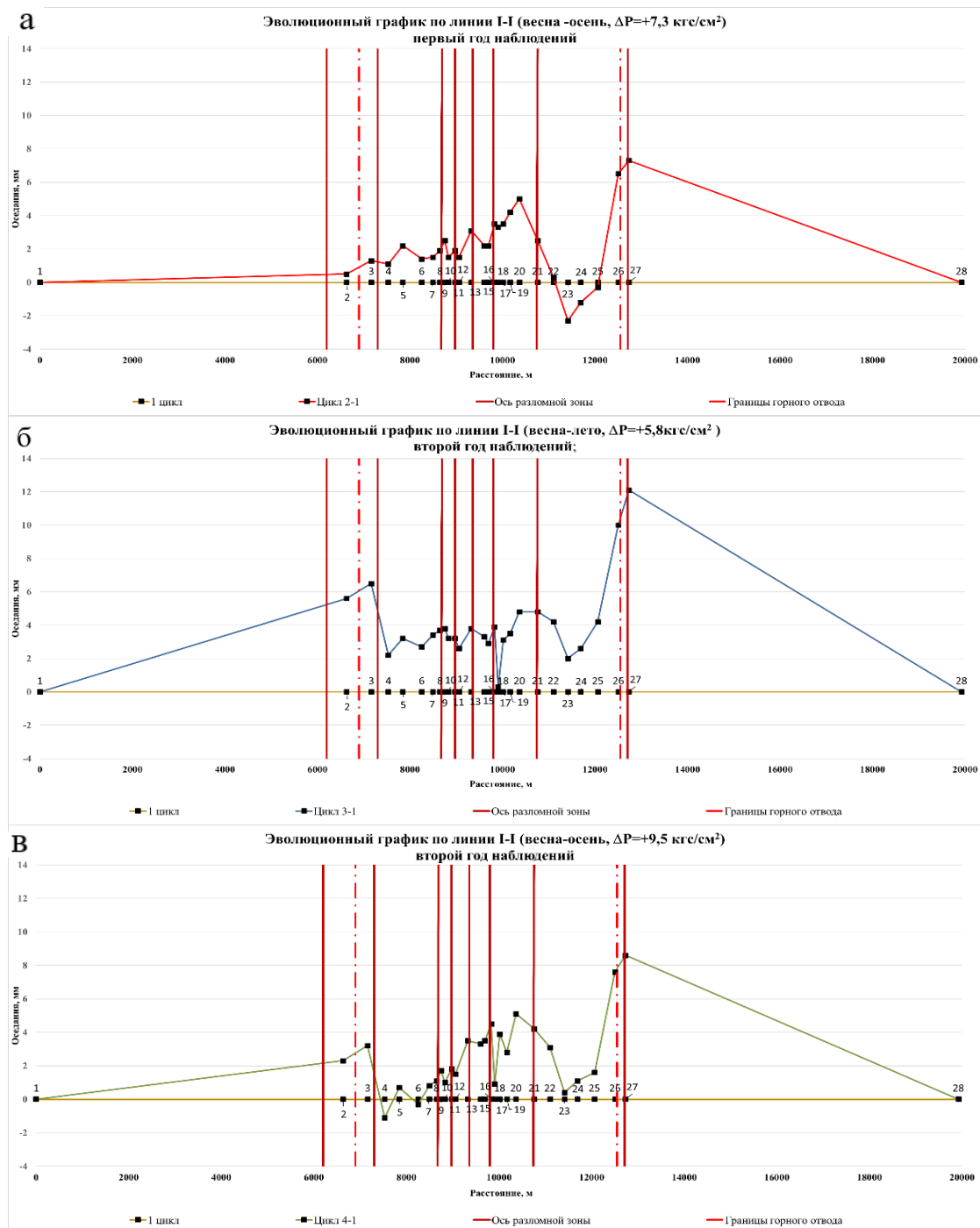


Рисунок 8 – Эволюционные графики профильной линии I-I.
а - цикл 2-1; б – цикл 3-1; в – цикл 4-1.

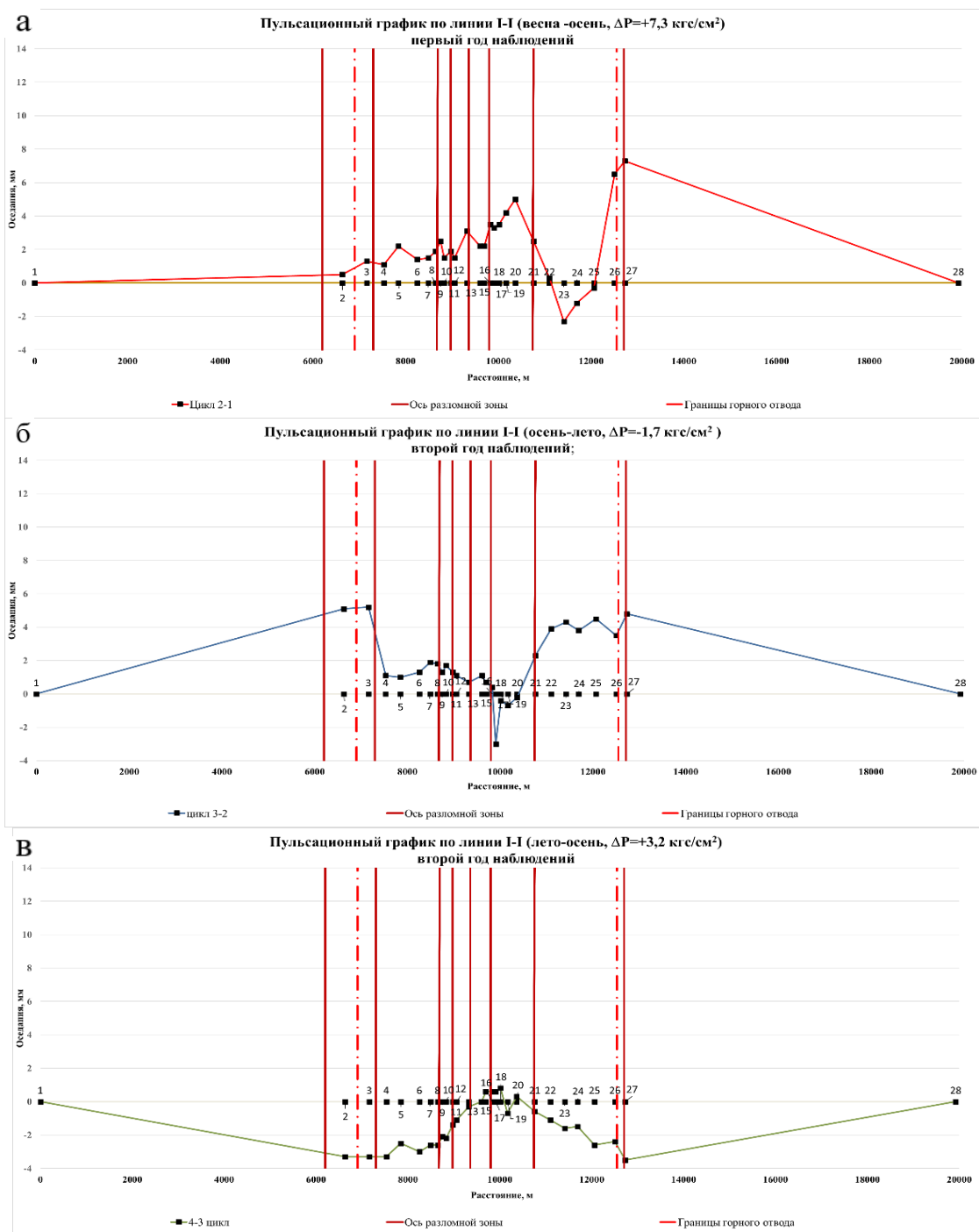


Рисунок 9 – Пульсационные графики профильной линии I-I.

а - цикл 2-1; б – цикл 3-2; в – цикл 4-3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В диссертационной работе дано решение актуальной научно–технической задачи совершенствования методов геодинамического мониторинга в районах расположения подземных хранилищ газа в пористых структурах для повышения уровня геоэкологической безопасности при их эксплуатации.

Получены следующие основные результаты:

1. Выполнен анализ существующего опыта изучения геодинамических процессов на подземных хранилищах газа и выявлены опасности при эксплуатации ПХГ. Эксплуатация ПХГ приводит к изменению геодинамической обстановки района расположения объекта, что ведет к образованию зон трещиноватости и возможной миграции газа в вышележащие горизонты, вплоть до выхода на земную поверхность, проявления аномального процесса сдвижения, техногенной сейсмичности.

2. Результаты многолетнего геодинамического мониторинга на ПХГ позволили выявить ранее неизвестный факт влияния эксплуатации ПХГ за пределами горного отвода. Для повышения геоэкологической безопасности эксплуатации ПХГ границы локального геодинамического полигона предложено определять с учетом расстояния от границ горного отвода не менее $3H \times \operatorname{ctg} \delta$, где H – максимальная глубина кровли эксплуатируемого пласта-коллектора на границах контура ГВК; δ - граничный угол.

3. Разработан способ выбора параметров территориального геодинамического полигона, для ситуации, когда на территории расположено несколько опасных объектов освоения недр. Способ предусматривает оценку размеров зон геодинамического влияния таких объектов с учетом их геодинамической позиции и объединение этих зон в единый территориальный геодинамический полигон.

4. На примере Саратовской области выполнено исследование сейсмической активности при эксплуатации подземных хранилищ газа и обоснована гипотеза о ее техногенной природе.

5. Разработан способ выбора конфигурации и размеров геодезических сетей на локальном геодинамическом полигоне для наблюдений за процессом сдвижения в пределах разломных зон, учитывающий ширину зон динамического влияния разломов. Разработанный способ направлен на повышение точности измерений и сокращение затрат на проведение геодинамического мониторинга и заключается в создании совокупности локальных профильных линий, пересекающих разломные зоны. Длина профильных линий выбирается не менее ширины зоны динамического влияния разлома, увеличенная на двойное расстояние между реперами.

6. Разработан способ геодинамического мониторинга, направленный на обеспечение экологической безопасности эксплуатации ПХГ, отличающийся периодичностью проведения маркшейдерско-геодезических наблюдений. На примере Щелковского ПХГ показано, что при классическом подходе к наблюдениям, получаемый вертикальный вектор сдвижения включает геомеханическую и геодинамическую составляющие, что не позволяет достоверно определить значения активности разломных зон и оценить уровень опасности разлома. Для исключения влияния геомеханической составляющей наблюдения предложено проводить 1 раз в год в осенний нейтральный период, что повышает представительность результатов и снижает затраты на геодинамический мониторинг.

Основные положения научно-квалификационной работы опубликованы в следующих работах.

Статьи, опубликованные в журналах из Перечня ВАК РФ и в изданиях, индексируемых международной базой Scopus:

1. Квятковская С.С., Шевчук С.В., Шевчук Р.В. Современное состояние организации и проведения работ по геодинамическому мониторингу в районах расположения подземных хранилищ газа. // Мониторинг. Наука и технологии. – 2019. – №2. – С. 76-79.
2. Шевчук С.В., Квятковская С.С., Шевчук Р.В. Новый подход к интерпретации данных геодинамического мониторинга на объектах подземных хранилищ газа // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2—1. — С. 77–91. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-77-91.
3. Шевчук С.В., Квятковская С.С., Шевчук Р.В., Шерматова С.С., Головки И.В. К вопросу геодинамического мониторинга территории Калининградской области // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2—1. — С. 298–309. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-298-309.
4. Батугин А.С., Шевчук С.В., Шерматова С.С. и др. К вопросу мониторинга геозкологической опасности при геодинамическом взаимодействии объектов освоения недр // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 10—1. — С. 63-73.

Объекты интеллектуальной собственности:

5. Шевчук С.В., Батугин А.С., Квятковская С.С. Изобретение: Способ выбора конфигурации и размеров геодезических сетей при геодинамическом мониторинге на объектах освоения // Патент RU № 2757387 С1 от 14.10.2021, Бюл. №29.
6. Шевчук С.В., Батугин А.С., Квятковская С.С. Изобретение: Способ выбора параметров геодинамического полигона на геодинамически опасных объектах освоения недр // Патент РФ RU № 2761547 С1 от 09.12.2021, Бюл. № 34.
7. Шевчук С.В., Квятковская С.С. Оптимизация выбора параметров геодинамического полигона на геодинамически опасных объектах освоения недр // Рационализаторское предложение от 10.08.2020 №01/01-20.
8. Шевчук С.В. Оптимизация выбора конфигурации и размеров геодезической сети при геодинамическом мониторинге на объектах освоения недр // Рационализаторское предложение от 05.10.2020 №01/02-20.
9. Шевчук С.В., Оптимизация исходных данных о геодинамических процессах при проектировании и строительстве подземных хранилищ газа в каменной соли // Рационализаторское предложение от 05.10.2020 №01/03-20.
10. Заявка на изобретение 2021119199 от 30.06.2021 Способ геодинамического мониторинга в районах расположения подземных хранилищ газа/ Шевчук С.В., Батугин А.С., Шевчук Р.В., Квятковская С.С.