УДК556.3:621.039.9

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ПОЛИГОНА

#### Горбунова Э.М.

#### Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Предложен научно-методический подход определения негативных последствий высокоинтенсивного воздействия на массив горных пород крупномасштабных взрывов на примере площадки «Заречье» Семипалатинского испытательного полигона. В качестве исходных данных использованы результаты наблюдений за режимом подземных вод в скважинах глубиной от 75 до 200 м в период с 1987 г. по 1990 г. Сравнительный анализ изменения уровня в створах опорных скважин направлен на выделение участков пространственно-временного перераспределения подземного потока. Изменение гидрогеодинамической обстановки рассматривается в качестве индикатора режима деформирования исследуемого массива при высокоинтенсивном воздействии.

#### Введение

По результатам комплексных геолого-геофизических исследований, выполненных на разных участках Семипалатинского испытательного полигона, установлено формирование зон наведенной (техногенной) трещиноватости, обусловленных проведением подземных ядерных взрывов (ПЯВ). Зоны откольного разрушения приурочены к поверхности раздела сред с различной акустической жесткостью и выделены на эпицентральных расстояниях до 1–2 м/кг<sup>1/3</sup> (в отдельных случаях до 10 м/кг<sup>1/3</sup>) [1]. Наличие структурных неоднородностей (например, разрывных нарушений) предопределяет ассиметричность механического действия взрыва.

Остаточные нарушения массива горных пород прослежены в виде изменения значений скоростей продольных волн и глубины залегания преломляющей границы, трассирующей положение кровли относительно монолитных скальных грунтов (подошвы распространения подземных вод) [2]. Соответственно, вариации уровня водоносных горизонтов, получающих преимущественное развитие в зонах экзогенного выветривания и тектонической трещиноватости пород, могут рассматриваться в качестве дополнительных индикаторов изменения состояния флюидонасыщенных коллекторов.

Гидрогеологические эффекты, связанные с проведением ПЯВ, в ближней эпицентральной зоне детально исследованы и приведены в работах [3, 4]. Первые сведения о подъеме уровня на 17 м относительно статического (первоначального положения) были получены через 40 дней после взрыва Aardvark, Невада 12.05.1962 г. в наблюдательной скважине, пройденной на расстоянии 307 м от эпицентра [3]. Формирование локальной депрессионной воронки в эпицентральной зоне подземного взрыва, проведенного 14.10.1965 г. в скважине 1003, установлено на площадке Сары-Узень Семипалатинского испытательного полигона. В наблюдательных скважинах, расположенных на расстоянии от 200 до 700 м от эпицентра, зарегистрировано снижение уровня на 0,7 – 1,3 м [5].

Одно из первых обобщений реакции подземных вод при крупномасштабных подземных взрывах представлено в [4, 6] в виде схематизации перераспределения подземного потока, связанного с формированием зон наведенной трещиноватости в эпицентральной зоне. Реакция подземных вод на взрывное воздействие в дальней зоне менее изучена. Отмечен региональный тренд снижения уровенной поверхности [7] и неоднозначные вариации уклонов подземного потока [8].

В открытой печати представлен анализ последствий проведения подземных ядерных взрывов – Сапnikin и Mirlow на острове Амчитка, входящем в цепь Алеутских островов. Показаны результаты регистрации вариаций расходов в ручьях, расположенных на эпицентральных расстояниях от 1,5 до 11,2 км, уровня и давления в скважинах глубиной от 96,3 до 2134,2 м, удаленных от эпицентров ПЯВ на 1,2–22,7 км, в течении первых суток после ПЯВ. Данные по долговременным наблюдениям за режимом поверхностных водотоков, источников и подземным водам отсутствуют. Приведены лишь сведения по эпизодическим измерениям, выполненным через 2 месяца после ПЯВ Cannikin.

Иисследование гидрогеодинамической обстановки после проведения ПЯВ и ее сопоставление с естественными ненарушенными гидрогеологическими условиями могут быть использованы для определения граничных условий различных режимов деформирования флюидонасыщенного коллектора и являются предметом настоящей статьи.

### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Площадка «Заречье» расположена в центральной части Семипалатинского испытательного полигона. С севера площадка ограничена долиной реки Чаган, с юга – грядой мелкосопочника. В геологическом отношении массив горных пород характеризуется четкой тектонической двухярусностью. Нижний

структурный этаж представлен породами палеозоя, верхний – осадочными отложениями мезо-кайнозоя мощностью от первых метров до первых десятков метров, заполняющими неровности палеорельефа (рисунок 1). В пределах площадки выделен региональный Калба-Чингизский разлом северо-западного простирания. В северной и южной частях развиты верхнепалеозойские массивы гранитов, гранодиоритов, сопровождаемые серией малых интрузий гранодиоритов, порфиритов и габбро-диоритов, прироченных к разломам разного ранга. Разрывные нарушения и зоны интрузивных контактов формируют структурный план фундамента.

Породы фундамента в верхней части подвержены экзогенному выветриванию и отличаются высокой степенью трещиноватости (модуль трещиноватости до 10–25) и средней прочностью (значения временного сопротивления одноосному сжатию в водонасыщенном состоянии не превышают 50 МПа). Мощность зоны экзогенного выветривания изменяется от 10 до 40 м, а в интрузивных образованиях и в тектонически ослабленных зонах возрастает до 60 м и более.

Положение структурной границы раздела между выветрелыми и относительно монолитными поро-

дам определено по результатам геофизического профилирования и подтверждено данными бурения скважин, геологической документацией керна, геофизическими и гидрогеологическими исследованиями в скважинах [9]. Поверхность кровли фундамента неровная с перепадами высот до 80 м. В субширотном направлении на абсолютных отметках ниже 300 м четко прослеживается переуглубленная древняя долина реки шириной от 1 до 3 км, которая контролирует пространственное распределение подземного потока и напоров (рисунок 1).

Основные водоносные горизонты приурочены к зонам экзогенного выветривания пород и тектонической трещиноватости. По состоянию на 28.07.1987 г. перед первым взрывом в скважине 1348 на площадке «Заречье» абсолютные отметки уровня подземных вод уменьшались в направлении на северо-восток от 365,8 м (по скв.24, пройденной в отрогах водораздельного хребта г. Кайтас) до 324,9 м (по скв.47, расположенной на равнине). Локальное снижение уровня на западе территории до абсолютных отметок 332,3–334,1 м связано с влиянием ПЯВ, проведенного 17.04.1987 г. в скважине 1384 на расстоянии 3 км от западной границы площадки.



1-8 на схеме (а): 1 – геологическая граница (пунктир – граница малых интрузий); 2 – разрывное нарушение (а – региональное, б – остальные); 3 – граница водоупора (бергштрихи направлены в сторону развития глин неогена); 4 – гидроизогипсы по состоянию: а – на 11.03.1987 г., 6 – на 06.1989 г., в – максимального снижения (на разрезе); 5 – основное направление движения подземных вод: а – до ПЯВ, 6 – после ПЯВ; 6 – скважина и ее номер: а – боевая, 6 – наблюдательная; 7 – линия разреза; 8-12 на разрезе (б): 8-9 – отложения: 8 – мезо-кайнозоя, 9 – палеозоя; 10 – интрузивные образования; 11 – подошва зоны экзогенного выветривания коренных пород; 12 – скважина

Рисунок 1. Площадка «Заречье». Схема палеорельефа и схематический разрез по линии I-I



Рисунок 2. Вариации уровня подземных вод на территории площадки «Заречье»

Подземные воды вскрыты на глубине от 2 до 80 м. Безнапорные воды залегают на глубине от 5–10 м до 25 м и преимущественно приурочены к склонам мелкосопочника, протягивающегося вдоль южной границы площадки «Заречье» (скв. 24, 38, 70, 71), в единичных случаях – распространены в пределах локальных выступов палеорельефа (скв.41). В зоне влияния регионального разлома и в пределах палеодолины напор подземных вод увеличивается до 60 м и более. Статический уровень устанавливается на глубине до 20 м.

Питание подземные воды получают вдоль северной и южной границы территории на участках локального и площадного выклинивания глин неогена, являющихся верхним водоупором, перекрывающим водоносный горизонт. В пределах юго-западного палеосклона основное направление движения подземных вод радиальное, от юго-восточного борта гранитного массива, – преимущественно в северо-восточном и северном направлениях. Уклон подземного потока вдоль склона палеодолины уменьшается в северо-восточном направлении от 0,03 до 0,003.

Режим подземных вод равнинный, естественные колебания уровня не превышают 3–5 см/сут. В скважинах, расположенных в центре площадки, отмечен плавный тренд снижения уровня на 1,8–3,3 м за период наблюдений 1987–1990 гг. (рисунок 2). Амплитуда сезонных вариаций уровня весной в паводковый период вблизи области питания подземных вод достигает 2,5–4 м (скв. 46) и зависит от количества атмосферных осадков и последствий техногенного воздействия на массив горных пород.

В геологическом разрезе выдерживается вертикальная зональность фильтрационных свойств. По результатам расходометрии скважин наиболее водоносна верхняя часть горизонта – зона экзогенного выветривания пород и отдельные интервалы, приуроченные к зонам тектонической трещиноватости пород. По сейсмогеологическим данным пористость водовмещающих пород закономерно снижается по глубине [10].

#### Методика исследований

С 1987 г. по 1990 г. на территории площадки «Заречье» Семипалатинского испытательного полигона выполнялся стационарный мониторинг режима подземных вод по существующей сети скважин глубиной от 75 до 200 м через каждые 10-12 дней. Для измерений использовались стандартные хлопушки и электроуровнемеры. До и после ПЯВ проводились ежесуточные наблюдения за вариациями уровня подземных вод. На основе полученных данных были построены временные графики изменений уровня, пересчитанные в абсолютные отметки. Определялись гипсометрические «разрывы» в створах скважины, как разница между абсолютными значениями уровня подземных вод, выбранных на одну и ту же дату измерения до проведения ПЯВ и после завершения всех испытаний на площадке. Уклоны подземного потока в техногенно нарушенных условиях рассчитывались, как отношение амплитуд «разрывов» к расстоянию между скважинами.

Для прослеживания динамики изменения гидрогеологической ситуации составлены схемы изменения уровня подземных вод, зарегистрированные в скважинах между последовательно проведенными экспериментами в боевых скважинах. Выполнен анализ ранее полученных результатов комплексных геолого-геофизических исследований, бурения дополнительных скважин в пределах площадки и их гидрогеологического опробования, направленных на изучение изменений физических, физико-механических и фильтрационных свойств и основных параметров – скорости и глубины залегания структурной границы раздела между выветрелыми водонасыщенными и относительно монолитными породами, принятой за относительную подошву водоносных горизонтов.

Для сопоставления однотипной реакции подземных вод на проведение различных ПЯВ рассчитаны приведенные расстояния ( $\overline{R} = r/q^{1/3}$ ) с учетом мощности (q, кг), глубины (h, м) заряда [11] и эпицентрального расстояния до наблюдательных скважин. Полученные данные использованы при сравнении амплитуд и скорости максимального снижения уровня после ПЯВ и выделении зон с различными типами деформирования массива горных пород.

## Результаты исследований

Режим подземных вод площадки «Заречье» был осложнен проведением 5 ПЯВ в скважинах 1348, 1388, 1350, 1346 и 1352 (рисунок 3). Наблюдения за реакцией водоносного горизонта при ПЯВ в скважине 1348 выполнялись на протяжении первых двух суток по 6 скважинам (скв. 35, 36, 46–48, 53), расположенным на расстоянии от 2,2 до 4,4 км. В ближней зоне в первые часы после взрыва снижение уровня составило 0,4–0,6 м на расстоянии 2,2–4 км. В дальней зоне на протяжении последующих 5 месяцев прослежено плавное синхронное снижение уровня по скважинам 33, 34, 36 и 48 по направлению к боевой скважине 1348. «Разрыв» в створе скважин 35–36 увеличился на 1,0 м (от 5,5 м до 6,5 м).

Дренирующее влияние сформированной при взрыве воронки депрессии протягивалось на расстояние свыше 4 км вдоль днища палеодолины (рисунок 4). В ближней зоне снижение уровня подземных вод превышало 10 м. Это подтверждено данными наблюдений за уровнем подземных вод, зарегистрированным на глубине 24,9 м в скважине 52, пробуренной на расстоянии 300 м от эпицентра через 3 месяца после ПЯВ в скважине 1348 (рисунок 2).



Рисунок 3. Вариации уровня подземных вод на территории площадки «Заречье»



5–7: 1 – геологическая граница интрузивных образований (пунктир – граница малых интрузий); 2 – разрывные нарушения разного ранга; 3 – граница отложений миоцена (бергштрихи направлены в сторону развития глин неогена); 4 – изолинии амплитуды максимального снижения уровня (голубой) и восстановления (зеленый); 5 – основное направление движении подземных вод; 6–7 – скважина и ее номер: 6 – наблюдательная, цифра внизу – амплитуда максимального снижения уровня, м; 7 – боевая

Рисунок 4. Схема изменения уровня подземных вод после ПЯВ в скважине 1348 (за период с 28.07.1987 г. по 09.12.1987 г.)



Условные обозначения на рисунке 4

Рисунок 5. Схема изменения уровня подземных вод после ПЯВ в скважине 1388 (за период с 25.12.1987 г. по 31.03.1988 г.)

Последующее проведение ПЯВ в скважине 1388 оказало дополнительное влияние на изменение состояния массива горных пород и гидрогеологической ситуации в пределах территории исследований. В течение первых четырех суток измерения уровня проводились в 12 скважинах на эпицентральном расстоянии от 0,5 до 4,4 км. Через 18 суток сеть наблюдательных скважин была увеличена вдвое. Полученные данные позволили отследить снижение уровня подземных вод более чем на 50 м в эпицентральной зоне (скв.42, 43) и до 1,4 м на периферии на расстоянии 7,2 км (скв.35) через три месяца после ПЯВ (рисунок 5). Исключение составила эпицентральная зона ранее проведенного зона ПЯВ в скважине 1348, в пределах которой в скважине 52 прослежено восстановление уровня на 0,5 м через 18 дней после ПЯВ в скважине 1388 со скоростью 2,8 см/сут.

В ближней зоне отмечено фонтанирование скважин на протяжении первых 5 ч после ПЯВ в скважине 1388 и последующее снижение уровня подземных вод со скоростью более 30 м в первые сутки, на 10-13 м – во вторые, до 4-6 м – в третьи. Подобная реакция подземных вод указывает на наличие гидравлической связи с зонами наведенной трещиноватости и изменение фильтрационных свойств флюидонасыщенного коллектора на эпицентральном расстоянии 0,5-0,6 км. Рисунок изолиний снижения уровня после ПЯВ в скважине 1388 подтверждает наличие депрессионной воронки в эпицентральной зоне в радиусе до 1,2 км (рисунок 5). В скважинах 43 и 44 на эпицентральном расстоянии 0,6-1,5 км через 3 месяца после ПЯВ отмечено осушение кровли коренных пород изза сработки гидростатического напора.

На эпицентральных расстояниях от 1,3 до 2,2 км амплитуда снижения уровня в первые сутки после ПЯВ изменялась от 8,8 до 0,4 м, через 3 месяца после ПЯВ – от 23 до 12 м (рисунок 5). Исключение составил участок расположения скважины 41, в пределах которого из-за выклинивания относительного водоупора – глин неогена, трещинно-пластовые воды вза-имосвязаны со спорадически распространенными в аллювиальных отложениях грунтовыми водами. Режим напорного горизонта сменяется на безнапорный. В безнапорном водоносном комплексе, вскрытом в скважине 41 на глубине 2,1 м, снижение уровня через 3 месяца после ПЯВ в скважине 1388 не превысило 0,3 м на эпицентральном расстоянии 1,8 км.

Выделенный участок расположения скважины 41 представляет собой гидрогеологический водораздел, севернее которого отмечено существование депрессионной воронки, обусловленной ранее проведенным ПЯВ 15.11.1987 г. в скважине 1332, расположенной на расстоянии 3 км. Это подтверждается изменением направления подземного потока. До проведения ПЯВ в скважинах 1332 и 1388 абсолютные отметки уровней уменьшались в восточном направлении в створе скважин 34 – 33–36, на протяжении последующих месяцев (до проведения ПЯВ в скважине 1350), напротив, в западном направлении в створе скважин 36 – 33–34 (рисунок 3).

Изолинии снижения уровня асимметричны и вытянуты в восточном направлении вдоль северной границы регионального Калба-Чингизского разлома. Фрагментарно скальные породы в осевой части разлома через 10 дней после ПЯВ были осушены. В скважине 44, расположенной на расстоянии 1,5 км юго-западнее эпицентра ПЯВ в скважине 1388, мощность сдренированных пород составила 3 м. Через 3 месяца после ПЯВ зарегистрировано последующее снижение уровня в скважине 44 на 5 м на протяжении 9 месяцев (со скоростью 1,8 см/сут). В зоне влияния регионального разлома в скважине 40 на эпицентральном расстоянии 2,2 км напор подземных вод уменьшился на 23 м через 3 месяца после ПЯВ в скважине 1388.

В остальных скважинах, расположенных на расстоянии от 3,2 до 7,5 км юго-восточнее и восточнее эпицентра ПЯВ в скважине 1388, отмечено плавное снижение уровня в течение 3 мес. на 1,4–2,2 м в центральной части южного борта палеодолины. Вблизи области питания в скважинах 24 и 37 снижение уровня не превысило 0,2–0,4 м. На эпицентральном расстоянии от 8,2 до 14,6 км уровень подземных вод в течение месяца практически не изменился (рисунок 5). Прослежен естественный подъем уровня на 4 м в марте 1988 г. в паводковый период в скважине 46 и техногенное восстановление уровенной поверхности в скважине 52 (рисунок 2).

Таким образом, на схеме изменения уровня подземных вод через 3 мес. после ПЯВ в скважине 1388 выделены 2 участка (рисунок 5). В пределах восточного участка установлено постепенное восстановление уровня после ПЯВ в скважине 1348. Западный участок характеризуется максимальным дренированием массива после ПЯВ в скважинах 1332 и 1388. Разрывное нарушение северо-западного простирания, расположенное в центре площадки «Заречье», к которому приурочена малая интрузия порфиритов верхнего палеозоя, выступает в качестве гидрогеологически активной границы, контролирующей режимы снижения и восстановления уровня подземных вод.

Через 8 мес. после ПЯВ в скважине 1388 в центральной части площадки «Заречье» прослежена относительная стабилизация гидрогеологической ситуации (рисунок 6). Максимальный подъем уровня на 20 м и более отмечен на западе в эпицентральной зоне ПЯВ в скважине 1388. В пределах южной зоны влияния регионального разлома сохраняется режим дренирования водоносного горизонта. Процесс восстановления техногенно нарушенного режима подземных вод после ПЯВ в скважинах 1348 и 1388 на площадке «Заречье» осложнен проведением последующей серии ПЯВ в скважинах 1350, 1346 и 1352 (рисунки 2, 3). Максимальные снижения уровня на 16–35 м зарегистрированы через 4–7 дней после высокоинтенсивного воздействии на массив на расстоянии от 0,5 до 0,9 км от эпицентров ПЯВ. Изменения гидрогеологической ситуации представлены на сводной схеме амплитуд максимального снижения уровня подземных вод за весь период наблюдений, совмещенной с данными максимальных изменений, зарегистрированными в ближней зоне через 4–7 дней после ПЯВ в скважинах 1350, 1346 и 1352 (рисунок 7).

При ПЯВ в скважине 1350 депрессионная воронка имеет асимметричную форму, соответствует границе интрузивного образования и протягивается вдоль палеодолины. Уклоны подземного потока по направлению к эпицентру ПЯВ увеличиваются от 0,008 в створе скважин 33–36 до 0,014 в створе скважин 35–36. Восточнее эпицентра ПЯВ на расстоянии 3,4 км в скважине 52 сохраняется техногенно нарушенный режим подземных вод.



черные стрелки – максимальные расстояния зон необратимого и хрупко-пластического деформиро сыщенного коллектора, соответственно





Рисунок 8. Зависимость от приведенного расстояния амплитуды и скорости максимального снижения уровня подземных вод после ПЯВ, проведенных в скважинах: 1348 (через 1 день), 1388 (через 45 дней), 1350 (через 28 дней), 1346 (через 2 дня), 1352 (через 3 дня)

Процесс восстановления уровня через 3 месяца после ПЯВ в скважине 1350 осложнен последующим проведением ПЯВ в скважине 1346. Максимальное снижение уровня прослежено через 5 суток западнее эпицентра ПЯВ выше по направлению подземного потока в скважине 57. Радиус депрессионной воронки достигал 2,2 км. В относительно ненарушенных условиях «разрыв» уровней в створе скважин 58–57 не превышал 4,3 м (рисунок 2), уклон подземного потока – 0,0013. После завершения испытаний «разрыв» уровней составил 5,2 м, уклон подземного потока на северо-востоке площадки «Заречье» увеличился до 0,0016.

Через 4 дня после ПЯВ в скважине 1352 максимальное снижение уровня на 35 м отмечено на расстоянии 0,5 км южнее эпицентра выше по направлению подземного потока в скважине 88, пройденной в осевой зоне регионального разлома на глубину 200 м, вскрывающей многослойную толщу гранодиоритов, туфолав и андезитов. В створе скважин 87–88 уклон подземного потока увеличился от 0,002 до 0,07. Радиус депрессионной воронки достигал 1,6 км. В центральной и восточной части площадки «Заречье» режим подземных вод относительно стабилен.

Сравнительный анализ техногенно нарушенного режима подземных вод после ПЯВ позволил выделить области максимального снижения уровня и определить размеры сформированных депрессионных воронок. Эпицентральное расстояние, в пределах которого снижение уровня превышает 10 м, варьирует от 1,2 км после ПЯВ в скважине 1352 (рисунок 7) до 2,3 км после ПЯВ в скважине 1388 (рисунок 6). Максимальные изменения уклонов подземного потока в северо-восточном направлении прослежены в западной и центральной части Калба-Чингизского разлома от 0,002–0,009 до 0,05–0,07 в створах скважин 55–44 и 87–88 соответственно. На северо-востоке площадки «Заречье» максимальные значения уклонов подземного потока за период наблюдений 1988–1990 гг. варьировали от 0,006 до 0,014 в створе скважин 72–57.

В пределах регионального Калба-Чингизского разлома прослежено повторное формирование зоны техногенно нарушенного режима подземных вод после проведения ПЯВ в скважине 1352. Подобный участок изменения гидрогеологической ситуации выделен западнее боевой скважины 1350 и севернее боевой скважины 1388. После ПЯВ в скважине 1350 отмечено последующее относительное восстановление движения подземных вод в северо-восточном направлении. Результаты исследований изменений гидрогеологической ситуации при ПЯВ могут быть привлечены для выделения границ между зонами, различающимися по типу деформирования коллектора.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Для совместного группирования полученных данных по 5 ПЯВ, проведенных в 1987–1989 гг., использован единый параметр – приведенное расстояние ( $\overline{R}$ ). Регистрация вариаций уровня подземных вод осуществлялась в различное время после ПЯВ и с разной периодичностью по техническим причинам. Поэтому на рисунке 8-а представлены значения амплитуд максимального снижения уровня подземных вод, зарегистрированные в эпицентральной зоне через 1–3 и 28–45 дней после ПЯВ. Выбранный временной интервал формирования техногенно нарушенного режима в ближней зоне – депрессионной воронки определяет перераспределение гидростатических напоров и уклонов подземного потока в дальней зоне. Максимальные амплитуды снижения уровня подземных вод, прослеженные после ПЯВ в скважинах через разный промежуток времени от первых суток до 1,5 месяцев, характеризуются, в целом, степенной зависимостью от приведенного расстояния. Наибольший диапазон значений амплитуд – от 51 до 3 м на расстоянии от 1,5 до 14 м/кг<sup>1/3</sup>, – отмечен через 45 и 28 дней после ПЯВ в скважинах 1388 и 1350. Для сопоставления зарегистрированных изменений гидрогеодинамической обстановки после каждого ПЯВ рассчитана средняя скорость максимального снижения уровня в наблюдательных скважинах (рисунок 8-б).

На приведенном расстоянии до 2,7 м/кг<sup>1/3</sup> скорость максимального снижения уровня подземных вод варьирует от 0,9 до 8,2 м/сут. В интервале приведенных расстояний от 2,7 до 5,6 м/кг<sup>1/3</sup> значения скорости максимального снижении уровня в среднем не превышают 0,3–0,5 м/сут, за исключением данных по двум скважинам. Повышенные значения скорости – 3,8 и 1,8 м/сут, прослежены вдоль осевой зоны регионального разлома в скважине 29, после ПЯВ в скважине 1352 и в скважине 67, расположенной ниже по направлению подземного потока от ПЯВ, проведенного в скважине 1346. На расстоянии более 5,6 м/кг<sup>1/3</sup> значения скорости максимального снижении уровня не превышают 0,1–0,2 м/сут, на расстоянии более 11 м/кг<sup>1/3</sup> – не изменяются.

Выделенные интервалы приведенных расстояний, полученные результатам обработки экспериментальных данных для каждого ПЯВ, обозначены стрелками на сводной схеме амплитуд максимального снижения и восстановления уровня подземных вод (рисунок 7) и могут быть соотнесены с границами зон деформирования массива горных пород. Полученные данные подтверждены результатами комплексных геолого-геофизических и гидрогеологических работ, выполненных после ПЯВ. На приведенных расстояниях до 2,7 м/кг<sup>1/3</sup> от ПЯВ в скважинах 1348, 1388, 1350 и 1352 и частично в интервале приведенных расстояний от 2,7 до 5,6 м/кг<sup>1/3</sup> отмечено снижение глубины залегания структурной границы на 5 и более м, приуроченной к кровле относительно монолитных пород [9]. В районе боевой скважине 1346 повторных профильных геофизических исследований после ПЯВ не проводилось. В скважинах, расположенных в пределах рассматриваемых интервалов приведенных расстояний, значения пластовых скоростей в зоне экзогенного выветривания. преимущественно уменьшились на 9-58 %, водопроводимость водовмещающих пород возросла в 1,1-2,0 раз. В единичных случаях (скв.42, 36) отмечено увеличение пластовой скорости на 35-42 %, водопроводимость пород уменьшилась в 0,1-0,5 раз. В скважинах, дополнительно пробуренных после проведения ПЯВ на приведенных расстояниях до 5,6 м/кг<sup>1/3</sup>, прослежен подъем уровня подземных вод на 0,5-26,1 м в связи с постепенной стабилизацией гидрогеологической ситуации, причем амплитуда восстановления уровня увеличивалась по направлению к эпицентру ПЯВ.

Приведенное расстояние до 2,7 м/кг<sup>1/3</sup> от ПЯВ может быть принято за внешнюю границу зоны необратимого деформирования массива горных пород, а приведенное расстояние до 5,6 м/кг $^{1/3}$  – за внешнюю границу зоны квазиобратимого (хрупко-пластического) деформирования. Изменения уровня подземных вод, отмеченные на приведенных расстояниях более 5,6 м/кг<sup>1/3</sup>, соотнесены с динамическим деформированием водовмещающей толщи. На приведенных расстояниях свыше 5,6 м/кг<sup>1/3</sup> сохраняется относительно ненарушенная высокоинтенсивным воздействием гидрогеологическая ситуация. Прослеженный региональный тренд снижения уровня подземных вод связан с постепенным перераспределением подземного потока, вызванного заполнением зон наведенной трещиноватости, сформированных при высокоинтенсивном воздействии в эпицентральной зоне, частично в зоне влияния регионального разлома и в пределах локальных участков дренирования кровли водовмещающих пород.

### Заключение

Сравнительный анализ изменения гидрогеодинамической обстановки после проведения ПЯВ на площадке «Заречье» Семипалатинского испытательного полигона нацелен на выделение участков пространственно-временного перераспределения подземного потока, связанного с необратимым и неравномерным деформированием флюидонасыщенного коллектора. Совместное группирование результатов экспериментальных наблюдений за техногенно нарушенным режимом подземных вод, сформированным после проведения 5 ПЯВ, способствует выделению общих закономерностей, соответствующих разным режимам деформирования массива горных пород.

Интенсивность нарушения режима подземных вод зависит как от параметров ПЯВ, так и от геолого-структурных и гидрогеологических условий, наличия техногенно-ослабленных зон от проведения предыдущих взрывов. В целом, выдерживается степенная зависимость между амплитудой максимального снижения уровня подземных вод и приведенным расстоянием.

Локальная депрессия, осложняющая подземный поток, может сохраняться длительное время не только в эпицентральной зоне, сопряженной с зонами техногенной трещиноватости, на приведенных расстояниях до 2,7 м/кг<sup>1/3</sup> (например, после ПЯВ в скважинах 1346, 1352), но и прослеживаться на участках постдинамического дренирования водовмещающих пород, в частности, в зоне влияние Калба-Чингизского разлома, на приведенных расстояниях до 5,6 м/кг<sup>1/3</sup> (после ПЯВ в скважинах 1388, 1350). Изменение обводненности регионального разлома неравномерное: в восточной части – снижение уровня подземных вод не превышает 5 м, в западной части – кровля водоносного горизонта частично сдренирована.

Положение внешних границ необратимого и квазиобратимого (хрупко-пластического) деформирования рассматриваемого массива подтверждены результатами сейсмического профилирования, проведенного до и после ПЯВ. Интервалы снижения положения границы раздела между выветрелыми и относительно монолитными породами сопряжены не только с эпицентральной областью, но и с зонами влияния разрывных нарушений, участками выклинивания относительно водоупора, в пределах локальных выступов палеофундамента, характеризующихся переходом напорного режима фильтрации подземных вод в безнапорный.

На эпицентральных расстояниях более 5,6 м/кг<sup>1/3</sup> отмечены динамические вариации уровня, выражен-

ные преимущественно в плавном снижении уровня подземных вод за счет частичной сработки статических запасов водоносного горизонта, связанной с постепенным заполнением систем подновленной петрогенетической, тектонической и сформированной техногенной трещиноватости. Предложенный метод выделения и анализа участков пространственно-временного перераспределения подземного потока в дальнейшем может быть использован при оценке последствий высокоинтенсивного воздействия, вызванного прохождением сейсмических волн от землетрясений.

Работа выполнена по теме Гос. задания № АААА - А17 - 117112350020-9 (Постановка задачи и актуализация архивных данных), при финансовой поддержке РФФИ проект № 17-05-01271 (Анализ режима деформирования массива).

## Литература

- 1. Адушкин, В.В. Подземные взрывы / В.В. Адушкин, А.А.. Спивак. М.: Наука, 2007. 579 с.
- Беляшова, Н.Н. Изучение влияния ядерных взрывов на окружающие горные породы и морфологию поверхности с целью разработки инспекции на местах / Н.Н. Беляшова, Л.А. Русинова, А.В. Беляшов, А.А. Смирнов // Вестник НЯЦ РК. – 2000. – Вып. 2. – С. 105–110.
- Knox, G.B. Analysis of a ground-water anomaly created by an underground nuclear explosion / G.B Knox, D.E. Rawson, J.A. Kover // J.Geophys. Res. – 1965. – V. 70, № 4. – P. 823–835.
- Адушкин, В.В. Основные закономерности движения подземных вод при крупномасштабных подземных взрывах / В.В. Адушкин, А.А. Спивак, Э.М. Горбунова, П.Б. Каазик, И.Н. Недбаев // Известия РАН. Физика Земли. – 1992.- № 3. – С. 80–93.
- 5. Израэль, Ю.А. Радиоактивное загрязнение природных сред при подземных ядерных взрывах и методы его прогнозирования / Ю.А. Израэль [и др.] / Л: Гидромет. 1970. 67 с.
- Адушкин, В.В. Гидрогеологические эффекты при крупномасштабных подземных взрывах / В.В. Адушкин, А.А. Спивак, Э.М. Горбунова, П.Б. Каазик, И.Н. Недбаев. – М:. ИФЗ АН СССР. – 1990. – 40 с.
- Hassan, A. Modeling groundwater flow and transport of radionuclides at Amchitka Island's Underground Nuclear Tests: Mirlow, Long Shot, and Cannikin. Nevada Operations Office / A. Hassan, K. Pohlmann, J. Chapman // U.S. Department of Energy. – Las Vegas. Nevada. – 2002. – 338 p.
- Горбунова, Э.М. Ретроспективный анализ режима подземных вод при проведении крупномасштабных экспериментов / Э.М. Горбунова, И.С. Свинцов // Вестник НЯЦ РК. – 2012. – Вып. 1. – С. 88–96.
- Горбунова, Э.М. Особенности деформирования массива горных пород при воздействии взрывом (на примере участка «Заречье» Семипалатинского испытательного полигона) / Э.М. Горбунова // Геофизика и проблемы нераспространения. Вестник НЯЦ РК. – 2003. – Вып. 2. – С. 113–122.
- 10. Горбунова, Э.М. Изменение гидрогеологических параметров в техногенно-нарушенных условиях // Э.М. Горбунова, А.И. Иванов // Вестник НЯЦ РК. 2008. Вып. 2 (33). С. 27–32.
- 11. Ан, В.А. Линейный тренд пробега продольной сейсмической волны / В.А. Ан., Л.Д. Годунова, П.Б. Каазик // Вестник НЯЦ РК. 2014. Вып. 2. С. 81–94.

# СЕМЕЙ ПОЛИГОНЫ АУМАҒЫНДАҒЫ ЖЕРАСТЫ СУДЫҢ ДЕҢГЕЙІНІҢ МОНИТОРИНГІ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША ТАУЖЫНЫСТАР МАССИВІ ДЕФОРМАЦИЯЛАНУ РЕЖИМІН АНЫҚТАУ

### Горбунова Э.М.

#### Ресей ғылыми академиясының Геосфералар динамикасы институты федераль мемлекеттік бюджеттік ғылым мекемесі, Мәскеу, Ресей

Семей сынау полигонындағы «Заречье» алаңы үлгісінде ірімасштабты жарылыстардың таужыныстар массивіне жоғары қарқынды әсерінің теріс салдарларын анықтаудың ғылыми-әдістемелік тәсілі ұсынылған. Бастапқы деректері ретінде жерасты сулардың режимін тереңдігі 75–200 м. ұңғымаларда 1987–1990 ж.ж. кезеңіндегі бақылаулардың нәтижелері қолданылған. Тірек ұңғымалардың тұстамасында деңгейі өзгерілуін салыстырма талдауы, жерасты ағымы кеңістік-уақыттық қайта таралу учаскелерін бөлуге бағытталған. Гидродинамикалық жағдайың өзгерілуі зерттелудегі массиві жоғары қарқынды әсерінде деформациялану режимінің индикаторы ретінде есептеледі.

# STUDY OF THE DEFORMATION MODE OF THE ROCK MASS BASED ON THE DATA OF UNDERGROUND WATER MONITORING AT THE SEMIPALATINSK TEST SITE

#### E.M. Gorbunova

#### Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The paper proposes a scientific-methodological approach to determine the negative consequences of high-intensity impacts of large-scale explosions on the rock mass at the example of "Zarechye" site of the Semipalatinsk test site. The results of observations for the period of 1987–1990 over the underground water level in wells with depths from 75 to 200 m were used as the raw data. A comparative analysis of level alterations along a profile of reference wells is aimed to identify the areas of time-spatial redistribution of the underground flow. The change of hydrogeological condition is considered as an indicator of the changing deformation regime of the rock mass subjected to a high-intensity impact.