# МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРЕЦИЗИОННОГО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПЛАТФОРМЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИДГ РАН «МИХНЕВО»)

# Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Кабыченко Н.В., Свинцов И.С.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, г. Москва, emgorbunova@bk.ru

## Введение

Подземные воды относятся к одному из наиболее ценных полезных ископаемых, которые повсеместно используются лля питьевого, хозяйственно-бытового И технологического водоснабжения. Одновременно с этим водоносные горизонты находятся в зоне влияния многоуровенной техногенной нагрузки, связанной с использованием и освоением подземного условий пространства. Изменение гидрогеологических предопределяет вид и степень интенсификации опасных природно-техногенных процессов, таких как карст, суффозия, просадки, влияющих на состояние несущих свойств грунтов. Поэтому в пределах градопромышленных агломераций, на участках разработки месторождений различного типа возрастает актуальность и необходимость организации и проведения высокоточного мониторинга режима подземных вод.

Прецизионные гидрогеологические наблюдения наиболее широко распространены в сейсмоактивных регионах мира [3, 8, 12, 18, 19, 21]. Совместный анализ сейсмических и гидрогеологических данных используется для оценки коллекторских свойств флюидонасыщенных массивов [16], изменений фильтрационных параметров, связанных с прохождением сейсмических волн [15] и техногенным воздействием [14], с целью разработки и апробации методики поиска предвестников землетрясений [7, 9].

В асейсмичных регионах высокоточный мониторинг режима подземных вод проводится на отдельных объектах в ограниченном объеме, преимущественно для решения научно-методических задач. На основе первых прецизионных синхронных измерений уровня и атмосферного давления с интервалом дискретизации 1 час в скважине «Обнинск» в 1986-1987 гг. были рассчитаны коэффициенты барометрической и приливной эффективности системы «пласт-скважина» и основные параметры приливных волн, выделенные в полученных гидрогеологических данных [2]. По результатам мониторинга уровня подземных вод с 1991 г. по 1994 г. в скважинах, расположенных в пос. Зеленый Ногинского района Московской области и на северо-западе Москвы, разработана методика выделения информативных интервалов вариаций уровня подземных вод, соответствующих теоретически рассчитанным приливным объемным деформациям грунта [11].

В 2005-2007 гг. автоматизированные системы измерений уровня и температуры использовались при эксплуатации месторождения подземных вод «Пионерное»в п. Новозаполярный, на инфильтрационном водозаборе Лазаревское в районе г. Сочи, на полигоне «Лужки» в Московской области и участке «Зеленые острова» в Саратовской области [6]. В настоящее время в рамках единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в России мониторинг подземных вод выполняется наряду с изучением опасных экзогенных и эндогенных геологических процессов [10].

На территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (ГФО «Михнево») прецизионные наблюдения за режимом разновозрастных водоносных горизонтов входят в состав комплексного мониторинга геофизических полей [1]. Ряд стационарных факторов (таких как вариации атмосферного давления, земные приливы) и эпизодических (прохождение волн от телесейсмических землетрясений, техногенная помеха), которые оказывают существенное влияние на состояние системы "водоносный горизонт-скважина" в различном диапазоне частот, рассматриваются в качестве зондирующих сигналов для дистанционной оценки проницаемости флюидонасыщенного коллектора трещинно-порового типа.

## Краткая характеристика гидрогеологических условий территории исследований

Геофизическая обсерватория ИДГ РАН «Михнево» (ГФО «Михнево») расположена на расстоянии 80 км южнее г. Москвы на северо-восточной окраине Приокско-террасного природного биосферного заповедника вне зоны активного техногенного влияния. В гидрогеологическом

отношении рассматриваемая территория приурочена к юго-западной части Московской синеклизы Восточно-Европейской платформы и представляет собой многослойную терригенно-карбонатную систему разновозрастных водоносных горизонтов и комплексов, разделенных водоупорами.

Прецизионный мониторинг уровня подземных вод проводится в двух наблюдательных скважинах, вскрывающих безнапорный и напорный водоносные горизонты в интервалах 42,9-56,2 и 92-115 м соответственно. Скважины оборудованы прецизионными датчиками уровня LMH308i (производство Германия) с точностью измерения 1,7 мм и частотой опроса 1 Гц.

Водовмещающие породы представлены известняками неравномерно трещиноватыми с подчиненными прослоями доломитов, глин. Наличие регионального водоупора – верейских глин среднего карбона предопределяет разобщенность уровней верхнего горизонта, прослеженных в интервале 42,9-46,4 м и нижнего, устанавливающегося на глубине 66,7-69,8 м за период наблюдений 2014-2016 гг. (рис.1).



Рис. 1. Вариации уровня каширского водоносного горизонта среднего карбона и алексинско-протвинского водоносного комплекса нижнего карбона за период наблюдений 2014-2016 гг.

Режим верхнего безнапорного водоносного горизонта техногенно-нарушенный из-за повсеместной эксплуатации подземных вод скважинами, колодцами и характеризуется региональным трендом снижения уровенной поверхности. Режим нижезалегающего напорного водоносного горизонта естественный. Амплитуды сезонных вариаций в паводковый период достигают 3 м.

Влияние атмосферного давления наиболее отчетливо выражено в вариациях уровня безнапорного водоносного горизонта по сравнению с напорным в диапазоне приливных волн (рис. 2). В амплитудном спектре нижнего горизонта прослежены суточные и полусуточные приливные волны, которые в верхнем горизонте сопоставимы с уровнем шума.



Рис. 2. Функция когерентности между уровнем безнапорного (серая линия) и напорного (черная линия) водоносных горизонтов. Пунктиром выделены периоды основных типов приливных волн

По результатам гидрогеологического опробования водопроводимость верхнего горизонта составляет 15 м<sup>2</sup>/сут, нижезалегающего - не превышает 4 м<sup>2</sup>/сут. По данным бурения и геофизических исследований в скважинах выделены зоны повышенной кавернозности и трещиноватости пород в интервалах 43-46 м, 50-54 м и 92-94 м, 99-100 м соответственно.

#### Основные результаты исследований

Рассматриваемые водоносные горизонты на территории ГФО «Михнево» различаются не только по фильтрационным свойствам и величине напора, но и по наличию или отсутствию гидрогеологических откликов на одни и те же стационарные и эпизодические факторы.

Уровень верхнего безнапорного водоносного горизонта осложнен техногенной помехой, связанной с периодическим формированием мини депрессионных воронок (рис. 3) из-за водоотбора каждые 5-7 суток из технической скважины, удаленной на расстояние 300 м.



Рис. 3. Уровень безнапорного водоносного горизонта, очищенный от влияния атмосферного давления (черная линия), и давления (серая линия) (в квадратной врезке показана одна из мини-депрессионных воронок)

Гидрогеологический отклик на подобное эпизодическое нарушение в наблюдательной скважине использован для оценки водопроводимости по данным восстановления уровня по стандартной методике [4]. Особенности формирования мини депрессионных воронок был проанализированы при частичном уменьшении мощности безнапорного водоносного горизонта на 3,6 м. Подобных исследований по рассмотрению техногенной помехи, связанной с влиянием удаленных откачек на уровень подземных вод, в качестве зондирующего сигнала при оценке фильтрационных свойств коллектора в разрезе скважины ранее не проводилось.

Обработка полученных высокоточных данных периодического зондирования коллектора на фоне устойчивого тренда снижение уровня позволила определить вертикальную анизотропию пласта. Полученные средние значения изменения проницаемости трещинно-порового коллектора по глубине в интервале 42,7-46,4 м составили 2,6-3,3 мД и не противоречат результатам лабораторных определений, полученных на образцах керна, отобранных при бурении из скважины.

В нижезалегающем напорном водоносном горизонте в составе выделенных приливных волн наиболее представительной и значимой является полусуточная волна лунного типа M<sub>2</sub>, которая может рассматриваться в качестве зондирующего сигнала для оценки фильтрационных свойств горизонта [5]. Значимые сезонные вариации уровня нижнего напорного водоносного горизонта осложняют анализ проницаемости коллектора по фазовому сдвигу между приливной волной M<sub>2</sub>, выделенной в уровне и смещении грунта (рис. 4) [20].

Представительность данных была существенно улучшена при рассмотрении интервалов квазистационарной фильтрации и исключении участков среднесуточных вариаций уровня более 5 см/сут. В рамках поро-упругой модели среды фоновые вариации проницаемости карбонатного коллектора с двойной пористостью изменяются от 0,08 до 1,5 мД.

На территории ГФО «Михнево» в напорном и безнапорном водоносных горизонтах зарегистрированы вариации уровня, вызванные прохождением сейсмических волн от землетрясений, произошедших на расстояниях 2000-16000 км (рис. 5а). Совместная обработка сейсмических записей, полученных малоапертурной группой «Михнево» (международный код MHVAR), и гидрогеологических данных позволяет оценить отклик водоносных горизонтов на землетрясения: типы волн и их параметры – период и амплитуду сигнала. Как для напорного, так и для безнапорного горизонтов отмечена высокая корреляция отклика со скоростью смещения грунта (рис. 56-г).

Реакция подземных вод на одно и то же землетрясение может отличаться в пределах точности измерений. В частности, при землетрясении в Чили 16.09.2015 г. в верхнем безнапорном водоносном горизонте, прослежены вариации уровня, вызванные цугом поперечной и поверхностных волн, тогда как в нижнем напорном горизонте динамические изменения уровня обусловлены только поверхностными волнами (рис. 5а) [13].



Рис. 4. Фазовый сдвиг между смещением грунта и уровнем напорного водоносного горизонта (а) и зависимость между водопроводимостью и фазовым сдвигом (б) (черные кружки - исходные значения, рассчитанные по эллипсам [5], красные кружки - значения, рассчитанные в окне 28 дней) (черная линия - теоретическая кривая [17], большая область - все значения, средняя - после исключения областей с повышенной скоростью подземного потока, малая - после откачки)



Рис. 5. Сейсмограмма Чилийского землетрясения 16.09.2015 Ms=8.3 и диаграммы изменения уровня воды (а), спектры скорости смещения грунта (б), уровня напорного (в) и безнапорного (г) водоносных горизонтов (а - сверху вниз: скорость смещения грунта, мм/с по горизонтальной компоненте (восточной) - GVE. Уровень безнапорного (WLC) и напорного (WLU) водоносных горизонтов. За начало отсчета по оси абсцисс принят момент прихода сейсмической волны на станцию MHVAR) (черная линия - шум, зарегистрированный в течение 3 часов до момента прихода РКіКР волны, серая линия - данные, зарегистрированные в течение 3 часов с момента прихода РКіКР волны)

На основе сравнительного анализа гидрогеологических откликов определен диапазон значений скорости смещения грунта, при которых зарегистрированы вариации уровня напорного и безнапорного водоносных горизонтов на прохождение сейсмических волн от катастрофических землетрясений в платформенных условиях. Установлено, что гидрогеологический отклик на поверхностные волны от землетрясений имеет пороговый характер, зависит от частоты и различается для напорного и безнапорного водоносных горизонтов (рис. 5в, г).

### Заключение

За период наблюдений с 2008 г. по 2017 г. накоплен определенный объем материала по исследованию вариаций уровня подземных вод, обусловленных изменением состояния массива под влиянием естественных факторов – земными приливами, прохождением сейсмических волн от удаленных землетрясений и связанных с техногенной помехой. В верхнем безнапорном водоносном горизонте наиболее отчетливо выражен гидрогеологический отклик на землетрясения и удаленные откачки. Вариации уровня нижезалегающего водоносного горизонта обусловлены земными приливами и катастрофическими землетрясениями.

Полученные результаты диагностики состояния карбонатного трещинно-порового коллектора подтверждают высокую эффективность прецизионного мониторинга и являются информативными

при проектировании и эксплуатации пластов в режиме реального времени. Амплитудно-частотные параметры гидрогеологических откликов безнапорного и напорного водоносных горизонтов на удаленные землетрясения превышают фоновые вариации уровней подземных вод и рекомендуется учитывать при строительстве объектов повышенного уровня ответственности в сложных инженерногеологических условиях из-за возможной активизации природно-техногенных процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской академии наук (проект № 0146 - 2015-0012).

#### Список литературы

1. Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Резниченко О.Ю. "Михнево": от сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории // Физика Земли. 2016. №1. С.108-119.

2. Багмет А.Л., Багмет М.И., Барабанов В.Л., Гриневский А.О., Киссин И.Г., Малугин В.А., Рукавишникова Т.А., Савин И.В. Исследование земноприливных колебаний уровня подземных вод на скважине "Обнинск" // Физика Земли. 1989. № 11. С.84-95.

3. Волейшо В.О., Куликов Г.В., Круподерова О.Е. Геодинамический режим Камчатско-Курильского и Сахалинского сейсмоактивного региона по данным ГГД-мониторинга // Разведка и охрана недр. 2007. №5. С.20-24.

4. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Свинцов И.С. Оценка проницаемости трещиннопорового коллектора при эпизодическом техногенном воздействии // Динамические процессы в геосферах. Вып.8. Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2016. С.42-51.

5. *Кабыченко Н.В.* Оценка фазового сдвига между приливной деформацией и вариациями уровня воды в скважине // Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы. Сб.науч.трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2008. С.62-712.

6. *Каплан А.Ю., Пашнин А.Ю*. Анализ результатов использования автоматизированных средств измерений при ведении мониторинга подземных вод // Разведка и охрана недр. 2007 №7. С.35-38.

7. Копылова Г.Н., Болдина С.В., Смирнов А.А., Чубарова Е.Г. Опыт регистрации вариаций уровня и физико-химических параметров подземных вод в пьезометрических скважинах, вызванных сильными землетрясениями (на примере Камчатки) // Сейсмические приборы. 2016. Т.52. №4. С.61-74.

8. Копылова Г.Н., Куликов Г.В., Тимофеев В.М. Оценка состояния и перспективы развития гидрогеодеформационного мониторинга сейсмоактивных регионов России // Разведка и охрана недр. 2007. №11. С.75-83.

9. Куликов Г.В., Рыжов А.А. Прогноз землетрясений по данным мониторинга

гидрогеодеформационного поля // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т.2. Вып.2. С.194-207.

10. Лыгин А.М., Стажило-Алексеев С.К., Кадурин И.Н., Сибгатулин В.Г., Кабанов А.А. Мониторинг напряженно-деформированного состояния геологической среды в Сибирском и Дальневосточном федеральных округах в 2007-2014 гг. Красноярск, 2015. 114 с.

11. *Любушин А.А. (мл.), Малугин В.А. Казанцева О.С.* Мониторинг приливных вариаций уровня подземных вод в группе водоносных горизонтов // Физика Земли. 1997. № 4. С.52-64.

12. Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений / Ред. Е.И. Гордеев, В.Н. Чебров. Петропавловск-Камчатский: Холд. Комп. «Новая книга», 2012. 480 с.

13. *Besedina A., Vinogradov E., Gorbunova E., Svintsov I.* Chilen Earthquakes<sup>A</sup> Aquifer Responses at the Russian Platform // Pure and Applied Geophysics. Vol.173. N2. PP.321-730. 2016. ISSN 0033-4553.

14. *Burbey T.J., Zhang M.* Assessing hydrofracing success from Earth tide and barometric response // Ground water. 2010. V.48. N.6. P.825-835.

15. *Doan M.L., Brodsky E.E., Priour R., Signer C.* Tydal analysis of borehole pressure - A tutorial. Schlumberger Research report, 2006. 61 p.

16. *Elkhoury J.E., Brodsky E.E., Agnew D.C.* Seismic waves increase permeability // Letters. 2006. V. 441. P. 1135-1138. (Supplementary Material for Nature manuscript 2005-11-13339 Seismic Waves Increase Permeability). doi:10.1038/nature04798

17. *Hsieh P.A., Bredehoeft J.D., Farr J.M.* Determination of aquifer transmissivity from Earth tide analysis // Water Resources Research. 1987. V. 23. N. 10. P. 1824-1832.

18. *Kitagawa Y., Itaba S., Matsumoto N., Koizumi N.* Frequency characteristics of the response of water pressure in a closed well to volumetric strain in the high frequency domain // Journal of Geophysical research. 2011. V.116. B08301. P.1-12. doi:10.1029/2010JB007794

19. *Liu C., Huang M.-W., Tsai Y.-B.* Water Level Fluctuations Induced by Ground Motions of Local and Teleseismic Earthquakes at Two Wells in Hualien, Eastern Taiwan // TAO. 2006. V.17. N.2. P.371-389.

20. Vinogradov E., Gorbunova E., Besedina A., Kabychenko N. Earth Tide Analysis Specifics in Case of Unstable Aquifer Regime // Pure and Applied Geophysics. Vol.174. N6. 2017. ISSN 0033-4553. DOI 10.1007/s00024-017-1585-z.

21. Wang C.-Y., Manga M. Earthquakes and Water. Berlin. Springer. 2010, 225 p.