

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА МЕЖДУ ПРИЛИВНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ В СМЕЩЕНИИ ГРУНТА И УРОВНЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПО ДАННЫМ ГФО «МИХНЕВО»

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

В статье выполнен анализ вариаций фазового сдвига между полусуточными приливными компонентами, выделенными в смещении грунта и уровне подземных вод по данным прецизионного мониторинга, проводимого на территории геофизической обсерватории (ГФО) ИДГ РАН «Михнево». Фазовый сдвиг рассчитан по методике построения «фазовых портретов». Для карбонатного коллектора трещинно-порового типа установлена зависимость между параметрами фазового сдвига и скоростью изменения уровня водоносного горизонта, выбранного в качестве опорного.

Введение

При определении фильтрационных параметров водоносного горизонта, в частности, водопроницаемости, может быть использовано значение фазового сдвига между приливными компонентами, выделенными в смещении грунта и уровне подземных вод. Анализ вариаций фазового сдвига направлен на изучение механизма формирования гидрогеологического отклика при изменении деформационных свойств коллектора под влиянием лунно-солнечных приливов.

При изменении пластового давления значения фазового сдвига зависят от упругой водоотдачи пласта и могут рассматриваться в качестве индикатора напряженно-деформированного состояния карбонатного коллектора трещинно-порового типа. Внедрение прецизионного мониторинга режима подземных вод на объектах нефтегазодобывающего комплекса имеет практическую значимость при осуществлении контроля за эффективностью разработки и эксплуатации месторождений, в том числе и при использовании метода гидроразрыва пласта.

Условия формирования приливных гармоник

На территории ГФО ИДГ РАН «Михнево» прецизионный мониторинг уровня напорного алексинско-протвинского водоносного горизонта проводится с февраля 2008 г. [Кочарян, 2008]. Подробное описание методики мониторинга приведено в [Виноградов, 2011]. Объектом исследований является карбонатный коллектор трещинно-порового типа, представленный известняками неравномерно трещиноватыми с подчиненными прослоями доломитов и глин. Уровень подземных вод залегает на глубине 70 м, вскрытая мощность водоносного горизонта составляет

23 м. Амплитуда вариаций гидростатического напора за период с 01.01.2011 по 31.05.2013 гг. достигает 2,2 м (рис. 1).

Режим подземных вод равнинного типа характеризуется четко выраженными сезонными вариациями уровня. Максимально высокие значения пьезометрической поверхности регистрируются ежегодно в мае, минимальные – в октябре в меженный период. Скорость изменения уровня подземных вод варьирует в широких пределах, в условиях интенсивного питания и разгрузки водоносного горизонта возрастает на порядок (рис. 2).

Данные регистрации уровня подземных вод без учета влияния атмосферного давления и полосовая фильтрация в диапазоне 11–13 часов позволяют проанализировать особенности формирования полусуточной приливной гармоники.

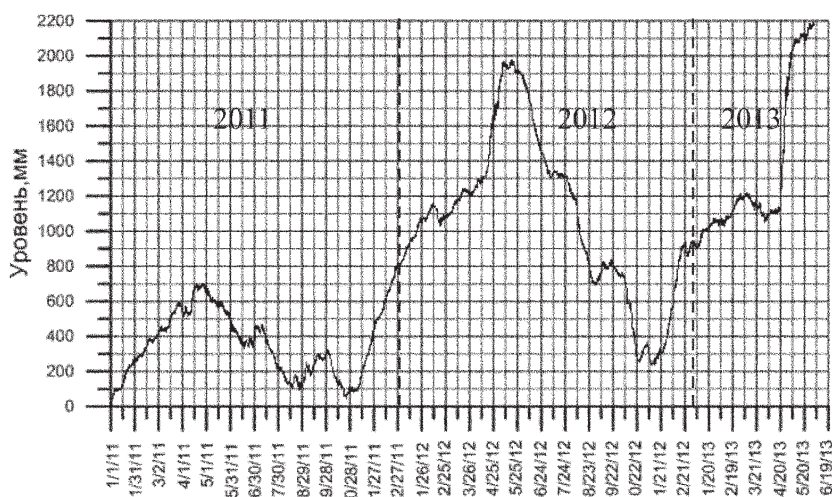


Рис. 1. Изменение уровня подземных вод по данным прецизионного мониторинга

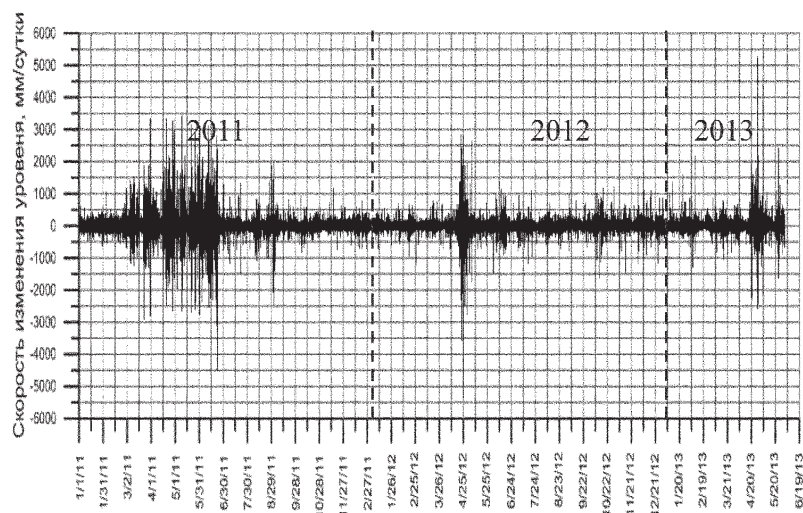


Рис. 2. Скорость изменения уровня подземных вод, очищенная от влияния атмосферного давления

За выбранный период наблюдений с 01.01.2011 по 31.05.2013 гг. амплитуда приливов в смещении грунта, рассчитанная с использованием программного пакета ETERNA 3.0, изменяется от ± 70 до ± 105 мм и характеризуется четко выраженной годовой цикличностью в отличие от барометрической приливной гармоники (рис. 3, а, б). По полусуточной компоненте усиление приливного сигнала в смещении грунта прослеживается в марте и сентябре. Амплитуда приливов, выделенных в уровне подземных вод, в среднем варьирует от ± 5 до ± 8 мм по полусуточной компоненте (рис. 3, в).

На представленных временных диаграммах огибающие приливов в уровне подземных вод в целом соответствуют вариациям приливов в смещении грунта. Вместе с тем гидрогеологический отклик на земные приливы отличается значительной модуляцией сигнала.

Следует отметить, что прослеженные экстремумы амплитуд приливов в апреле 2011 и 2012 гг. (рис. 3, в) приурочены к интервалам максимальных значений скорости изменения уровня подземных вод (рис. 2). В эти периоды зависимость между

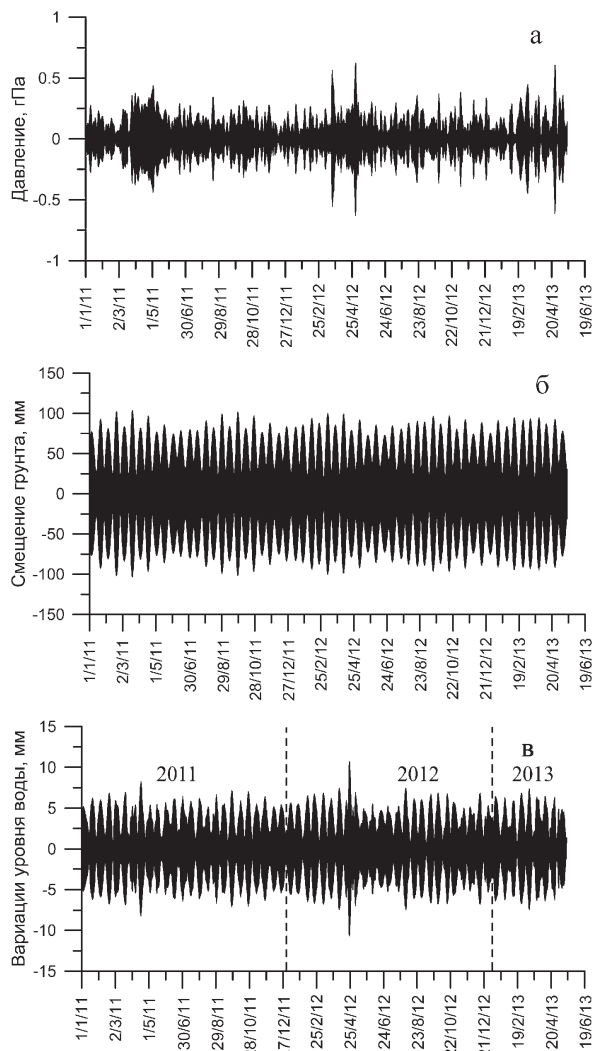


Рис. 3. Полусуточные приливные гармоник, выделенные в атмосферном давлении (а), теоретически рассчитанном смещении грунта (б) и уровне подземных вод, очищенном от атмосферного давления (в)

деформацией водовмещающего пласта и гидрогеологическим откликом на лунно-солнечные приливы осложнена влиянием дополнительных факторов, в частности, связанных с изменением условий питания и разгрузки водоносного горизонта. Поэтому участки, в пределах которых амплитуда скорости изменения уровня подземных вод превышает фоновые значения, исключены из рассмотрения при исследовании фазового сдвига.

Методика обработки данных

Для анализа фазового сдвига между приливными компонентами, выделенными в смещении грунта и уровне подземных вод из существующей базы прецизионных гидрогеологических данных, выбран непрерывный ряд наблюдений за вариациями уровня алексинско-протвинского водоносного горизонта за период с 1 января 2011 по 31 мая 2013 гг.

Первичная обработка заключалась в 5-минутной децимации гидрогеологических данных, очистке сигнала от длиннопериодного тренда и влияния атмосферного давления и последующей фильтрации в диапазоне 11–13 часов [Виноградов, 2011]. Достоверное выделение из спектра частоты полусуточной приливной компоненты $2,3 \cdot 10^{-5}$ Гц обеспечивается длительностью выборки более 6 суток (порядка $0,5 \cdot 10^6$ с) при разрешении по частоте не ниже $1,9 \cdot 10^{-6}$ года. Поэтому продолжительность рассматриваемых участков, отобранных из 882 суток наблюдения, составила от 6 до 15 суток.

Предварительно был выполнен помесечный интерактивный анализ фазовых портретов, построенных диаграмм изменения полусуточных гармоник приливных компонент в уровне воды относительно смещения грунта, рассчитанного по экспериментальным и теоретическим данным. По результатам обработки фазовых портретов проведено выделение интервалов, в пределах которых может быть рассчитан фазовый сдвиг по отношению полуосей построенных эллипсов по методике [Кабыченко, 2008].

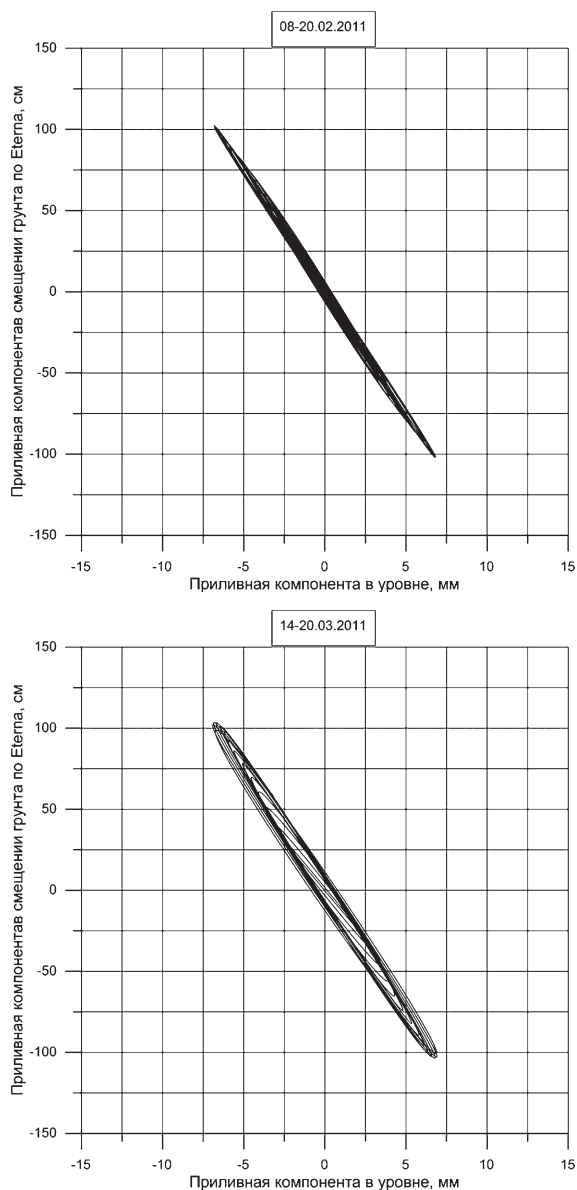
Подобный подход позволил выбрать 22 интервала, которые были использованы для оценки фазового сдвига между полусуточными приливными компонентами в смещении грунта и уровне подземных вод. На остальных участках соотношение между приливной компонентой, выделенной в уровне подземных вод и смещении грунта, искажено, поэтому к обработке подобных осложненных временных рядов гидрогеологических данных предлагаемая методика фазовых портретов не может быть применена.

При анализе суточной приливной компоненты необходимо рассматривать интервалы продолжительностью от 12 суток. Но в имеющейся выборке количество представительных интервалов ограничено, поэтому на данном этапе в статье исследован фазовый сдвиг между приливными компонентами в смещении грунта и уровне подземных вод флюидонасыщенного коллектора трещинно-порового типа только на основе анализа полусуточных приливных компонент.

Приливы в смещении грунта по вертикальной компоненте за выбранный период рассчитаны с использованием программного пакета ETERNA 3.0 [Wenzel, 1994] применительно к координатам сейсмической станции ГФО «Михнево» ($54^{\circ}57,6'$ с.ш. $37^{\circ}45,9'$ в.д.). Дополнительно с 1 января по 31 мая 2011 г. для выделения приливной компоненты в смещении грунта по вертикальной компоненте на основе, разработанной в ИДГ РАН методики [Кабыченко, 2011], привлечены дан-

ные регистрации датчиком STS-2, расположенным на территории ГФО «Михнево» в шахте на глубине 20 м. Значения смещения грунта, рассчитанные по экспериментальным данным, в 1,6–1,7 раз больше теоретически полученных величин.

По результатам оценки фазового сдвига между приливными компонентами в смещении грунта и уровне подземных вод для выбранных интервалов 08–20.02. и 14–20.03.2011 г. по экспериментальным и теоретически полученным значениям смещения грунта получены близкие величины (рис. 4, табл. 1). Однако из-за относительно небольшой продолжительности ряда экспериментальных сейсмических данных в дальнейшем при построении фазовых портретов в качестве опорных использованы теоретически рассчитанные значения смещения грунта.



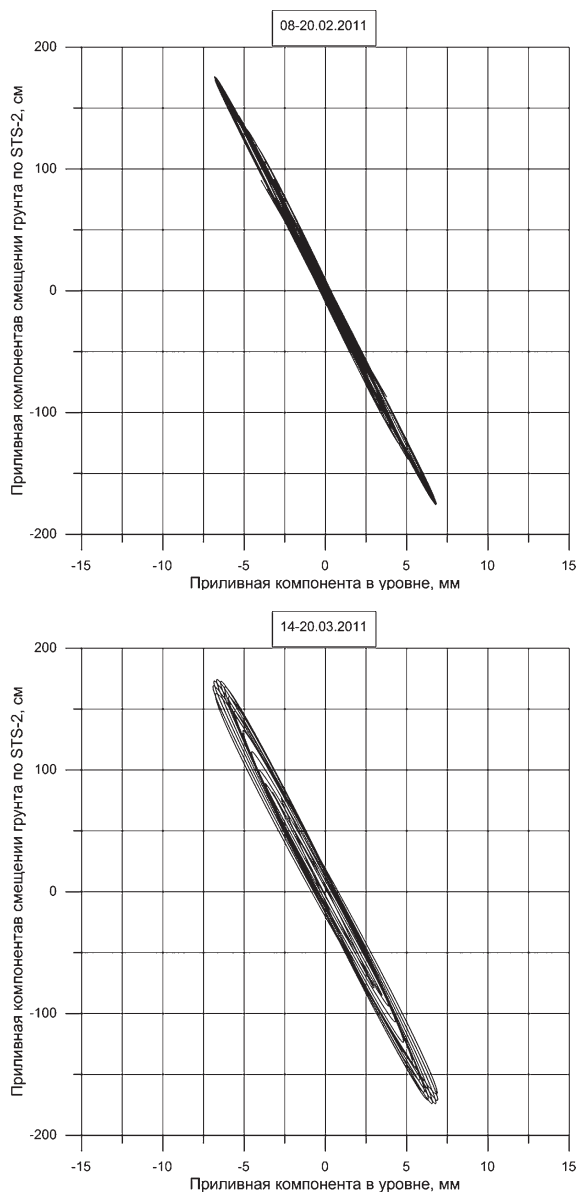


Рис. 4. Фазовые портреты между приливными компонентами, выделенными в уровне подземных вод и смещении грунта, рассчитанном теоретически (а) и по экспериментальным данным (б)

Анализ фазового сдвига

Оценка фазового сдвига (ϕ) выполнена по полусуточной компоненте по методике, изложенной в [Кабыченко, 2008], на основе анализа фазовых портретов, построенных по соотношению приливов, выделенных в уровне подземных вод и теоретически рассчитанном смещении грунта (табл. 1).

Таблица 1

Параметр	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
2011 г.												
φ^0	4,6	<u>3,4</u> 2,9*	<u>6,3</u> 6,3*	5,2	7,5	6,9	8,0	8,0	2,3	5,7	6,3	5,2
A_v , мм/сут	743	969	2288	3343	6096	4542	2088	1745	1180	1768	982	1306
2012 г.												
φ^0	5,2	6,3	6,3	–	–	2,9	5,2	4,6	6,3	6,9	5,2	–
A_v , мм/сут	1024	1652	1013	–	–	819	768	1009	1228	1698	889	–
2013 г.												
φ^0	6,3	5,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
A_v , мм/сут	1763	709	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

* Фазовый сдвиг определен по фазовому портрету между приливными компонентами в уровне подземных вод и смещении грунта, определенном по экспериментальным данным на территории ГФО «Михнево».

В целом выдерживается закономерное уменьшение значения фазового сдвига при меньших параметрах скорости изменения уровня подземных вод (рис. 5).

При сопоставлении полученных значений фазового сдвига по времени меньший диапазон вариаций рассматриваемого параметра отмечается с октября 2011 г. и 2012 гг. по январь 2012 и 2013 гг. соответственно (рис. 6).

При относительно высоких значениях скорости изменения уровня подземных вод, превышающих по амплитуде значения гидрогеологического отклика на лунно-солнечные приливы (рис. 7, а), фазовый сдвиг между приливными компонентами в смещении грунта и уровне подземных вод возрастает (в мае 2011 г. составляет 7,5°). Напротив, при меньших и сопоставимых значениях вариаций скорости изменения уровня относительно приливной компоненты (рис. 7, б) значение фазового сдвига уменьшается (в июне 2012 г. до 2,9°).

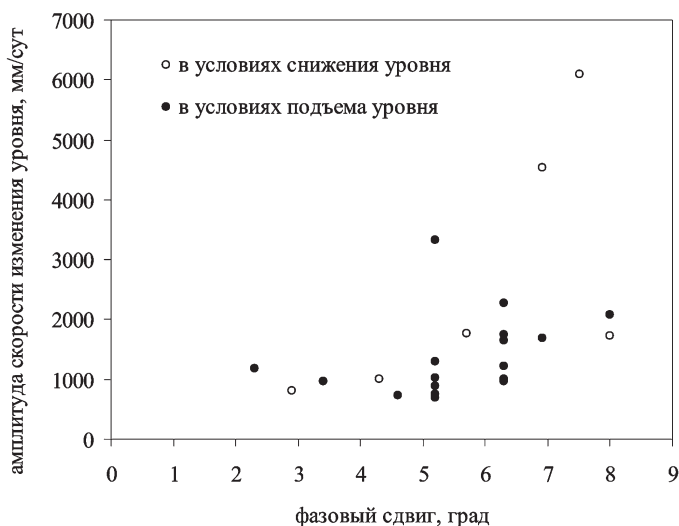


Рис. 5. Диаграмма зависимости фазового сдвига от амплитуды скорости изменения уровня подземных вод

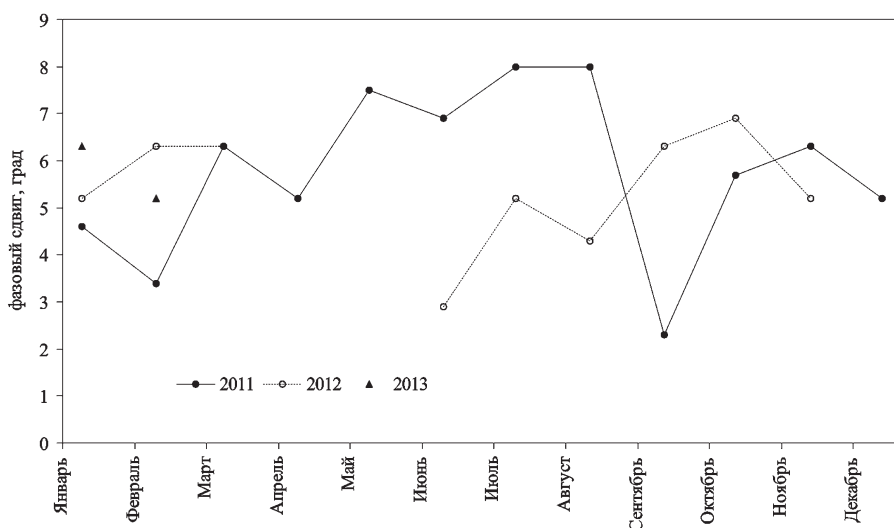
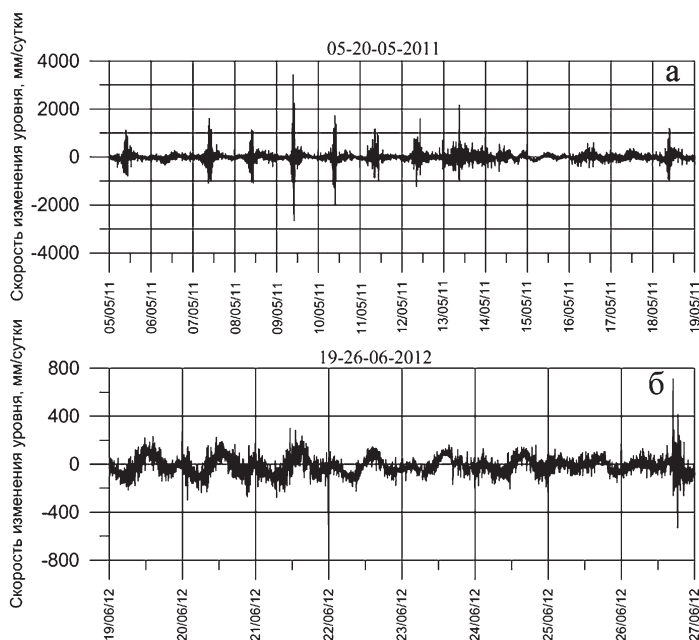


Рис. 6. Диаграмма изменения значений фазового сдвига

Рис. 7. Временные фрагменты изменения уровня подземных вод, очищенного от атмосферного давления



Гидрогеологический отклик на лунно-солнечные приливы сложен, так как приливная полусуточная гармоника, выделенная в уровне подземных вод, несмотря на очистку от влияния длиннопериодной и барометрической составляющих, сильно зашумлена и искажена (рис. 3, в). Вероятно, это может быть обусловлено неоднородностью строения рассматриваемого карбонатного коллектора трещинно-порового типа. В относительно стабильных гидрогеодинамических условиях значения фазового сдвига зависят от упругих вариаций пористого коллектора. При увеличении амплитуды скорости изменения уровня в 2 и более раз основное движение подзем-

ных вод, предположительно, происходит по микротрещинам и может ослаблять или усиливать гидрогеологический отклик на земные приливы.

Заключение

По данным прецизионного мониторинга, проводимого на территории ГФО ИДГ РАН «Михнево», определена амплитуда полусуточных приливных компонент в уровне подземных вод и смещении грунта. На основе сопоставления вариаций приливных компонент в уровне подземных вод с экспериментальными и теоретическими значениями приливов в смещении грунта, рассчитанными по вертикальной компоненте, построены фазовые портреты и выполнена оценка фазового сдвига.

Установлено, что диапазон вариаций фазового сдвига в среднем изменяется от 4,6 до 8,0° в 2011 г. и от 4,6 до 6,9° в 2012 г. Относительно невысокие значения фазового сдвига характерны для периодов увеличения напора водоносного горизонта в сентябре 2011 и июне 2012 гг. Напротив, при увеличении скорости изменения уровня подземных вод (май, июнь 2011 г.) и в меженный период (июль, август 2011 г.) параметр фазового сдвига уровня относительно смещения грунта возрастает до 8,0°.

Выделенные закономерности изменения значений фазового сдвига, соответствующие фоновым характеристикам рассматриваемого массива, прослежены по экспериментальным рядам «in situ». Дальнейшее наращивание ряда данных по результатам прецизионных гидрогеологических наблюдений позволит перейти от предварительной количественной оценки фазового сдвига между приливными компонентами в смещении грунта и уровне подземных вод к выделению закономерностей в формировании гидрогеологического отклика при изменении деформационных свойств карбонатного коллектора под влиянием внешних факторов – лунно-солнечных приливы, техногенное воздействие.

Работы проводятся при финансовой поддержке проекта РФФИ (проект № 12-05-00956-а) и гранта Правительства РФ – Ведущие научные школы РФ (НШ-3345.2014.5).

Литература

Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В., Свинцов И.С. Мониторинг уровня подземных вод по данным прецизионных измерений // Геоэкология. № 5. 2011. С.439–449.

Кабыченко Н.В. Оценка фазового сдвига между приливной деформацией и вариациями уровня воды в скважине // Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы: Сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2008. С. 62–72.

Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В., Беседина А.Н. Об оценке смещения и деформации в приливных волнах по цифровым записям сейсмометров STS-2 и КСЭШ-Р // Сейсмические приборы. Т. 4. № 3. 2011. С.13–18.

Кочарян Г.Г., Горбунова Э.М., Копылова Г.Н., Павлов Д.В., Свинцов И.С. Предварительные результаты прецизионных наблюдений за режимом подземных вод на территории геофизической обсерватории «Михнево» // Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы: Сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2008. С. 52–62.

Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // Bull. d'Inf. Marées Terrestre. 1994. № 118. P. 8719–8721.