

ВЛИЯНИЕ ЛУННО-СОЛНЕЧНЫХ ПРИЛИВОВ НА УРОВЕНЬ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПО ДАННЫМ ГФО ИДГ РАН «МИХНЕВО»

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

В статье представлены результаты высокоточного мониторинга режима подземных вод, проводимого на территории геофизической обсерватории «Михнево» на протяжении последних 6 лет. Прослежены основные закономерности формирования полусуточных и суточных приливных компонент в уровне подземных вод и смещении грунта, определены амплитудный фактор и фазовый сдвиг для водовмещающего коллектора трещинно-порового типа. Результаты поэтапной обработки прецизионных гидрогеологических рядов свидетельствуют о зависимости фазового сдвига между приливами, выделенными в уровне подземных вод, и теоретически рассчитанным смещением грунта от значения гидростатического напора.

Общие сведения

На территории ГФО «Михнево» с февраля 2008 года проводится прецизионный мониторинг за режимом напорного алексинско-протвинского водоносного горизонта нижнего карбона в наблюдательной скважине. Характеристика инженерно-геологических и гидрогеологических условий территории наблюдательного полигона приводится в [Горбунова, 2007]. Методика сбора и первичной обработки данных при помощи погружного датчика уровня LMP308i (производство Германия) подробно изложена в [Виноградов и др., 2011].

Синхронно выполняется регистрация сейсмических волн малоапертурной сейсмической антенной (МСА «Михнево») [Санина и др., 2008] и широкополосным сейсмометром STS-2, чувствительность которого в диапазоне приливных волн удалось повысить при помощи методики, учитывающей гравитационные свойства сейсмографа [Кабыченко и др., 2011].

Результаты прецизионных наблюдений за режимом подземных вод, метео- и сейсмическими параметрами на территории ГФО «Михнево» обобщены в единую базу данных и использованы для построения амплитудных спектров (рис. 1). В спектре атмосферного давления по данным цифровой метеостанции ГФО «Михнево» проявляется синхронное усиление сигнала на периодах 6, 8 и 12 часов. Суточная приливная компонента выражена слабо (рис. 1,а).

В спектре приливов уровня подземных вод ГФО «Михнево» прослеживаются четыре основных типа суточных (K_1 , O_1) и полусуточных (M_2 , S_2) приливных волн, которые соответствуют приливам, выделенным в скорости смещения грунта по сейсмическим данным STS-2 ГФО «Михнево» [Беседина и др., 2012]. Амплитуда полусуточных приливов в уровне подземных вод выше относительно суточных. Усиление сигнала на периодах 6 и 8 часов находится в пределах точности измерения.

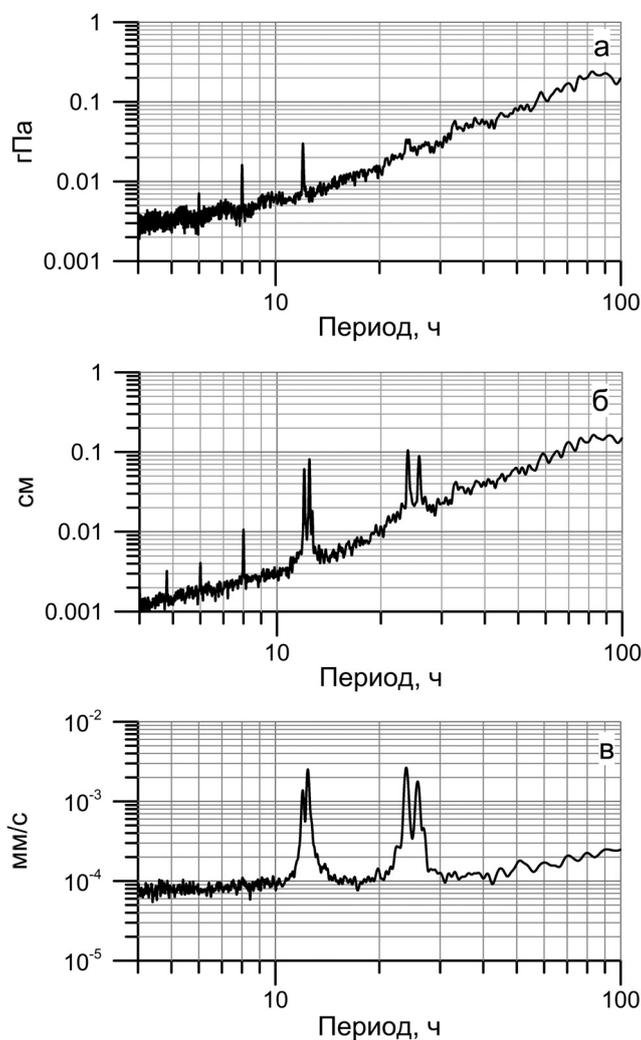


Рис. 1. Спектры приливов в атмосферном давлении (а), уровне подземных вод, отфильтрованного от барометрической составляющей (б), и скорости смещения грунта (в)

Полученные значения соответствуют распределению значений приливов, выделенных в смещении грунта, по широте [Мельхиор, 1968]. На основе программного пакета ETERNA 3.0 [Wenzel, 1994] определены смещения и деформации грунта по вертикальной компоненте флюидонасыщенного коллектора применительно к координатам сейсмической станции ГФО «Михнево» ($54^{\circ} 57.6' \text{ с.ш. } 37^{\circ} 45.9' \text{ в.д.}$).

Результаты амплитудного анализа суточных и полусуточных приливов, выделенных в уровне подземных вод и смещении грунта по вертикальной компоненте, рассчитанном теоретически, использованы для оценки амплитудного фактора. Выполнено сопоставление фазовых портретов, построенных за двухлетний период наблюдений 2011–2012 гг. с разбивкой по лунным циклам. Для выбранных участков, соответствующих значимым изменениям положения пьезометрической поверхности и квазистационарному режиму подземных вод, оценены значения фазового сдвига.

Закономерности проявления приливов в гидрогеологических и сейсмических данных

Для установления годовой цикличности приливной компоненты на первом этапе обработки гидрогеологических данных проведена полосовая фильтрация вариаций уровня подземных вод, децимированных к шагу 300 с, в диапазоне 13–15 дней. Выделенные двухнедельные циклы приливной компоненты в уровне подземных вод ГФО «Михнево», приуроченных к коллектору трещинно-порового типа, изменчивы по форме и интенсивности сигнала (рис. 2). Амплитуда приливов плавно увеличивается, достигая максимальных значений до $\pm 0,2$ м в конце марта – начале апреля 2011–2012 гг. Минимальные значения приливов регистрируются в летний период. Отмеченная годовая периодичность проявления двухнедельных циклов приливов в воде соответствует сезонным вариациям приливов в скорости смещения [Адушкин и др., 2012, Спивак и др., 2004] и, соответственно, смещению грунта.

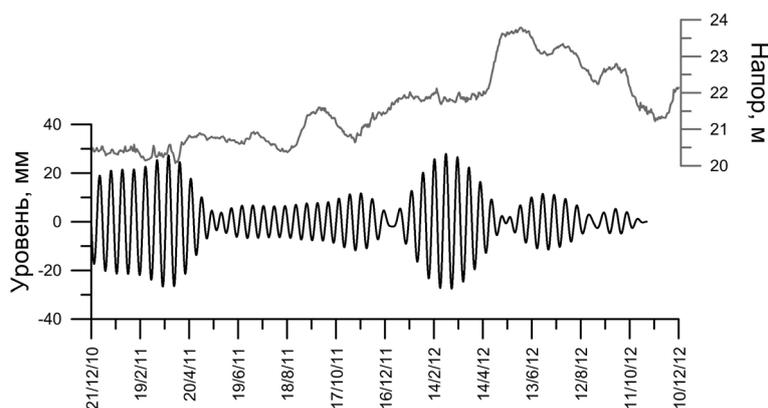


Рис. 2. Фильтрация вариаций уровня подземных вод в диапазоне 13–15 дней (черный) и напор подземных вод (серый)

Для выбранного интервала наблюдений с 21 декабря 2010 г. по 10 декабря 2012 г. прослежено более четкое проявление гармоник двухнедельных циклов с

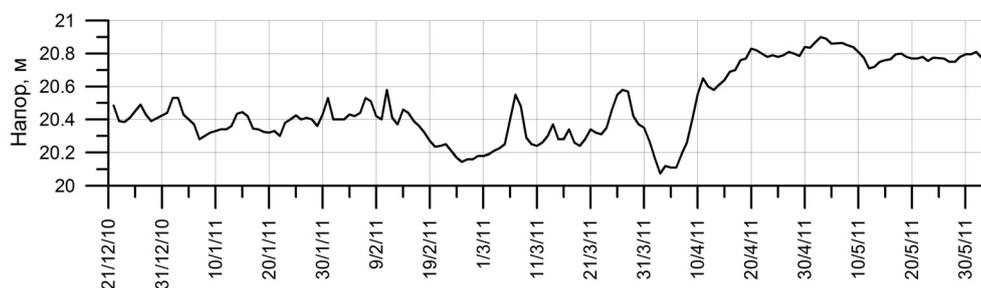


Рис. 3. Напор подземных вод (суточные измерения)

середины января 2012 г. на фоне увеличения гидростатического напора на 0,4 атм по сравнению с предшествующим периодом, характеризующимся более низким положением пьезометрической поверхности алексинско-протвинского горизонта.

Фильтрация рядов прецизионных гидрогеологических наблюдений, децимированных к шагу 300 с, в диапазоне 11–13 часов и 22–26 часов позволила выделить полусуточную и суточную компоненты в вариациях уровня подземных вод. Значения смещения грунта, рассчитанные по программе ETERNA за период с 21 декабря 2010 г. по 31 мая 2011 г., привлечены в качестве опорных для прослеживания взаимосвязи между вариациями уровня и объемной деформацией водовмещающих пород [Горбунова и др., 2009]. Сейсмические данные по МСА «Михнево» и STS-2 находятся в стадии обработки, поэтому в статье не рассматриваются. На рис. 3 приведены суточные измерения напора подземных вод за выбранный период.

Для полусуточной теоретически рассчитанной приливной компоненты в смещении грунта прослежено закономерное увеличение амплитуды приливов в периоды полнолуния по сравнению с новолунием. В марте 2011 г. амплитуда полусуточной приливной компоненты в смещении грунта достигает максимальных значений (до ± 100 мм) по сравнению с декабрем 2010 г. (от ± 70 мм) (рис. 4,а).

Изменения полусуточной приливной компоненты в уровне подземных вод синхронны вариациям приливов в смещении грунта, но максимальное значение амплитуды гидрогеологического отклика зарегистрировано в апреле 2011 г. и, вероятно, связано с общим трендом интенсивного восстановления пьезометрической поверхности со скоростью 5 см/сут и увеличением гидростатического напора на 0,2 атм. Следует отметить также и асимметричность коды приливов в уровне воды, в целом, в отличие от устойчивости формы приливной компоненты, рассчитанной в смещении грунта и соответствующей чередованию лунных циклов (рис. 4,а).

Для суточной компоненты в смещении грунта прослежено снижение интенсивности сигнала в марте (до ± 60 мм) с закономерным увеличением значений в декабре 2010 г. и июне 2011 г. (до ± 90 мм) (рис. 4,б). Общий ход суточной компоненты приливов в уровне подземных вод не противоречит выраженному тренду изменения интенсивности приливов в смещении грунта. Однако в период с 16 апреля по 14 мая суточная приливная компонента в уровне подземных вод выражена слабо. Предположительно, это может быть связано со сложной структурой водовмещающего коллектора и постепенностью перераспределения пластового давления в связи с увеличением гидростатического давления. На участке квазистационарного режима фильтрации с вариациями уровня до ± 2 см/сут с 12 по 31 мая 2011 г. амплитуда суточных приливов в воде закономерно возрастает.

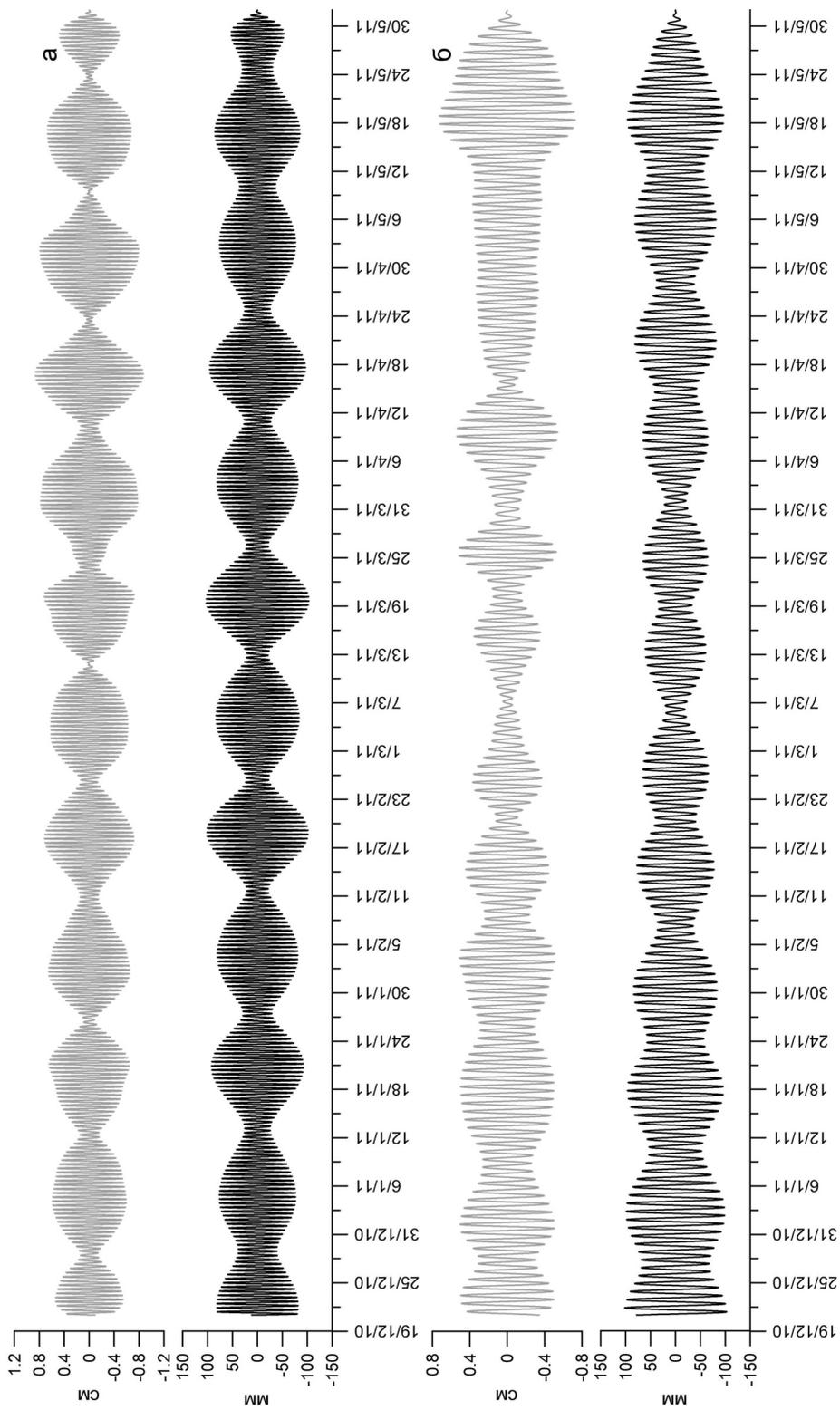


Рис. 4. Приливы в уровне подземных вод (серая линия) и смещении грунта (черная линия); а – полусуточная компонента, б – суточная компонента

Зарегистрированные значения максимальных амплитуд приливов в уровне и смещении грунта в периоды полно- и новолуний использованы для построения временных диаграмм (рис. 5). Выделенные в смещении грунта полусуточная и суточная приливные компоненты, теоретически рассчитанные по программе ETERNA, изменяются в противофазе. По полусуточной компоненте максимальное увеличение интенсивности приливов в смещении грунта регистрируется в весенний период – марте 2011 г. (рис. 5,а). Напротив, для суточной компоненты увеличение интенсивности приливов в смещении грунта в 1,5 и более раз фиксируется в зимний период (декабрь 2010 г.) и ближе к лету (конец мая 2011 г.) (рис. 5,б).

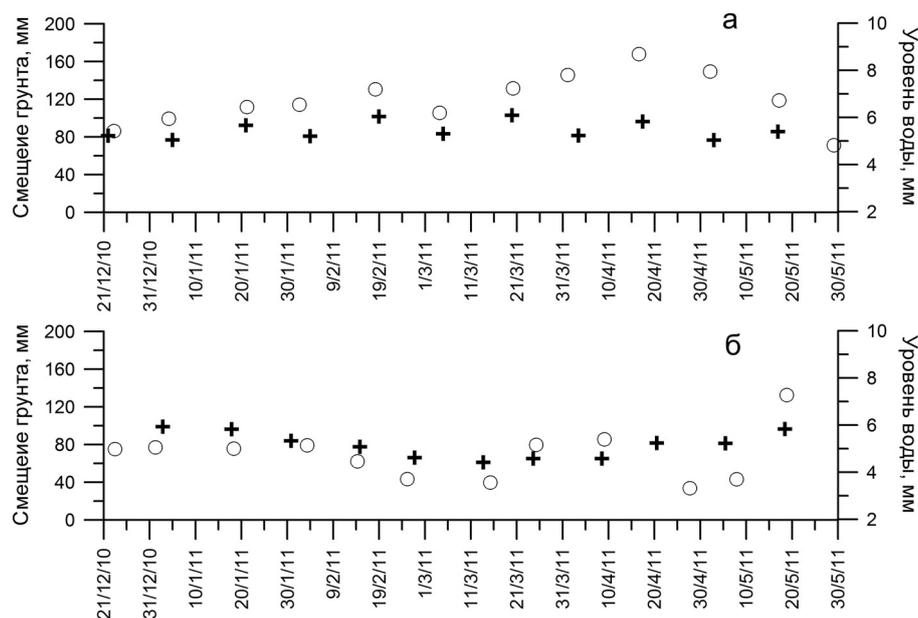


Рис. 5. Амплитуды полусуточной (а) и суточной (б) приливных компонент в уровне подземных вод (кружки) и смещении грунта (крестики)

Приливы в уровне подземных вод, в целом, соответствуют, вариациям приливов в смещении грунта и подтверждают динамику изменения свойств трещинно-порового коллектора [Кочарян и др., 2011]. Однако на временных диаграммах выделяются участки, косвенно свидетельствующие о влиянии дополнительных факторов на условия формирования приливной компоненты в уровне. Например, уменьшение амплитуды полусуточного прилива в уровне в марте 2011 г. на фоне относительного тренда увеличения амплитуд на протяжении марта-апреля 2011 г. может быть обусловлено постгидродинамической реакцией подземных вод на катастрофическое землетрясение, произошедшее 11 марта 2011 г. вблизи восточного побережья о. Хонсю, Япония (рис. 5,а). Частичное снижение интенсивности приливов суточной компоненты, предположительно, является следствием значимого увеличения гидростатического напора в апреле 2011 г. (рис. 5,б).

На основе значений амплитуд суточных и полусуточных приливов в уровне подземных вод и теоретически определенной деформации водовмещающих пород рассчитан амплитудный фактор, который представляет собой отношение ам-

плитуд гидрогеологического отклика на изменение свойств флюидонасыщенного массива (рис. 6). Амплитудный фактор алексинско-протвинского водоносного горизонта для суточной и полусуточной приливной компонент относительно постоянен и составляет 0,5 мм/нанострейн при деформации трещинно-порового коллектора от $3,8 \cdot 10^{-9}$ до $6,4 \cdot 10^{-9}$.

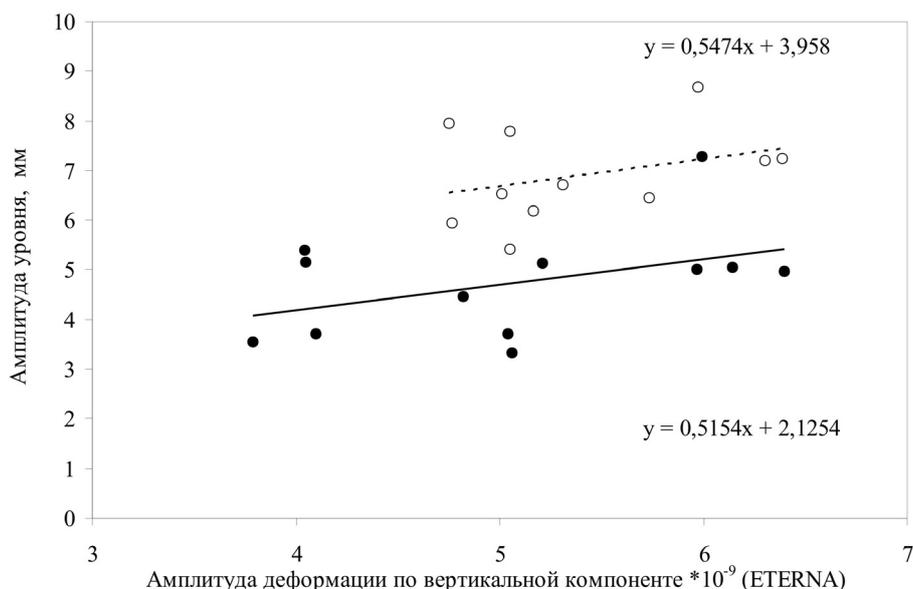


Рис. 6. Амплитудный фактор суточной и полусуточной приливной компонент (пустые кружки – значения полусуточной компоненты, залитые – значения суточной компоненты)

Фазовые портреты приливов

Для предварительного анализа фазового сдвига полусуточной и суточной компонент выбран представительный ряд гидрогеологических данных за 2011–2012 гг. (без разрывов измерений), для которого определены значения смещения грунта по пакету ETERNA. Разбивка интервалов для построения фазовых портретов между вариациями приливов в уровне и смещении грунта проведена в соответствии с лунными циклами.

Полученные фазовые портреты информативны, так как позволяют предварительно проследить изменчивость фазового сдвига, зависящую от вариаций приливной компоненты в воде на фоне относительно устойчивых теоретически рассчитанных параметров смещения грунта (рис. 7). Интервалам максимальных проявлений полусуточных приливов, выделенных в смещении грунта и в воде, соответствуют минимальные значения фазового сдвига.

В частности, соотношение амплитуд малых полуосей эллипсов, полученных при построении фазовых портретов, определяет величину фазового сдвига. Так для выбранных интервалов за март и сентябрь 2012 г., характеризующихся значительным увеличением приливной полусуточной компоненты, на фазовых портретах периоды полнолуний при максимальных амплитудах смещения грунта отличаются

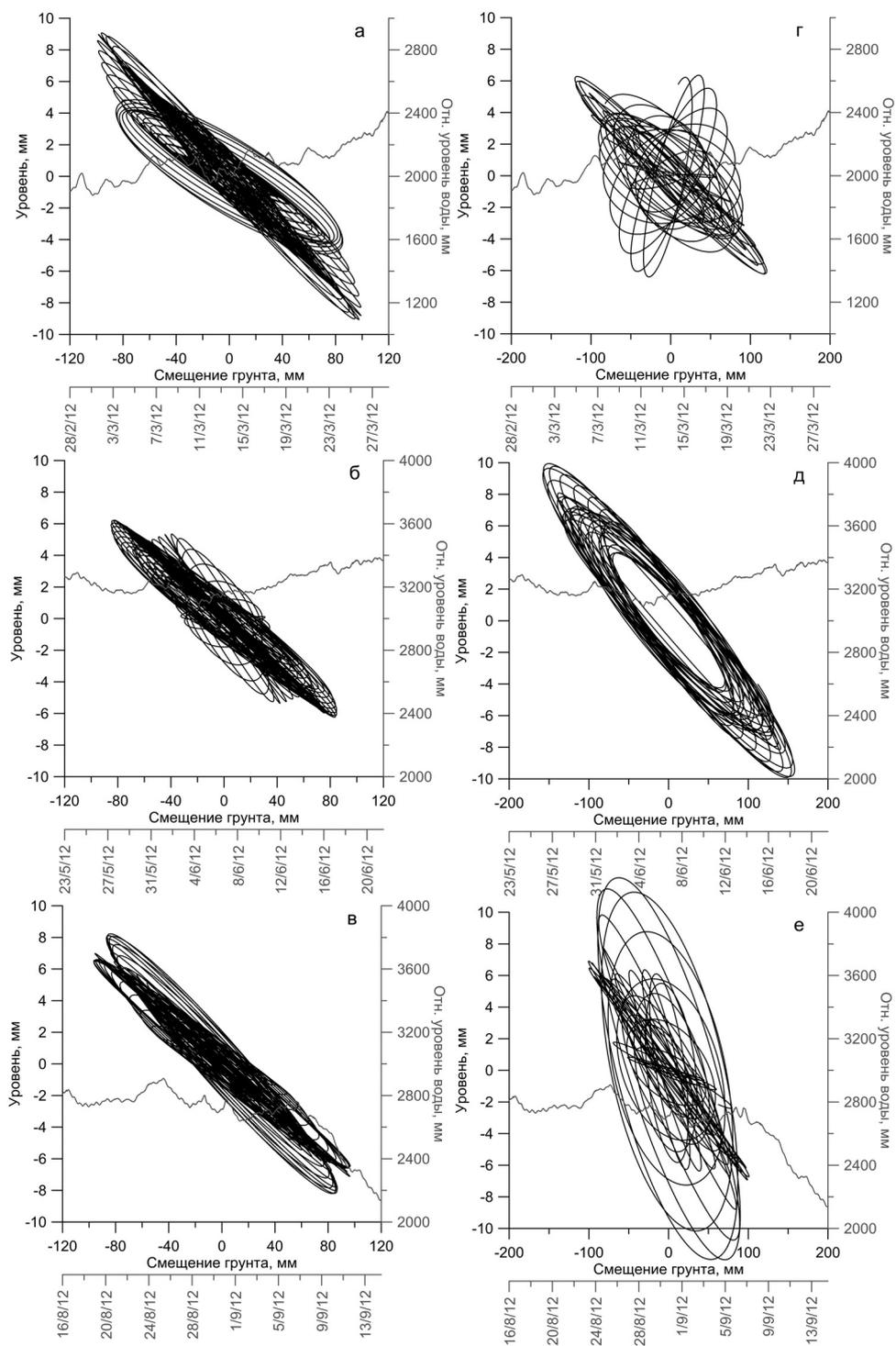


Рис. 7. Фазовые портреты полусуточной (а-в) и суточной (г-е) приливных компонент (черный) и относительный уровень – высота столба воды над датчиком (серый)

меньшей величиной фазового сдвига по сравнению с новолуниями (рис. 7,а, в). Диапазон значений фазового сдвига приливной полусуточной компоненты, определяемый для периода полнолуния и новолуния, зависит от скорости изменения пьезометрической поверхности, в сентябре 2012 г. при уменьшении гидростатического напора на 0,7 м в 2 раза меньше по сравнению со значениями, зарегистрированными в марте 2012 г.

Для суточной приливной компоненты, напротив, фазовые портреты за март и сентябрь 2012 г. (рис. 7,г, е) «расплывчаты» по отношению к четкому рисунку лунного цикла за июнь, для которого значения фазового сдвига минимальны при установленных максимальных амплитудах приливов в уровне и смещении грунта (рис. 7,д).

Таким образом, при максимальных значениях амплитуд полусуточных и суточных приливов установлена четкая взаимосвязь между вариациями гидрогеологического отклика на изменение состояния водонасыщенного коллектора; при минимальных значениях – ослаблена. Пониженные значения фазового сдвига между приливами в воде и в смещении грунта характерны для периодов максимальных проявлений полусуточной и суточной приливных компонент.

Заключение

Сопоставление гармоник полусуточных и суточных приливов в гидрогеологических рядах, полученных на территории ГФО «Михнево», подтвердило наличие годовых и полугодовых циклов в соответствии с периодичностью, прослеженной в теоретически рассчитанных деформационных параметрах.

Выделенная интенсивность приливных компонент в вариациях уровня подземных вод не устойчива относительно смещения грунта. В периоды интенсивного питания и разгрузки, характеризующиеся значимым изменением скорости подземного потока, прослеживается зависимость между амплитудами приливов и фазовым сдвигом с распределением гидростатического давления на фоне изменения состояния водовмещающего коллектора под влиянием лунно-солнечных приливов.

Работы проводятся при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-05-00956-а).

Литература

Адушкин В.В., Стивак А.А., Харламов В.А. Влияние лунно-солнечного прилива на вариации геофизических полей на границе земная кора-атмосфера // *Физика Земли.* 2012. № 2. С. 14–26.

Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Свинцов И.С. Исследование приливов в геофизических полях, регистрируемых на территории геофизической обсерватории «Михнево» // *Динамические процессы в геосферах: Сб. науч. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2012. С. 99–107.*

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 // *Геозкология, № 5, 2011. С. 439–449.*

Горбунова Э.М. Характеристика инженерно-геологического разреза территории геофизической обсерватории «Михнево» по результатам бурения экспериментальной скважины // *Физические поля и динамика взаимодействующих геосфер: Сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2007, С. 289–297.*

Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В., Свинцов И.С. Исследование динамики вариаций уровня подземных вод под воздействием внешних факторов // Проблемы взаимодействующих геосфер: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2009. С. 232–244.

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., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. Гидрогеологический отклик подземных коллекторов на сейсмические колебания // Физика Земли. № 12. 2011. С. 50–62.

Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир. 1968. 482 с.

Санина И.А., Волосов С.Г., Черных О.А., Асминг В.Э., Солдатенков А.М., Ризниченко О.Ю. Синтез и опыт экспериментального применения двумерной малоапертурной сейсмической антенны «Михнево» // Сейсмические приборы. М.: ИФЗ РАН. 2008. Вып. 44. С. 3–18.

Стивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Овчинников В.М. Периодичности микро-сейсмических процессов // ДАН. 2004. Т. 398. № 3. С. 400–403.

Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // ВИМ. 1994. #118. Н.8719-8721.