

ИНВЕРСИОННОЕ iTOUGH2-МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНЕ ЮЗ-5

Кирюхин А.В.¹, Копылова Г.Н.², Черных Е.В.¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, avk2@kscnet.ru

²Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, gala@emsd.ru

Введение

Обычно полагается, что изменение атмосферного давления передается через перекрывающую слабопроницаемую кровлю в водоносный резервуар. При этом изменение суммы эффективного напряжения и флюидного давления в резервуаре полностью компенсируется изменением уровня воды в скважине [3]. Если это предположение верно, то изменение давления в стволе скважины δP будет пропорциональным изменению атмосферного давления δP_{atm} :

$$\delta P = \delta P_{\text{atm}} / (1 + 4.75 \cdot 10^{-10} / c_{\gamma}), \quad (1)$$

где $4.75 \cdot 10^{-10}$ – сжимаемость воды, Па^{-1} , c_{γ} – сжимаемость водовмещающих пород резервуара, Па^{-1} .

Тем не менее, существующие теоретические представления о распространении давления в слабопроницаемых формациях представляются довольно умозрительными, поэтому необходим дальнейший анализ опытных данных [3].

Исходными материалами для такого анализа являются данные измерений атмосферного давления и уровня воды в скважине ЮЗ-5, полученные Камчатским филиалом Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) [1, 2].

Возможности обратного iTOUGH2 моделирования значительно повышают эффективность многопараметрического анализа гидродинамических условий в резервуарах подземных вод [4]. В данном случае моделирование осуществлялось при помощи компьютерной программы iTOUGH2, которая обеспечивает возможности инверсионного моделирования для семейства программ TOUGH2 и решает обратную задачу, автоматически калибруя модель по данным наблюдений. Эта программа может также воспроизводить изменяющиеся во времени граничные условия Дирихле на земной поверхности и на оголовке скважины, где измеряется атмосферное давление. После определения параметров модели, при которых осуществляется наилучшая сходимость, iTOUGH2 выполняет расширенный статистический анализ ошибок, неопределенности оценок и различных альтернативных моделей. Более подробная информация о программе iTOUGH2 приводится в <http://www-esd.lbl.gov/TOUGH2> и <http://www-esd.lbl.gov/iTOUGH2>.

Исходные данные для моделирования

Скв. ЮЗ-5 вскрывает в интервале глубин 0-270 м толщу рыхлых четвертичных отложений, к которым приурочен грунтовый водоносный горизонт. В интервале 270-1000 м распространены верхнемеловые породы, представленные чередованием слоев туфоалевролитов и филлитовидных сланцев. В верхнемеловых породах распространены напорные подземные воды. Ствол скважины обсажен металлической колонной до глубины 310 м; в интервале 310 - 1000 м ствол скважины открыт и связан с резервуаром напорных пресных подземных вод в меловых отложениях (рис. 1).

С мая 2003 г. на скв. ЮЗ-5 ведется непрерывный контроль уровня воды и атмосферного давления с использованием ультразвукового датчика уровня воды (чувствительность ± 0.1 см), датчика атмосферного давления (± 0.2 гПа) и универсального регистратора Кедр А2 с накоплением данных на твердотельную память. Интервал регистрации – 10 мин [2]. Вариации уровня воды предварительно преобразовывались в изменения абсолютного флюидного давления для обеспечения совместимости с основными переменными программы TOUGH2. Флюидное давление в скважине вычислялось как сумма изменения давления столба воды, атмосферного давления и некоторой постоянной, равной 3512075 Па, которая соответствует давлению на глубине 350 м. На рис. 3 представлено изменение флюидного давления в скважине после преобразования. Из рис. 2 и 3 видно, что имеются систематические сезонные колебания уровня (флюидного давления): с января по май происходит понижение уровня в связи с зимним уменьшением водного питания, в июне - июле уровень поднимается после весеннего паводка. Менее значительное повышение уровня в конце года, вероятно, связано с эффективным осенним питанием. Т. к. геометрия резервуара подземных вод неизвестна, то предполагалось, что изменение флюидного давления в скважине является суммой систематической компоненты и более высокочастотной остаточной компоненты.

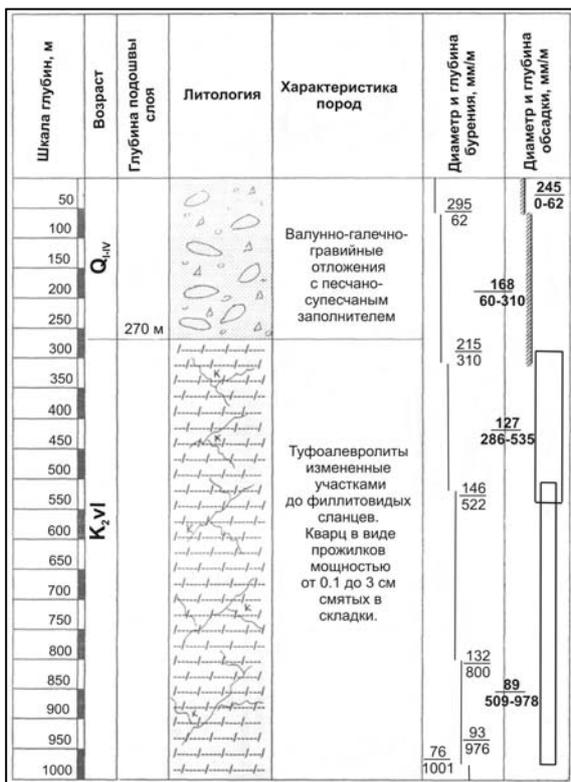


Рис. 1. Литологическая колонка и строение скважины ЮЗ-5.

Систематическая компонента оценивалась путем усреднения данных в скользящем временном окне 721 ч (рис. 3). Остаточная высокочастотная компонента предполагалась связанной с изменением атмосферного давления. Рис. 4 демонстрирует изменение флюидного и атмосферного давлений, которые использовались в качестве входных данных для калибровки модели.

Генерация вычислительной сетки и параметризация модели

При моделировании использовалась двумерная цилиндрическая вычислительная сетка (рис. 5). Численная модель представляет систему «скважина – резервуар» как цилиндр с радиусом 1000 м, высотой 1000 м и размещенной на вертикальной оси цилиндра скважиной. Модельный цилиндр, представляющий резервуар, делится на 8 слоев мощностью 100 м каждый, и состоящий из 50-ти элементов, ограниченных последовательностью радиальных поверхностей, начиная с внешнего

радиуса скважины 0.073 м.

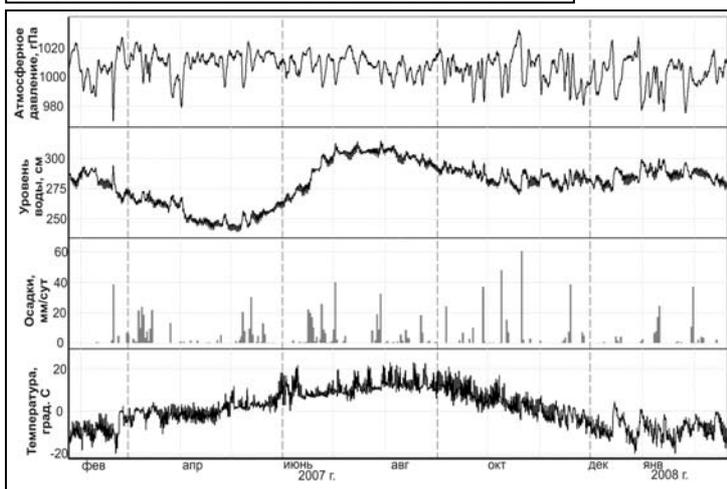


Рис. 2. Изменение уровня воды в скважине ЮЗ-5 в период с 25.01.2007 по 20.02.2008 гг. в сопоставлении с вариациями атмосферного давления, осадками и температурой воздуха.

Общее число элементов модели - 400. Скважина задается на модели одним элементом A4_1, который принадлежит четвертому слою на глубине 350 м и характеризуется средним радиусом 0.073 м и суммарным объемом 13.39 м³. Скважина соединена с элементом A4_2 резервуара площадью взаимодействия 45.87 м².

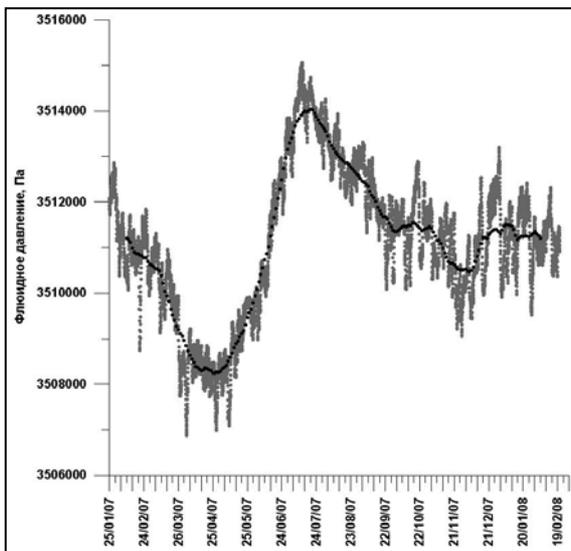


Рис. 3. Преобразование флюидного давления в скважине из исходных вариаций уровня воды (рис. 2). Систематическая компонента, оцененная по скользящему среднему значению, изображена черной пунктирной линией.

Инактивный элемент ATM_0 используется для задания атмосферного давления. Он соединен с элементом скважины A4_1 и элементами верхнего слоя резервуара A1_**.

На модели определены три области: POMED, включающая 3 верхних слоя резервуара, соответствующих рыхлым четвертичным отложениям; BASE1, включающая 5 нижних слоев резервуара, соответствующих алевролитам и сланцам мелового возраста; и WELL1, соответствующая скважине (элемент A4_1).

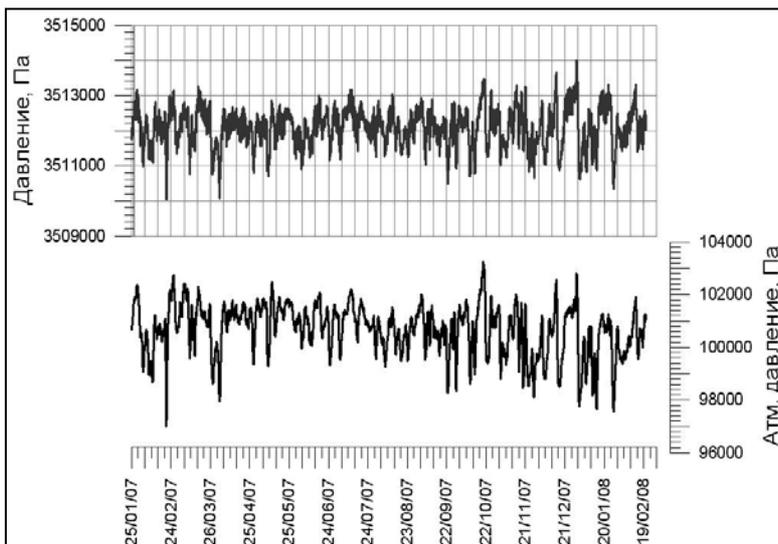


Рис. 4. Флюидное давление в скважине на глубине 350 м. (верхний график) и атмосферное давление (нижний график), используемые для калибровки модели.

Инверсионное моделирование по данным длительных наблюдений использовалось для сравнения расчетных и наблюдаемых изменений флюидного давления в скв. ЮЗ-5 с 25 января 2007 г. по 20 февраля 2008 г. По результатам моделирования оценивались параметры резервуара: пористость ϕ_r , проницаемость k_r и сжимаемость водовмещающих пород C_r и проницаемость скважины k_w .

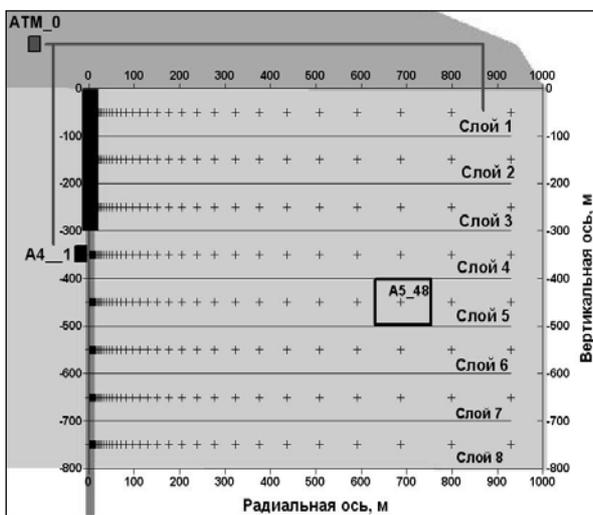


Рис. 5. Вертикальный разрез правой части численной модели «скважина – резервуар». Элементы резервуара показаны крестиками, элемент A5_48 показан в качестве примера нумерации элемента: ‘5’ соответствует номеру слоя, ‘48’ – порядковый номер в последовательности радиальных элементов; ATM_0 – элемент, в котором задаются граничные условия по атмосферному давлению, A4_1 – элемент, представляющий скважину.

При многопараметрическом инверсионном моделировании в качестве наблюдаемых данных использовались 941 калибровочная точка (с интервалом в 10 ч). В результате моделирования было установлено, что модель описывает наблюдаемые изменения флюидного давления со стандартным отклонением 302 Па и смещением 69

Па (рис. 6). При этом проницаемость резервуара k_r и проницаемость скважины k_w являются наиболее чувствительными параметрами. Пористость ϕ_r и сжимаемость резервуара C_r являются менее чувствительными модельными параметрами. При этом все четыре модельных параметра могут быть оценены (табл. 1).

Таблица 1. Оценки параметров по результатам iTOUGH2-моделирования по данным длительных наблюдений

Параметр	Оценка	95%-ый доверительный интервал
Проницаемость резервуара k_r , мД	1.14×10^{-3}	$(0.55 - 2.40) \times 10^{-3}$
Проницаемость скважины k_w , мД	14.9	7.6 – 33.0
Пористость резервуара ϕ_r	0.110	0.05 – 0.17
Сжимаемость резервуара C_r , Па ⁻¹	1.7×10^{-4}	$(0.4 - 6.8) \times 10^{-4}$

Величины проницаемости резервуара k_r и проницаемости скважины k_w сильно коррелированы (0.993), а величины пористости ϕ_r и сжимаемости C_r в 60-150 раз имеют меньшую модельную чувствительность, по сравнению с величинами проницаемостей. Поэтому неопределенность оценок (табл. 1) достаточно велика. Не было обнаружено существенного эффекта распространения барометрической волны внутрь резервуара. Поэтому предполагалось, что передача изменений атмосферного давления в резервуар происходит непосредственно через столб воды в скважине. Пространственный анализ вертикального распространения барометрической волны в системе «скважина – резервуар» в течение года показывает, что в слое 2 модели (рис. 5) вообще не происходит изменение флюидного давления, а в горизонтальном направлении распространение барометрической волны вдоль слоя 4 ограничено радиусом не более 0.9 м.

Инверсионное моделирование по данным краткосрочных наблюдений применялось для уточнения величин пористости и сжимаемости резервуара по данным 10-минутных наблюдений с 1 по 31 декабря 2007 г. Использовались 447 равномерно распределенных калибровочных точек с интервалом в 100 мин. Эта модель описывает наблюдаемые изменения флюидного давления при

величине стандартного отклонения 202 Па и смещении 29 Па (рис. 7).

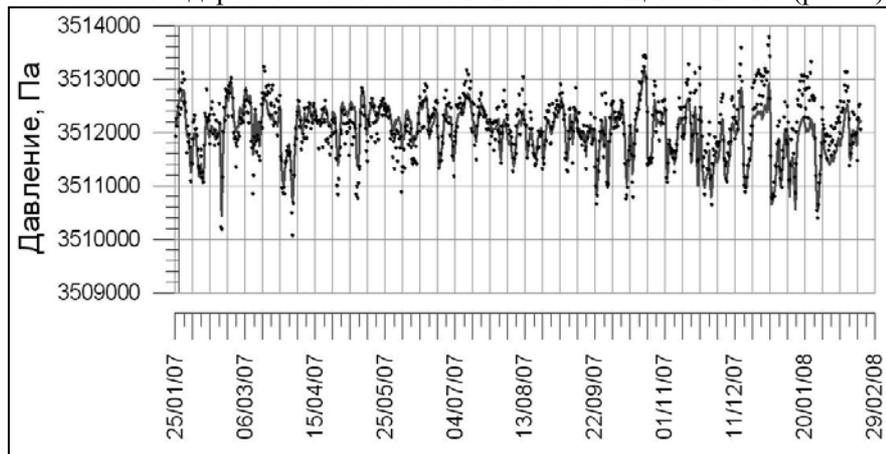


Рис. 6. Сравнение долгосрочных данных: модельный график давления в скважине на глубине 350 м. изображен линией, а наблюдаемые данные точками.

Проницаемость резервуара k_r и проницаемость скважины k_w , являются наиболее чувствительными параметрами. Пористость ϕ_r и сжимаемость резервуара C_r менее чувствительны, однако все четыре параметра могут быть оценены (табл. 2).

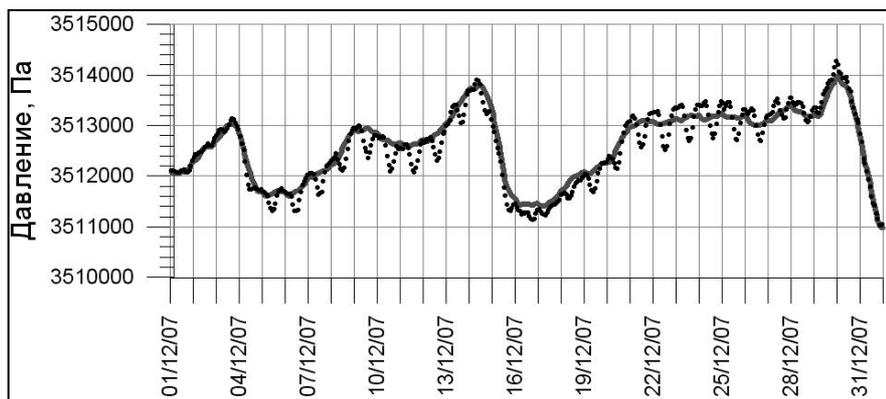


Рис. 7. Сравнение результатов краткосрочного инверсионного моделирования с наблюдаемыми данными: модельный график давления в скважине на глубине 350 м. показан линией, а экспериментальные данные точками.

Проницаемость резервуара k_r и проницаемость скважины k_w

сильно коррелированы (0.977), пористость ϕ_r и сжимаемость резервуара C_r в 15-30 раз имеют меньшую модельную чувствительность, по сравнению с проницаемостями, следовательно, неопределенность оценок в (табл. 2) также достаточно велика.

Таблица 2. Оценки параметров по результатам iTOUGH2-моделирования по данным краткосрочных наблюдений

Параметр	Оценка	95%-ый доверительный интервал
Проницаемость резервуара k_r , мД	0.39×10^{-3}	$(0.27 - 0.55) \times 10^{-3}$
Проницаемость скважины k_w , мД	8.4	6.1–11.8
Пористость резервуара ϕ_r	0.087	0.083–0.091
Сжимаемость резервуара C_r , Па ⁻¹	5.2×10^{-6}	$(3.7 - 7.5) \times 10^{-6}$

Обсуждение результатов

Инверсионное моделирование по данным краткосрочных наблюдений дает более надежные оценки параметров резервуара, чем инверсионное моделированием по долгосрочным данным. Доверительные 95% интервалы для оценок параметров k_r , k_w , ϕ_r по краткосрочными и долгосрочным наблюдениям приводятся в табл. 1 и 2. Сжимаемость C_r является наименее чувствительным параметром модели и поэтому имеет наибольшую неопределенность.

Заметим, что величина барометрической эффективности $E_b = \gamma \delta h / \delta P_{\text{атм}}$, где δh – изменение уровня воды в скважине, γ – объемный вес воды, часто используется для оценок сжимаемости резервуара по формулам типа (1). Как показало инверсионное моделирование, величина E_b в большей степени связана с проницаемостью системы «скважина – резервуар», в то время как сжимаемость резервуара C_r является наименее чувствительным параметром модели; область влияния изменений атмосферного давления ограничивается прискважинной зоной радиусом около 1 м.

На рис. 8 показан вариант моделирования с наилучшей сходимостью при величине $E_b = 0.58$. При этом величина E_b возрастает до 0.93, если величину проницаемости увеличить на два порядка, и E_b снижается до 0.02 с уменьшением проницаемости на два порядка. С другой стороны, изменение величины сжимаемости резервуара на четыре порядка дает изменение E_b в более узком диапазоне - от 0.58 до 0.65 (рис. 9).

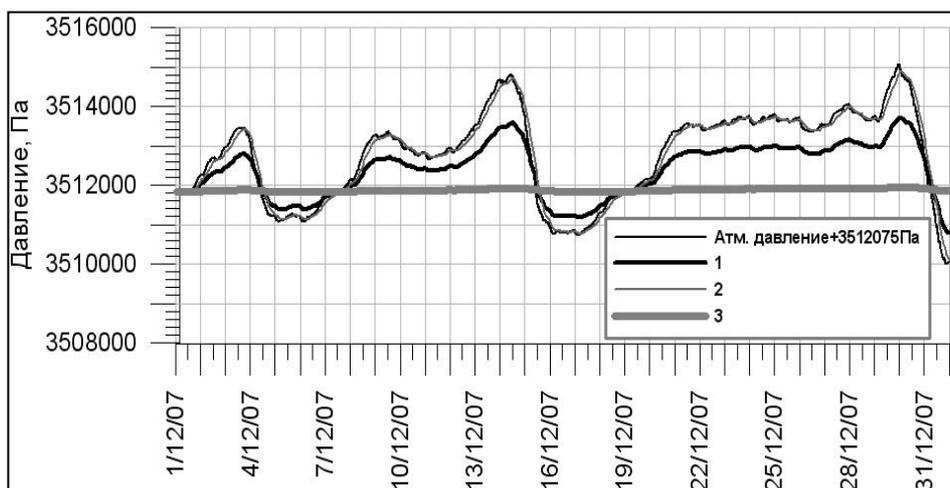


Рис. 8. Чувствительность модели к изменению проницаемости: наблюдаемое изменение атмосферного давления +3512075 Па; 1 – инверсионное моделирование по краткосрочным данным (наилучший вариант); 2 – расчетное давление при увеличении проницаемости на два порядка; 3 – расчетное давление при уменьшении проницаемости на два порядка.

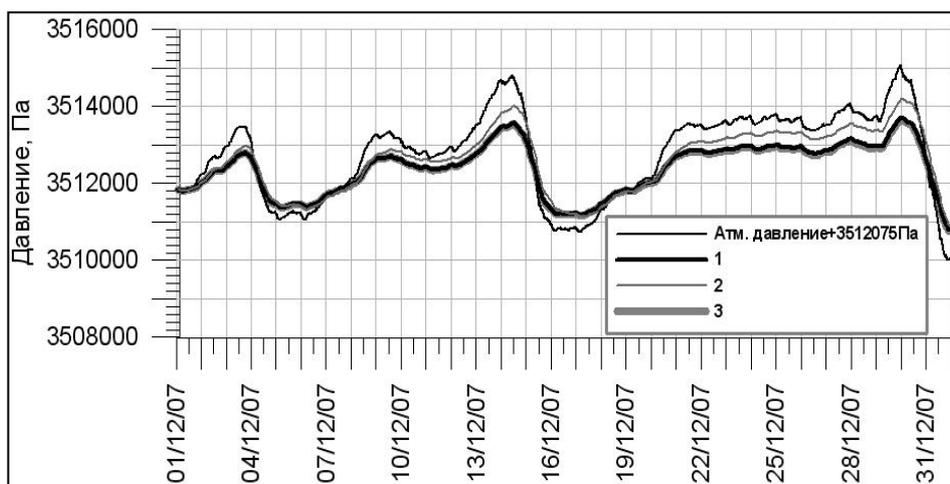


Рис. 9. Чувствительность модели к изменению сжимаемости: наблюдаемое изменение атмосферного давления +3512075 Па; 1 – инверсионное моделирование по краткосрочным данным (наилучший вариант); 2 – расчетное давление при уменьшении сжимаемости на два порядка; 3 – расчетное давление при увеличении сжимаемости на два порядка.

Заключение

iTOUGH2 инверсионное моделирование использовано для воспроизведения барометрических изменений флюидного давления в скв. ЮЗ-5 в период времени с 25.01.2007 г. по 20.02.2008 г. и для более детального ряда наблюдений с 01 по 31.01.2007 г. Вариации атмосферного давления задавались как зависящее от времени граничное условие Дерихле, заданное на устье скважины и поверхности земли. В качестве оцениваемых параметров рассматривались проницаемость скважины, проницаемость, пористость и сжимаемость водовмещающих пород резервуара. Обнаружено, что наиболее чувствительными модельными параметрами являются величины проницаемости скважины и водовмещающих пород. Оценены их величины: 8 - 15 мД и $(0.4 - 1.1) \times 10^{-3}$ мД, соответственно. Пористость и сжимаемость резервуара являются менее чувствительными параметрами модели. Получены оценки их величин: 0.087-0.110 и $5.2 \cdot 10^{-6} - 1.7 \cdot 10^{-4}$ Па⁻¹. Поучено хорошее соответствие оценок пористости по результатам моделирования и по [1]. Относительно высокие значения сжимаемости, по сравнению с оценками, приведенными в [1], могут быть связаны с наличием глинистых отложений в прискважинной зоне. По результатам моделирования было обнаружено, что распространение барометрической волны в резервуар ограничено окружностью радиусом около одного метра вокруг скважины. Это позволяет предполагать, что распространение барометрической волны в резервуар могло осуществляться, главным образом, через устье скважины.

Список литературы

1. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Оценка порупругих параметров резервуаров подземных вод по данным уровневых наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С.17-28.
2. Копылова Г.Н. Изменение уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С.52-64.
3. Шестаков В.М. Динамика подземных вод. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 368 с.
4. Finsterle S. Multiphase inverse modeling: Review and iTOUGH2 applications. Vadose Zone J. 2004. № 3. P. 747-762.