

УДК 523.31:550.341

ОЦЕНКА УПРУГОЙ ЁМКОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЗЕМНОПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЙ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИХ СКВАЖИНАХ

А. М. ГУМЕН

*Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Введение

Одним из параметров, определяющим запасы подземных резервуаров, является упругая ёмкость, представляющая собой изменение объёма жидкости в единице объёма породы при единичном изменении напора [1]. Ей уделяется немалое внимание при гидродинамических испытаниях пластов, проводимых посредством откачек или нагнетаний, методы же, основанные на естественных колебаниях пластового давления, используются редко. В настоящей работе показана возможность и описаны приёмы оценки упругой ёмкости пород посредством прецизионных уровнеметрических наблюдений в пьезометрических скважинах за земноприливными вариациями жидкости и их последующего анализа. В задачу исследований входило:

1. Получение ряда гидрогеодинамических наблюдений в скважине.
2. Оценка теоретических деформаций, обусловленных переменным во времени земноприливным потенциалом поля силы тяжести Земли для точки наблюдений.
3. Получение зависимости наблюдаемых приливных волн в уровне жидкости в скважине от соответствующих значений земноприливных деформаций.

Особенности проявления земноприливных деформаций в подземных флюидах

Земной прилив в твёрдой Земле представляет собой её упругую реакцию на изменение поля силы тяжести в результате периодического изменения взаимного расположения Луны и Солнца. Амплитуда изменения силы тяжести составляет 0,2 мГал, а ответные относительные объёмные деформации на поверхности Земли составляют в среднем 10^{-8} . Предполагается прямо пропорциональная зависимость между отмеченными показателями [2]:

$$D(a) = f \frac{W}{Rg}, \quad (1)$$

где $D(a)$ – объёмная приливная деформация на поверхности Земли;

f – комбинация постоянных Ламе и чисел Лява, известных по геодинамическим наблюдениям;

W – приливообразующий потенциал;

R – радиус Земли;

g – ускорение силы тяжести на поверхности Земли.

Большинство пьезометрических скважин оказываются чувствительными к таким деформациям, что проявляется в строго периодических колебаниях уровня жидкости амплитудой в среднем до первых сантиметров. При этом максимуму прилива и де-

формации растяжения соответствует минимальный уровень жидкости в скважине, а минимуму прилива – сжатие и максимальный уровень. Однако фактическая кривая колебаний уровня в скважине имеет более сложный характер ввиду проявления у системы «скважина-пласт» свойств фильтра низких частот [3]. Кроме того, в «чистом» виде приливный сигнал проявляется только после устранения влияния атмосферного давления.

Методика исследований

Наблюдения за уровнем воды проводились в пьезометрических скважинах глубиной 300-550 м посредством прецизионного датчика манометрического типа с чувствительностью не хуже 1Па. Синхронно производилась запись изменений атмосферного давления аналогичным устройством. Исходные ряды с шагом дискретизации 1 ч подвергались следующим математическим процедурам: устранению длиннопериодных трендов из обоих рядов; компенсации влияния атмосферного давления $p(t)$ на ход уровня $h(t)$ путём нахождения импульсной характеристики линейной системы атмосферное давление – уровень воды; определению амплитуд и фаз земноприливных вариаций уровня. При этом использовалась регрессионная модель:

$$h(t) = \sum_{(j)} b_j p(t-j) + \sum_i (C_i \cos \omega_i t + d_i \sin \omega_i t) + \varepsilon(t), \quad (2)$$

где ω_i – частота приливных гармоник;

$\varepsilon(t)$ – остаточные ошибки регрессии.

Вследствие коррелированности последних начальная регрессионная модель (2) заменялась на

$$hr(t) = \sum_{(j)} b_j pr(t-j) + \sum_i (C_i cr \omega_i t + d_i sr \omega_i t) + \tilde{\varepsilon}(t), \quad (3)$$

где $hr(t)$ и $pr(t)$ – вход и выход линейной системы, профильтрованные через фильтр, обеляющий остатки $\varepsilon(t)$;

$cr \omega_i t$ и $sr \omega_i t$ – косинусы и синусы, профильтрованные тем же фильтром.

Амплитуды приливообразующего потенциала рассчитывались по известным астрономическим формулам [2] для семи основных приливных компонент-суточных: Q_1 (период $T=26,868$ ч), O_1 ($T=25,819$ ч), P_1 ($T=24,066$ ч), K_1 ($T=23,934$), полусуточных: N_2 ($T=12,658$ ч), M_2 ($T=12,421$) и S_2 ($T=12,000$ ч), а теоретические объёмные приливные деформации оценивались по формуле (1) с использованием компьютерной программы.

Обсуждение полученных результатов

Рисунок 1 иллюстрирует фрагмент исходных рядов гидрогеодинамических наблюдений и результат компенсации изменений атмосферного давления в вариациях уровня воды в скважине, позволяющий увидеть земноприливные вариации уровня, хорошо согласуемые с теоретическими объёмными деформациями и находящиеся с последними в противофазе и небольшим фазовым сдвигом. Этот сдвиг обусловлен проявлением свойств фильтра низких частот у системы скважина – пласт.

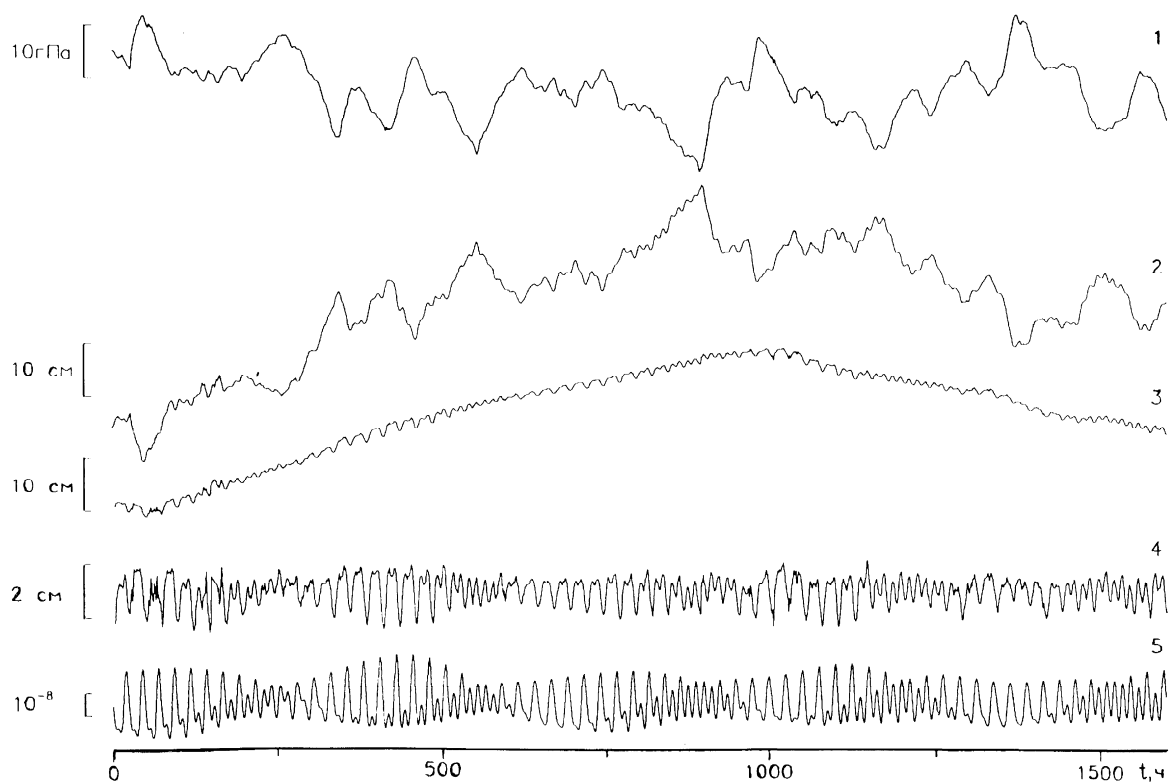


Рис. 1. Вариации атмосферного давления (1) и уровня воды в скважине (2-5): 2 – фактические; 3,4 – приведенные к постоянному атмосферному давлению; 4 – после вычитания тренда; 5 – теоретическая приливная деформация

Спектр на рисунке 2 указывает на наличие двух групп гармоник: в суточной и полусуточной областях.

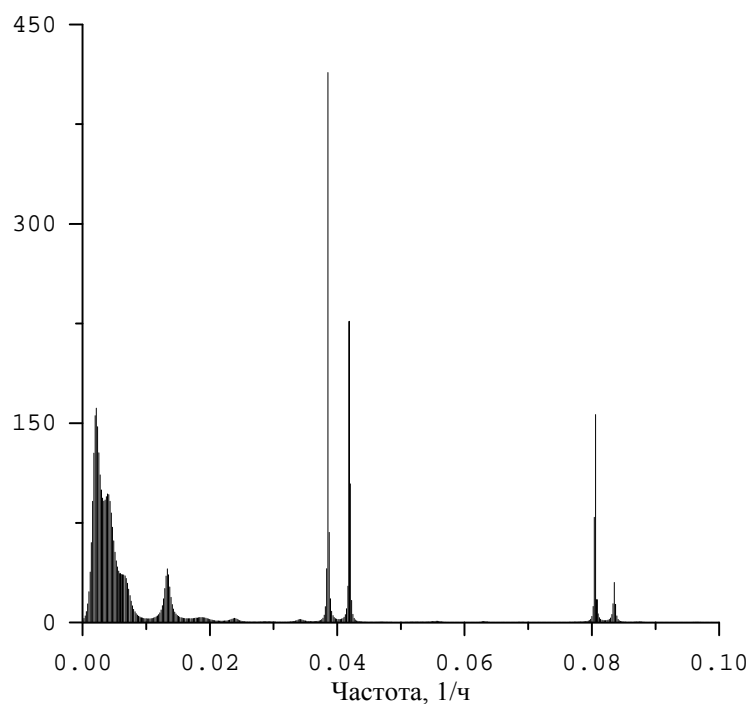


Рис. 2. Спектр мощности вариаций уровня воды в скважине, скомпенсированных за вариации атмосферного давления

Более подробный анализ на основе двухшаговой процедуры Хэнана (2)-(3) позволил оценить амплитуды отдельных земноприливных компонент в вариациях уровня воды, которые затем сопоставлялись с соответствующими значениями теоретических деформаций (рис. 3). Использовались собственные данные уровнеметрических наблюдений в скважинах Васильевка и Чёнки, а также данные наблюдений по скважине ЦИТО (Москва) глубиной 400 м, предоставленные В. А. Малугиным. Кроме того, были привлечены опубликованные в [2,4] оценки амплитуд приливных гармоник в уровне воды, для которых нами также были рассчитаны соответствующие теоретические деформации.

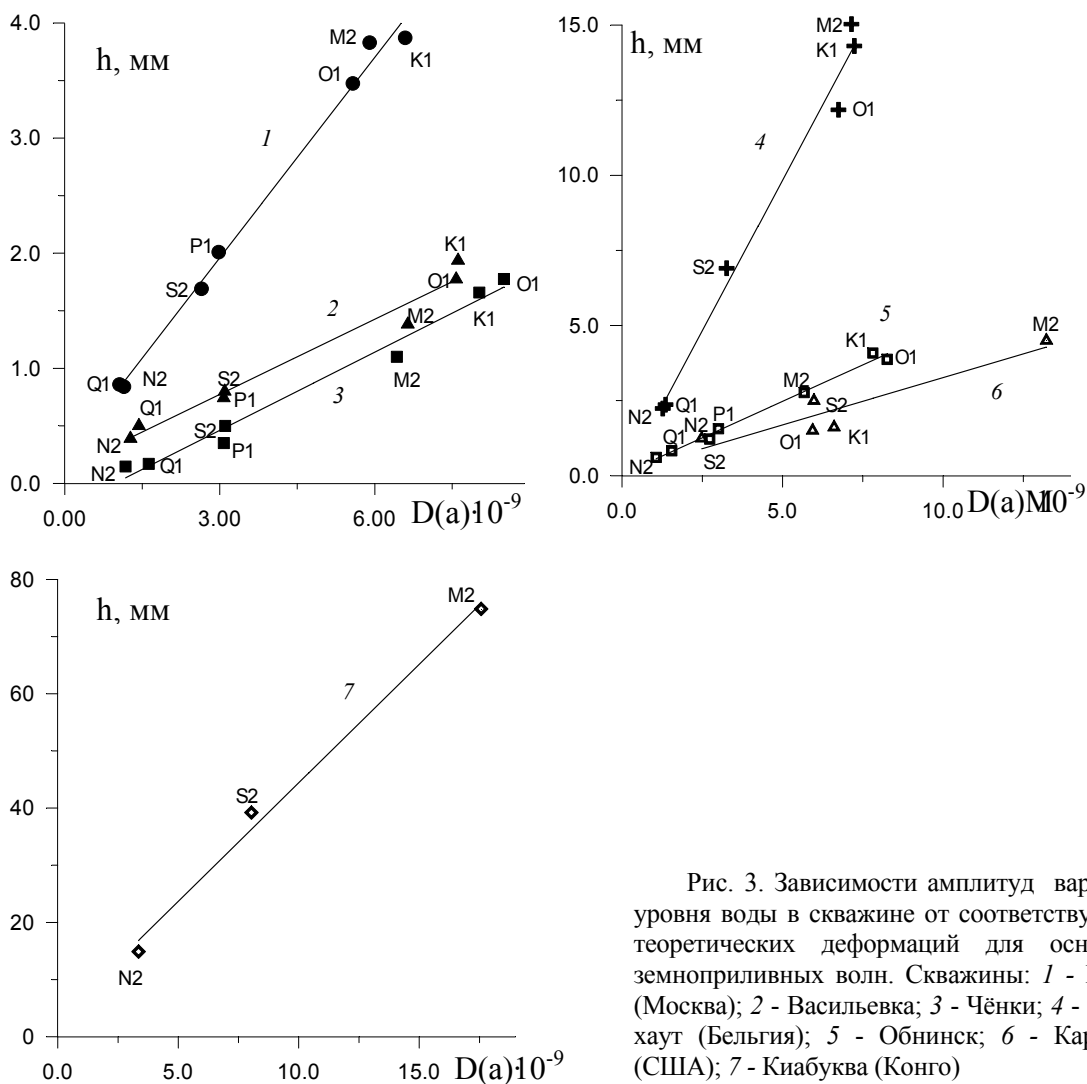


Рис. 3. Зависимости амплитуд вариаций уровня воды в скважине от соответствующих теоретических деформаций для основных земноприливных волн. Скважины: 1 - ЦИТО (Москва); 2 - Васильевка; 3 - Чёнки; 4 - Тюрнхаут (Бельгия); 5 - Обнинск; 6 - Карлсбад (США); 7 - Киабуква (Конго)

Особенность представленных на рисунке 3 графиков состоит в том, что они иллюстрируют отклик вскрытых скважиной горных пород в условиях их естественного залегания на относительные небольшие вариации напряжений. Группировка исходных значений возле аппроксимирующей прямой для большинства скважин, а также прохождение прямой практически через начало координат (нулевой деформации отвечает нулевая амплитуда прилива в уровне) указывают на достаточно высокую точность выполненных оценок. Наклон аппроксимирующей прямой характеризует искомую величину упругой ёмкости η вскрываемых скважинами горных пород в соответствии с формулой:

$$\eta = \frac{dV_e}{V_n dh}, \quad (4)$$

где dV_e/V_n – изменение объёма воды в единице объёма горной породы;
 dh – изменение уровня жидкости в скважине.

Полученные оценки упругой ёмкости по скважинам составили (в м^{-1}): ЦИТО – $1,65 \cdot 10^{-6}$; Васильевка – $4,6 \cdot 10^{-6}$; Чёнки – $4,4 \cdot 10^{-6}$; Тюрнхаут – $5,1 \cdot 10^{-7}$; Обнинск – $2,1 \cdot 10^{-6}$; Карлсбад – $3,1 \cdot 10^{-6}$; Киабуква – $2,4 \cdot 10^{-7}$, что соответствует песчаникам и известнякам на рассматриваемых глубинах [5]. В нашем распоряжении имеется только одно значение упругой ёмкости, полученное для скважины Чёнки по результатам опытной откачки и составившее $5,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$. Учитывая, что диапазон значений упругой ёмкости в реальных геологических условиях охватывает 3-4 порядка [5], можно говорить о достаточной близости значений, полученных двумя различными методами. Вызывает интерес такое сравнение по представительной выборке данных, поскольку ожидаемые различия могут быть связаны с нелинейным откликом горных пород к различным по масштабу и величине возмущениям пластового давления.

Таким образом, рассмотренная методика оценки упругой ёмкости на основе изучения отклика пьезометрической скважины на земноприливные деформации может использоваться в практике опытно-фильтрационных работ. Кроме того, анализ зависимостей уровень-земноприливная деформация, которые очень чувствительны к перестройкам поля напряжений и деформаций, будет очень информативен при контроле сейсмостектонической активности земной коры. При этом предполагается построение и анализ указанных зависимостей для различных временных интервалов при длительном гидрогеодинамическом мониторинге.

Литература

1. Щелкачёв В.Н. Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме.- М.: Гостоптехиздат, 1959.- 467 с.
2. Мельхиор П. Земные приливы.- М.: Мир, 1968.- 482 с.
3. Барабанов В.Л., Гриневский А.О. Частотная характеристика системы скважина-водоносный горизонт по данным наблюдений за уровнем подземных вод //Известия АН СССР. Физика Земли.-1988.- № 3.- С 41-50.
4. Багмет А.Л., Багмет М.И. и др. Исследование земноприливных колебаний уровня подземных вод на скважине «Обнинск» //Известия АН СССР. Физика Земли.- 1989.- № 11.- С. 84-95.
5. Гавич И.К. Гидрогеодинамика.- М.: Недра, 1988.- 349 с.

Получено 06.11.2000 г.