

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНЕ

Болдина С.В., Копылова Г.Н.

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

Введение

В пьезометрических скважинах, расположенных преимущественно в пределах сейсмоактивных территорий, часто регистрируются разнообразные вариации уровня воды, вызванные землетрясениями. Они могут проявляться до, в момент и в течение некоторого времени после землетрясений. В качестве основных факторов сейсмического воздействия на состояние систем «скважина – резервуар» в [2] рассматриваются:

– изменение статического напряженного состояния водовмещающих пород при образовании разрывов в очагах землетрясений, сопровождающееся косейсмическими скачками повышения и понижения уровня воды;

– динамическая деформация водовмещающих пород при прохождении сейсмических волн от местных ощутимых и сильнейших удаленных землетрясений, сопровождающаяся изменением порового давления и повышениями, понижениями или колебаниями уровня воды;

– процессы подготовки землетрясений, которые могут сопровождаться гидрогеодинамическими предвестниками в изменениях уровня воды.

При описании особенностей гидрогеодинамических процессов в реальных системах «скважина – резервуар» под воздействием указанных выше сейсмических факторов может использоваться моделирование зарегистрированных гидрогеосейсмических вариаций уровня на основе математических моделей поведения флюидонасыщенных пористых упругих материалов под нагрузкой и их приложений для пьезометрических скважин [8-12].

В результате проведения многолетних равномерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка, КФ ГС РАН, зарегистрированы четыре различных типа гидрогеосейсмических вариаций уровня воды, в т. ч.:

– гидрогеодинамический предвестник Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г., $M = 7.8$ (КЗ) в форме бухтообразного понижения уровня с амплитудой 11 см в течение трех недель;

– косейсмические скачки понижения и повышения уровня с амплитудами 12.0 – 0.25 см во время шести местных землетрясений с $M = 6.2 - 7.8$ (табл. 1);

– длительное (~3 мес.) постсейсмическое понижение уровня воды после КЗ с амплитудой около 1 м;

– колебания уровня продолжительностью 3 – 10 ч при прохождении поверхностных волн от землетрясений с $M = 8.3 - 9.0$ на расстояниях $R = 1700 - 8500$ км [2].

Таблица 1. Данные о землетрясениях, косейсмических скачках уровня воды в скважине ЮЗ-5 и оценка косейсмической деформации [6]

№ п/п	Дата/ Время в очаге ггммдд/чч:мм	Координаты, град		Глубина, км	M_w	Гипоцентральное расстояние, R, км	Амплитуда скачка уровня воды, Δh , см	Объемная косейсмическая деформация в районе скважины ЮЗ-5, 10^{-9}	
		с. ш.	в. д.					по косейсмическим скачкам уровня, D_1	по модели дислокационного источника, D_2
1	971205/11:27	54.0	162.3	25	7.8	200*	-12.0	75±4	15.5
2	980610 /5:34	52.81	160.37	31	6.9	140	-1.0	6.3±0.7	-2.4
3	990308 /12:26	51.93	159.72	7	7.0	164	-1.7	10.6±0.8	43.2
4	001220/09:20	53.31	160.06	65	6.2	128	0.6	-3.8±0.5	-0.4
5	030616/22:08	55.30	160.34	190	6.9	328	-0.3	1.9±0.4	0.9
6	040320/08:53	53.74	160.76	31	6.2	169	0.25	-1.6±0.4	-0.5

Примечание: * - гипоцентральное расстояние от скважины ЮЗ-5 до средней точки плоскости смещения.

Модель гидрогеодинамических процессов в системе «скважина – напорный резервуар пресных подземных вод» на примере скважины ЮЗ-5

Описание различных типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 дается в рамках модели гидрогеодинамических процессов в системе «скважина – напорный резервуар пресных подземных вод». Методология построения такой модели разработана авторами и впервые применена для реальной пьезометрической скважины, в режиме которой зарегистрированы различные гидрогеосейсмические вариации уровня воды, соответствующие основным факторам сейсмического воздействия на состояние системы «скважина – резервуар» (рис.).

Оценка фильтрационных и упругих параметров резервуара. По данным синхронных измерений уровня воды и атмосферного давления оценивались параметры барометрического отклика уровня методом кросс – спектрального анализа в диапазоне часовых – суточных периодов [1-3]. В диапазоне от 6 ч до первых десятков суток величина барометрической эффективности постоянна и равна $E_b = 0.39$ см/гПа при разности фаз между вариациями уровня и атмосферного давления -180° . Это позволяет принять гипотезу о статически изолированных условиях в системе «скважина-резервуар» в указанном диапазоне периодов.

Приливная чувствительность системы «скважина – резервуар» оценивалась по выделенным амплитудам приливных волн в вариациях уровня воды и соответствующим теоретическим величинам приливной площадной и объемной деформации в районе скважины $A_S = 0.107 \cdot 10^{-9}$ и $A_V = 0.161 \cdot 10^{-9}$ см/10⁻⁹ соответственно. Величины приливной чувствительности определялась по суточным и полусуточным приливному волнам в изменениях уровня воды, для которых отношение сигнал/шум составляло не менее 10. Это указывает на достаточно надежное определение приливных параметров по равномерным данным для этих волн [1, 6].

Результаты анализа барометрического и приливного откликов уровня воды в скв. ЮЗ-5 позволяют принять гипотезу о статически изолированных условиях в реальной системе «скважина – резервуар» в диапазоне периодов часы – сутки – первые десятки суток. С использованием полученных величин E_b и A_S оценены упругие параметры резервуара β , G , B , S_S и пористость ϕ . По данным откачки оценены величины коэффициента водопроницаемости резервуара T и коэффициента фильтрации k (табл. 2). Величина пьезопроводности составила $a = k/S_S = 0.53$ м²/с [3].

Таблица 2. Оценка упругих и фильтрационных параметров резервуара подземных вод, вскрытого скважиной ЮЗ-5, при величине сжимаемости твердой матрицы скелета $\beta_u = 0.3 \cdot 10^{-10}$ Па⁻¹ (кварц)

Скважина	Барометрическая эффективность E_b см/гПа	Приливно-чувствительность A_S м/10 ⁻⁷	Дренируемая сжимаемость скелета β Па ⁻¹ ·10 ⁻¹¹	Модуль сдвига G Па·10 ¹⁰	Коэффициент Скемптона B	Удельная упругая емкость S_S м ⁻¹ ·10 ⁻⁷	Пористость ϕ	Величина упругой водоотдачи, $S=S_S \cdot d$	Коэффициент водопроницаемости, T , м ² /с	Коэффициент фильтрации, $k=T/d$, м/с
ЮЗ-5	0.39	0.107	12.5	1.34	0.67	16.9	0.11	$16.9 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-7}$

Оценка инерционного эффекта водообмена между скважиной и резервуаром с учетом параметров резервуара и строения скважины. Величины параметров (табл. 2) использовались при построении модели реакции уровня воды в скважине на периодические изменения напора в резервуаре с учетом строения скважины: r_w – радиус скважины в области связи с резервуаром, r_c – радиус скважины в области колебаний уровня воды [10]. На периодах приливных и барометрических воздействий (часы – сутки) не происходит искажение амплитудного соотношения и фазового сдвига между изменениями напора в резервуаре и вариациями уровня воды в скважине. Существенные искажения вследствие инерционности течения воды в скважину и из скважины могут ожидать только на периодах не более секунд – минут. Результаты моделирования амплитудного соотношения в зависимости от периода вариаций по [10] хорошо согласуются с изменением амплитудной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды в скважине [1] и подтверждают достоверность величин упругих и фильтрационных параметров (табл. 1).

Выбор теоретических моделей для моделирования гидрогеосейсмических вариаций уровня воды и оценка их применимости к реальной системе «скважина – резервуар». С учетом ряда упрощений, принятых в модели статически изолированной системы «скважина – резервуар» [11, 12], предполагается линейный характер связи между вариациями уровня воды и деформациями водовмещающих пород в диапазоне не менее трех порядков ($10^{-9} - 10^{-7}$). Поэтому по данным об изменениях уровня воды можно оценивать сейсмотектоническую деформацию во всем диапазоне периодов проявления статически изолированного отклика уровня воды по формуле [2, 6, 11]:

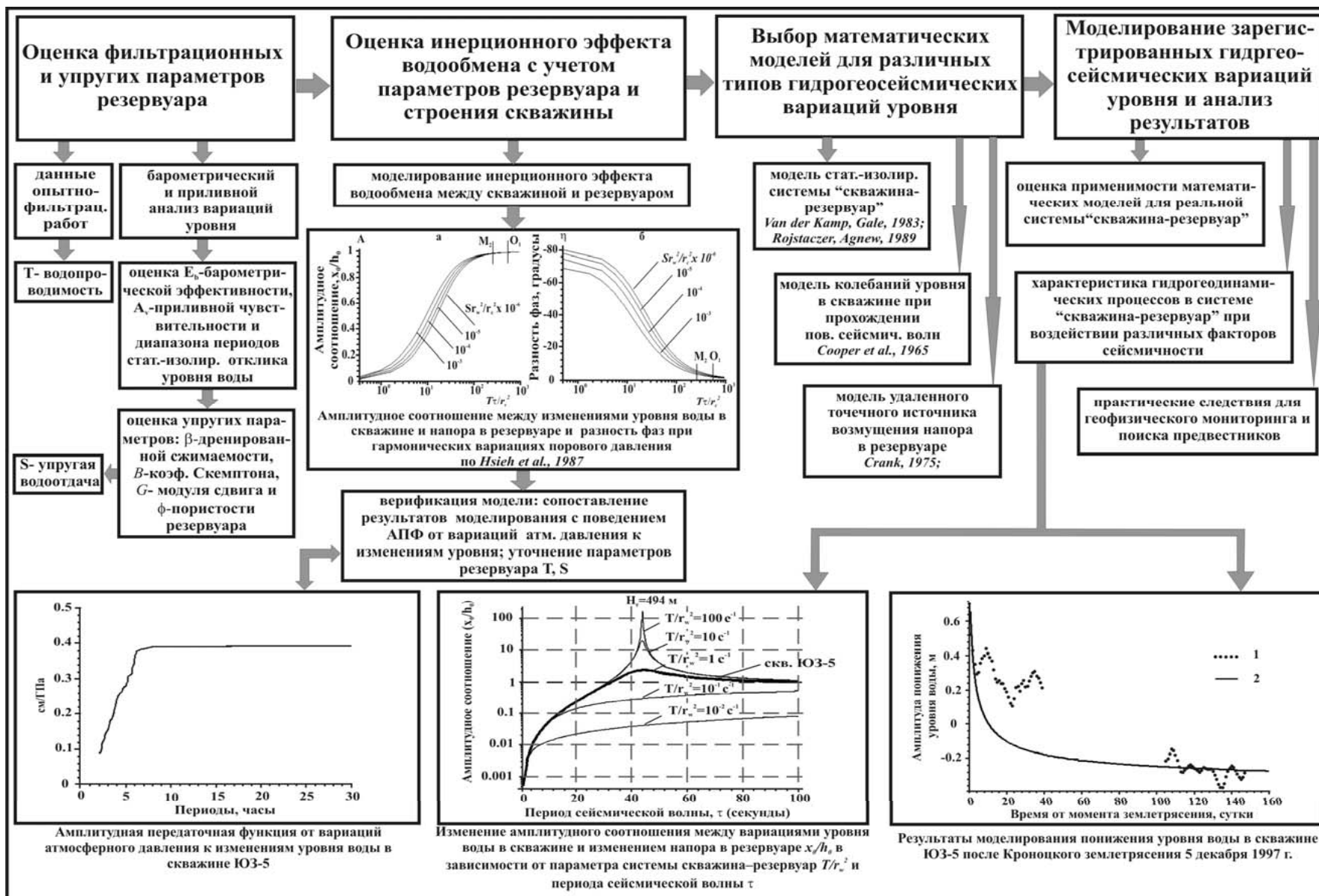


Рис. Методология построения модели гидрогеодинамических процессов в системе «скважина – напорный резервуар пресных подземных вод» при воздействии различных факторов сейсмичности (на примере скважины ЮЗ-5).

$$D_t = -\Delta h/A_v, \quad (1)$$

где D_t – объемная деформация в нанострейнах: «+» соответствует растяжению, «-» соответствует сжатию; Δh – изменение уровня воды в см: «+» соответствует повышению уровня, «-» соответствует понижению уровня.

Продолжительность развития гидрогеодинамического предвестника КЗ (3 недели) примерно соответствует по периоду верхней границе статически изолированных условий в системе «скважина – резервуар». В этом случае минимальная оценка величины квазиупругой деформации расширения насыщенных верхнемеловых пород в районе скв. ЮЗ-5 на стадии подготовки КЗ по (1) составляет $D_t = 0.7 \cdot 10^{-7}$ [2, 4, 6].

Формула (1) применялась также для оценки объемной косейсмической деформации по амплитудам косейсмических скачков уровня. Для всех шести землетрясений (табл. 1) оценены величины объемной косейсмической деформации ($D_t = 75 - 1.6 \cdot 10^{-9}$), а также характер деформации резервуара по направлению изменения уровня воды (табл. 1). Полагалось, что физический механизм формирования косейсмических скачков уровня соответствует отклику порового давления в резервуаре на упругую деформацию водовмещающих пород при образовании сейсмического разрыва в очаге землетрясения [4, 6].

В [6] для всех шести землетрясений приводятся оценки объемной косейсмической деформации в окрестности скважины D_2 по модели дислокации в однородном упругом изотропном полупространстве с использованием алгоритма Okada, 1985 (табл. 1). Примерное соответствие оценок косейсмической деформации по обоим методам показывает, во-первых, что амплитуды косейсмических скачков уровня воды адекватно отражают косейсмическую деформацию и, во-вторых, они практически не искажаются инерционностью водообмена между скважиной и резервуаром. Это позволяет, в случае проявления косейсмических скачков, расширить диапазон проявления статически изолированного отклика уровня воды в скважинах в область малых периодов, составляющих минуты.

Длительное постсейсмическое понижение уровня воды после КЗ может описываться математической моделью удаленного точечного источника возмущения напора в резервуаре [4, 9]:

$$x = x_0 - \Delta h \cdot \operatorname{erfc}\left(R/\sqrt{4at}\right), \quad (2)$$

где x – уровень воды в скважине, x_0 – начальный уровень воды в скважине, $\Delta h = \Delta p/\rho g$ – изменение напора при изменении порового давления Δp , ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения, R – радиус чувствительности скважины к локальному источнику падения порового давления, a – пьезопроводность, t – длительность понижения уровня.

Результаты моделирования по (2) показывают (рис.), что удовлетворительное соответствие в понижении уровня воды в скважине после КЗ с теоретической зависимостью, как в течение первых суток, так и за все время, имеет место при величине пьезопроводности резервуара $a = 0.53 \text{ м}^2/\text{с}$ и расстоянии от источника падения порового давления до скважины $R = 450 \text{ м}$ [4].

Колебания уровня воды при сильных удаленных землетрясениях, в частности, при прохождении сейсмических волн от Суматра – Андаманского землетрясения 26.12.2004 г., $M = 9$, $R = 8250 \text{ км}$ (САЗ), могут описываться математической моделью [8], в которой полагается, что такие колебания обусловлены двумя основными факторами – гармоническими изменениями порового давления в резервуаре и вертикальными перемещениями поверхности земли. При этом степень, с которой уровень воды в скважине реагирует на прохождение сейсмических волн, определяется характеристиками скважины, величиной водопроводимости резервуара, а также значительно зависит от вида и периода сейсмических волн τ .

В [5] выполнено моделирование затухающих колебаний уровня воды в скв. ЮЗ-5 при прохождении поверхностных сейсмических волн от САЗ в диапазоне периодов, включающих период собственной частоты колебаний скважины $\omega_w \approx (g/H_e)^{1/2}$, где H_e – эффективная высота столба воды в стволе скважины (рис.). При этом учитывался резонансный эффект усиления вариаций порового давления в системе «скважина – резервуар» по [8]:

$$A = x_0/h_0 = \left[\left(1 - \frac{\pi_w^2}{T\tau} \operatorname{Kei}\alpha_w - \frac{4\pi^2 H_e}{\tau^2 g} \right)^2 + \left(\frac{\pi_w^2}{T\tau} \operatorname{Ker}\alpha_w \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (3)$$

где $\alpha_w = r_w(\omega S/T)^{1/2}$ – безразмерная функция частоты, выраженная через параметры резервуара и геометрические параметры скважины. Результаты моделирования показывают (рис.), что такие колебания уровня в скв. ЮЗ-5 могут возникать при прохождении сейсмических волн с периодами $\tau = 44.6 \text{ с}$ при величине параметра T/r_w^2 не менее 1 с^{-1} . Такая величина T/r_w^2 превышает на два порядка

аналогичную величину, полученную по приливному и барометрическому откликам уровня воды и по данным откачки из скважины ($T/r_w^2 \leq 2.8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$) [5]. Для объяснения эффекта увеличения водопроницаемости привлекаются данные физического эксперимента [7], показывающие рост проницаемости водонасыщенных образцов горных пород при прохождении упругих сейсмических волн. В качестве механизма увеличения проницаемости рассматривается образование микрогидроразрывов в насыщенных породах при задержке в понижении порового давления по отношению к снижению общего давления. В этом случае эффективное напряжение в скелете породы резко возрастает и может превысить предел его прочности.

Заключение

Основным результатом работы является создание феноменологической модели поведения реальной системы «скважина – резервуар» при различных механизмах сейсмического воздействия (рис.) и объяснение на ее основе гидрогеодинамических процессов формирования четырех различных типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды, зарегистрированных в скв. ЮЗ-5.

Гидрогеодинамический предвестник КЗ и косейсмические скачки уровня при сильных местных землетрясениях (табл. 2) объясняются неискаженной упругой реакцией порового давления на деформацию водовмещающих пород резервуара. Определены характер и величины объемной косейсмической и предсейсмической деформации в районе скважины по амплитудам аномального изменения уровня воды и величине его приливной чувствительности. Показана принципиальная возможность получения таких оценок по данным уровневых наблюдений в диапазоне периодов проявления статически изолированных условий в системе «скважина – резервуар».

Постсейсмическое понижение уровня после КЗ могло быть вызвано падением напора в резервуаре на некотором удалении от скважины вследствие локального улучшения фильтрационных свойств водовмещающих пород при сейсмических сотрясениях. Оценен радиус чувствительности скважины к источнику падения напора, $R = 450 \text{ м}$.

Колебания уровня воды в скв. ЮЗ-5 возникают, в основном, вследствие резонансного усиления вариаций порового давления в стволе скважины при прохождении поверхностных волн от сильных удаленных землетрясений с периодами $\tau = 44.6 \text{ с}$ в соответствии с [8]. Обнаружен эффект кратковременного улучшения фильтрационных свойств резервуара при прохождении таких волн.

На примере скважины ЮЗ-5 показана принципиальная возможность использования ряда теоретических моделей для моделирования и описания гидрогеодинамических процессов формирования наблюдаемых гидрогеосейсмических вариаций уровня воды, в частности, модели статически изолированной системы «скважина – резервуар» [10, 11]; модели удаленного точечного источника возмущения напора в резервуаре [9] и модели колебаний уровня воды в скважине при прохождении поверхностных сейсмических волн [8].

Список литературы

1. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Оценка инерционного эффекта водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2006. № 2. Вып. № 8. С. 112-119.
2. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52-64.
3. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Оценка порупругих параметров резервуара подземных вод (по данным уровневых наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 52-64.
4. Копылова Г.Н. Болдина С.В. Гидрогеодинамические эффекты землетрясений в системе скважина-резервуар (на примере скважины ЮЗ-5) // Геофизический мониторинг Камчатки. Матер. научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский: Оттиск, 2006. С. 122–130.
5. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, на Суматра-Андаманское землетрясение 26 декабря 2004 г., $M=9$ // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 39-48.
6. Копылова Г.Н., Стеблов Г.М., Болдина С.В., Сдельникова И.А. О возможности оценок косейсмической деформации по данным уровневых наблюдений в скважине // Физика Земли. 2010. №.1 С. 51-61.
7. Шмонов В.М., Витовтова В.М., Жариков А.В. Влияние сейсмической вибрации на проницаемость пород в связи с проблемой захоронения радиоактивных отходов / Флюидная проницаемость пород земной коры. М.: Научный мир, 2002. С. 155-161.
8. Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopoulos I.S., Bennet R.R. The response of well-aquifer system to seismic waves // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. P. 3915-3926.
9. Crank J. The Mathematics of Diffusion. Oxford Sci., Oxford, U.K., 1975. 421 p.
10. Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J. Determination of aquifer transmissivity from earth-tide analysis // Water Resour. Res. 1987. V. 23. P. 1824-1832.
11. Rojstaczer S., Agnew D.S. The influence of formation material properties on the response of water levels in wells to Earth tides and atmospheric loading. // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 12403-12411.
12. Van der Kamp G., Gale L.E. Theory of Earth tide and barometric effects in porous formations with compressible grains // Water Resour. Res. 1983. V. 19. P. 538-544.