УДК 556.3.08
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4341
Шифр специальности ВАК: 1.6.21., 1.6.6., 2.3.3

Сравнительная оценка случайной составляющей погрешности автоматических скважинных уровнемеров на основе обработки измерений земноприливных колебаний уровня подземных вод

Т.Ю. Заведий[1], Н.Р. Адонин[2], О.Н. Кокорев[3]✉, А.А. Щипков[2]

[1] АО «Сибирский химический комбинат», Россия, г. Северск
[2] Северский технологический университет Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, г. Северск
[3] Филиал «Северский», Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами, Россия, г. Северск

✉Kokorev.podzemgazprom@yandex.ru

Аннотация. ***Актуальность.*** Внедрение автономных цифровых уровнемеров позволяет существенно расширить спектр задач, решаемых в различных областях геологии и экологии: с повышением частоты измерений становится возможным успешное применение методов математической обработки данных для снятия искажений уровня различной природы. Расширение сфер применения скважинных уровнемеров делает актуальным вопрос выбора того или иного типа прибора для обеспечения требуемой точности измерения. ***Цель:*** рассмотреть методику сравнительной оценки случайной составляющей погрешности автоматических уровнемеров, основанную на обработке измерений земноприливных колебаний уровня подземных вод. ***Методы:*** компенсация влияния изменений атмосферного давления на уровень подземных вод на основе опытного определения барометрического коэффициента скважины; расчет земноприливных колебаний уровня по упрощенной модели; корреляционный и частотный анализ расчетных и экспериментальных данных. ***Результаты.*** Путем сопоставления измеренных значений уровня с расчетными значениями земноприливных колебаний уровня подземных вод выполнена сравнительная оценка точности нескольких цифровых уровнемеров, установленных в одной скважине. Путем снятия искажений от вариаций атмосферного давления и последующей фильтрации скользящим средним из показаний уровнемеров выделен сигнал земноприливных колебаний уровня подземных вод. Из корреляционного и амплитудно-частотного анализа расчетных и экспериментальных данных определены показатели, по которым можно проводить сравнительную оценку случайной составляющей погрешности испытуемых уровнемеров. ***Выводы.*** Предложенная методика позволяет по результатам сравнительных натурных испытаний выбрать автономные цифровые уровнемеры с минимальной случайной составляющей погрешности. Наиболее перспективным способом снятия искажающего влияния земноприливных колебаний уровня подземных вод является режекторная фильтрация сигнала уровня с использованием двух частот заграждения.

Ключевые слова: автономный цифровой уровнемер, земные приливы, земноприливные колебания уровня подземных вод, приливной потенциал, астрономический расчет приливного потенциала, приливная деформация пород, погрешность измерения уровня, корреляционный анализ, амплитудно-частотный анализ

Благодарности: Авторы благодарят главного геолога Акционерного общества «Сибирский химический комбинат» Андрея Александровича Зубкова, специалистов службы по ремонту и обслуживанию контрольно-измерительных приборов и автоматики цеха эксплуатации филиала «Северский» Федерального государственного унитарного предприятия «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» Дмитрия Николаевича Кузнецова и Павла Александровича Каткова за помощь в организации опыта, а также Дениса Геннадьевича Калинова (ООО «ПОЛИНОМ») и Евгения Андреевича Шелемова (ООО «Водный горизонт») за предоставление цифровых уровнемеров.

Для цитирования: Сравнительная оценка случайной составляющей погрешности автоматических скважинных уровнемеров на основе обработки измерений земноприливных колебаний уровня подземных вод / Т.Ю. Заведий, Н.Р. Адонин, О.Н. Кокорев, А.А. Щипков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 88–104. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4341

UDC 556.3.08
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4341

Comparative estimation of a random error component of automatic well level gauges based on processing measurements of earth-tidal level of groundwater

T.Yu. Zavedy[1], N.R. Adonin[2], O.N. Kokorev[3]✉, A.A. Shchipkov[2]

[1] JSC "Siberian Group of Chemical Enterprises", Seversk, Russian Federation
[2] Seversk Technological Institute of the National Research Nuclear University "MEPhI", Seversk, Russian Federation
[3] "Seversky" branch of the "National operator for radioactive waste management", Seversk, Russian Federation

✉Kokorev.podzemgazprom@yandex.ru

Abstract. ***Relevance.*** Introduction of autonomous digital level gauges allows significantly expanding the range of tasks solved in various fields of geology and ecology, by increasing the frequency of measurements and applying mathematical processing methods to avoid distortions of different nature. The expansion of the field of application of downhole level meters makes it a topical issue to choose a particular type of device to ensure the required measurement accuracy. ***Aim.*** To consider the approaches to comparative estimation of random error of several types of automatic level gauges based on their recording of earth-tidal variations of groundwater level. ***Methods.*** Methods of compensating the influence of variations in atmospheric pressure on groundwater levels; methods of calculating tidal level variations; methods of correlation and frequency analysis of the calculated and experimental data. ***Results.*** The authors have carried out a comparative assessment of the accuracy in readings of several digital level gauges, installed in one well, by comparing the measured values of earth-tidal variations of the groundwater level with the calculated ones. Based on the experimental data, tidal variations of the groundwater level were obtained by eliminating distortions from variations in atmospheric pressure and then filtering with the moving mean. From correlation and amplitude-frequency analysis of the calculated and experimental data, indicators were determined for making a comparative assessment of a random component of the error of the tested level gauges. ***Conclusions.*** The approach suggested allows choosing independent digital level gauges with a minimum random error component using the totality of calculated parameters. The most promising way to eliminate the distorting effects of tidal variation of groundwater level is the method based on the cutter frequency filtering of the level signal measured by the level gauge.

Keywords: autonomous digital level gauge, earth tides, earth-tidal variations of groundwater level, tidal potential, astronomical calculation of tidal potential, tidal deformation of rocks, level measurement error, correlation analysis, amplitude-frequency analysis

Acknowledgements: The authors are grateful to Andrey A. Zubkov the Chief Geologist of Joint Stock Company "Siberian Group of Chemical Enterprises", Dmitry N. Kuznetsov and Pavel A. Katkov specialists of the Repair and Maintenance of Instrumentation and Automation Service at the Operation Workshop of the Branch "Seversky" of the Federal State Unitary Enterprise «National Operator for Radioactive Waste Management» for their support in arranging the experience, as well as Denis G. Kalinov (POLINOM LLC) and Evgeny A. Shelemov (Vodny Horizon LLC) for the digital level measuring equipment.

For citation: Zavedy T.Yu., Adonin N.R., Kokorev O.N., Shchipkov A.A. Comparative estimation of a random error component of automatic well level gauges based on processing measurements of earth-tidal level of groundwater. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 88–104. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4341

Введение

За последние десятилетия точность измерений уровня подземных вод автоматическими уровнемерами значительно повысилась. Это существенно расширяет спектр прикладных задач в гидрогеологии [1, 2], сейсмологии [2, 3] и геоэкологии [4, 5], которые можно решать, применяя автоматические скважинные уровнемеры.

Для автоматического измерения уровня в глубоководных скважинах наиболее подходящими являются гидростатические датчики [6–8]. Паспортное значение основной приведенной погрешности у современных скважинных уровнемеров данного типа может составлять порядка 0,10–0,25 %. Так, при диапазоне измерения уровня от 0 до 10 м абсолютная погрешность будет равна 1,0–2,5 см, приближаясь к погрешности измерений переносными рулеточными уровнемерами электроконтактного типа, которые часто используются в качестве эталонного измерителя при проверке точности измерений уровня подземных вод. При определении величины полной приведенной погрешности учи-

тывают следующие основные составляющие: неточность градуировочной характеристики, гистерезис, дрейф нуля, инерционность преобразователя, температурную ошибку. Однако при решении ряда задач, как, например, прецизионный мониторинг уровня подземных вод в напорных буферных горизонтах на полигонах захоронения промстоков [8–10], практический интерес представляют, прежде всего, относительные изменения уровня в скважинах за небольшие промежутки времени (до 10 ч). В этом случае основное влияние на результаты измерений оказывает случайная составляющая погрешности. Основными причинами случайной составляющей погрешности выступают гистерезис и дрейф различной природы. Опыт реальных измерений уровня подземных вод показывает, что случайная составляющая относительной погрешности многих моделей современных уровнемеров может составлять 0,02 % от верхнего предела измерений [8, 9, 11]. Учитывая, что паспортные данные многих уровнемеров не содержат сведений о случайной составляющей погрешности, а оценка ее опытным путем затруднительна ввиду отсутствия опорного средства измерения с более высокой точностью, выбор типа уровнемера с наименьшей случайной погрешностью для решения вышеуказанных задач является комплексной проблемой. При возможности опытных испытаний различных типов уровнемеров сравнительную оценку их случайной погрешности предлагается выполнить путем сопоставления результатов фактических измерений уровня подземных вод с колебаниями уровня подземных вод в скважине, которые можно рассчитать заранее. Такими базовыми колебаниями могут являться земноприливные колебания уровня подземных вод, обусловленные объемными деформациями горных массивов и водонасыщенных пластовых систем от приливного воздействия Луны и Солнца. Разными исследователями установлено, что земноприливные колебания уровня подземных вод являются вторым значимым фактором, влияющим на показания уровнемера, после искажений, вызванных вариациями атмосферного давления [8, 9, 12, 13]. Для расчета земноприливных колебаний не требуется выполнения непрерывных измерений каких-либо дополнительных величин (как, например, атмосферного давления): достаточно лишь задать местное время, широту, долготу места наблюдений и вычислить положение в пространстве основных небесных тел: Луны и Солнца, практически полностью определяющих интенсивность приливных явлений на Земле.

Цель работы – рассмотреть подходы к сравнительной оценке случайной составляющей погрешности нескольких автоматических уровнемеров на основе регистрации ими земноприливных вариаций уровня подземных вод в неглубоко залегающих (~200 м) песчано-глинистых напорных водоносных горизонтах зоны замедленного водообмена в условиях ненарушенного гидрогеодинамического режима.

Условия измерений

Данная статья описывает подходы к сравнительной оценке случайной погрешности различных автоматических уровнемеров на примере результатов измерений, проведенных на пункте глубинного захоронения (ПГЗ) жидких радиоактивных отходов (ЖРО) филиала «Северский» ФГУП «НО РАО» (г. Северск, Томская область). Измерения проводились с использованием четырех различных моделей гидростатических уровнемеров избыточного или абсолютного давления, устанавливаемых в наблюдательную скважину Т-21 (стоит отметить, что предлагаемая методика не зависит от типа чувствительного элемента, используемого в преобразователях давления, однако для прецизионного измерения уровня широкое применение находят пьезорезистивные сенсоры). Скважина Т-21 вскрывает 108-миллиметровым фильтром IV (буферный) горизонт в интервале глубин 190–218 м, который сложен несцементированными проницаемыми песчано-глинистыми породами терригенного происхождения [10]. В гидрогеологическом плане это верхняя часть зоны замедленного водообмена. По данным откачек, гидропроводимость буферного горизонта определена в диапазоне значений 100–200 $м^2$/сут., коэффициент пьезопроводности – ~$3 \cdot 10^5$ $м^2$/сут. Впервые на ПГЗ ЖРО «Северский» прецизионные измерения уровня в буферном горизонте были проведены в 2002 г. [11]. Горизонт надежно изолирован мощным (~30–50 м) водоупорным слоем от залегающих ниже песчаных пластов, в которые осуществляется нагнетание отходов, поэтому в IV горизонте имеет место естественный ненарушенный гидродинамический режим с годовым полуразмахом сезонных колебаний около 30–50 мм. Полуразмах земноприливных колебаний уровня в этом горизонте составляет 2–3 мм. Характеристики уровнемеров различных производителей и различной конструктивной реализации, устанавливаемых в скважину Т-21, приведены в табл. 1; всем уровнемерам даны условные наименования по типу «Уровнемер №…». Периодичность выполнения замеров для всех испытуемых уровнемеров равнялась 1 ч.

По своей технической реализации датчик Уровнемера № 1 снабжен капиллярной трубочкой, выводимой наружу из скважины для физической компенсации влияния атмосферного давления. Таким образом, результатом подобных измерений является сумма гидростатического давления водного столба над датчиком и давления воздуха от зеркала воды в скважине до ее оголовка (места вывода капиллярной трубки).

Таблица 1. *Характеристики испытуемых уровнемеров*
Table 1. *Characteristics of the level gauges being tested*

Уровнемер Level gauge	Принцип измерения Principle of measurement	Диапазон измерения водного столба, м Water column measurement range, m	Приведенная погрешность, % Reduced error, %	Паспортное разрешение, мм Passport permit, mm
№ 1	$P_{гидр.}$	0–10	0,1	—
№ 2	$P_{гидр.}+P_{атм.}$	0–2	0,25	—
№ 3	$P_{гидр.}+P_{атм.}$	0–5	0,1	1–2
№ 4	$P_{гидр.}$	0–10	0,25	1

Примечание: $P_{гидр.}$ – гидростатическое давление столба жидкости над датчиком; $P_{атм.}$ – атмосферное давление.
Note: $P_{гидр.}$ – hydrostatic pressure of a liquid column above a sensor; $P_{атм.}$ – atmospheric pressure.

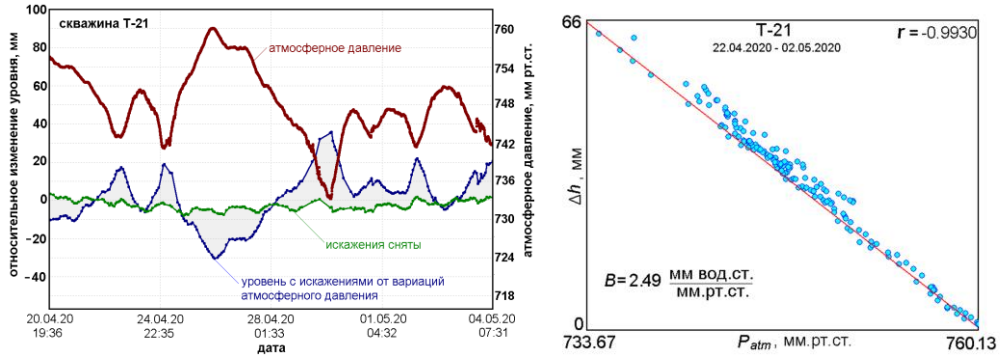
Последним в задачах, где значение имеют лишь относительные изменения уровня, можно пренебречь, поскольку вариации нескомпенсированного давления атмосферного воздуха крайне малы ввиду практически постоянного микроклимата внутри скважины и относительно небольшой глубины до уровня подземных вод (~10–20 м). Здесь стоит отметить, что, несмотря на фактическое устранение влияния атмосферного давления на результаты измерений у датчиков подобного типа, сам уровень подземных вод в скважине сильно зависит от вариаций атмосферного давления из-за сложного взаимодействия в системе «атмосфера – упругий пласт – скважина» [9–11]. Для датчиков с компенсационной трубочкой корреляционная картина «давление–уровень» имеет обратный характер: при повышении давления от среднего измеренный уровень подземных вод падает, и наоборот.

Датчики Уровнемеров № 2 и № 3 измеряют абсолютное давление: результатом измерения для них является сумма гидростатического давления водного столба над датчиком (уже искаженного влиянием атмосферного давления на весь массив пород) и абсолютного давления атмосферы над зеркалом воды в скважине. Для датчиков абсолютного давления корреляция «давление–уровень» имеет прямой характер.

В Уровнемере № 4 реализована программная компенсация атмосферного давления, которая производится на уровне вторичного преобразователя самого уровнемера благодаря встроенному датчику атмосферного давления.

Искажения от вариаций атмосферного давления

Снятие искажений от вариаций атмосферного давления выполнялось по линейно-корреляционной модели через опытное определение коэффициента *B*, называемого барометрической эффективностью скважины [8, 9]. Для определения выбирался короткий промежуток времени в году, за который атмосферное давление успевало измениться на несколько десятков мм рт. ст. Также в этот период должны отсутствовать осадки, а естественный ход уровней должен минимально искажать корреляционную картину «давление–уровень». Обычно для этой задачи наиболее удобными являются дни весенней межени (конец апреля – начало мая), когда уровни подземных вод горизонтов зоны замедленного водообмена минимальны в году и около недели их естественный сезонный ход практически отсутствует (годовой минимум). На рис. 1 показан пример определения барометрической эффективности скважины как коэффициента линейной корреляционной связи «давление–уровень» с последующим удалением искажений, обусловленных вариациями атмосферного давления, на примере Уровнемера № 1, установленного в скважину Т-21 в 2020 г.



a *b*

Рис. 1. *Удаление искажающего влияния вариаций атмосферного давления из замеров уровня подземных вод на примере показаний Уровнемера № 1 в скважине Т-21 на конец апреля 2020 г.: a) графики атмосферного давления и уровня до и после снятия искажений; b) обратная корреляция «давление–уровень»*

Fig. 1. *Removal of the distorting effect of atmospheric pressure variations from groundwater level measurements on the example of Level Meter No. 1 readings in T-21 well at the end of April 2020: a) atmospheric pressure graphs and levels before and after distortion removal; b) inverse correlation «pressure–level»*

Полученная барометрическая эффективность B скважины Т-21 оказалась равной 2,49 мм вод.ст./мм рт.ст. (1,87 мм/гПа), корреляция обратная. Это значение применено для снятия искажений от вариаций атмосферного давления из показаний Уровнемеров № 1 и № 4. Исходя из известной в физике линейной связи между атмосферным давлением и эквивалентным ему гидростатическим давлением ($\Delta P=\rho g\Delta h$), для Уровнемеров № 2 и № 3 с датчиками абсолютного давления результирующий коэффициент для снятия вариаций атмосферного давления в скважине Т-21 будет равен 10,41 мм вод.ст./мм рт.ст. (7,81 мм/гПа), корреляция прямая.

Испытания проводились с 01.07.2021 по 11.03.2022. В этот период испытуемые уровнемеры устанавливались в скважине Т-21 на различное по продолжительности время. В статье представлены результаты по трем периодам измерений, выполненным в разное время года (периоды №№ 1–3 на рис. 2).

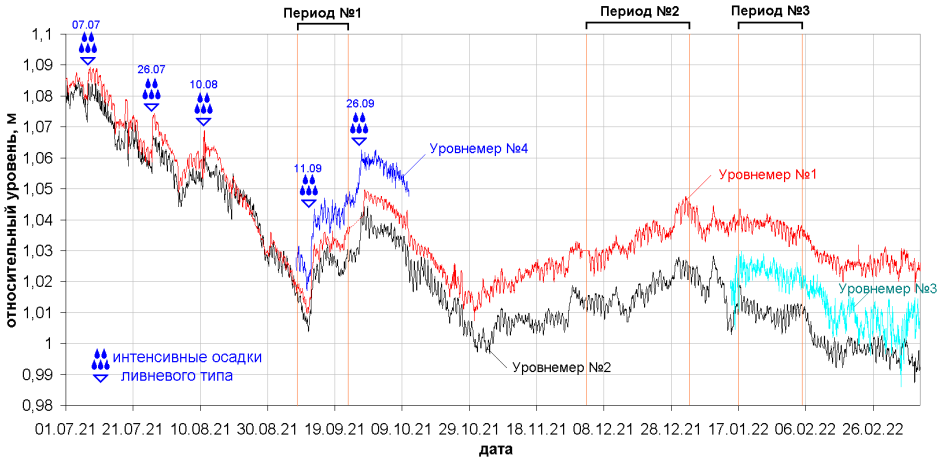


Рис. 2. *Графики уровня подземных вод со снятыми атмосферными искажениями, полученные с использованием испытуемых уровнемеров в период 2021–2022 гг.*

Fig. 2. *Graphs of the groundwater level with the removed atmospheric distortions obtained using the level gauges under test for 2021–2022*

Помимо данных, полученных за период 2021–2022 гг., далее в этой статье в качестве примеров будут также приводиться результаты обработки измерений более раннего периода, полученные с использованием Уровнемера № 1 в другой скважине IV горизонта.

Земноприливные вариации уровня подземных вод

После снятия искажений из замеров уровня подземных вод, обусловленных вариациями атмосферного давления (полный размах колебаний 40–60 мм), на графиках сразу становятся заметны характерные земноприливные вариации уровня (полный размах колебаний 2–3 мм), имеющие выраженную суточно-полусуточную периодичность [9, 12].

Расчет приливных явлений от Луны и Солнца требует астрономических знаний, причем как в области сферической астрономии (расчет угловых положений светил на небесной сфере), так и в области небесной механики (движение по замкнутым орбитам, расстояния до притягивающих тел). Для определения положений Луны и Солнца с астрономической точностью необходимы специальные громоздкие выражения и большое число астрономических констант. Однако для задач гидрогеологии в подобной точности нет нужды, особенно если речь идет о простом сравнении измеренных земноприливных вариаций уровня с теоретически рассчитанными. В рамках данной статьи представлены максимально упрощенные выражения, требующие наименьшего числа констант. Подобные зависимости можно будет использовать на практике в виде обычных формул в электронных таблицах или в прикладных программах по обработке результатов замеров уровня, получаемых с автоматических цифровых уровнемеров.

Общепринятая модель рассматривает приливной потенциал W от гравитационного воздействия любого из небесных тел, Солнца или Луны, в наиболее простом приближении сферической симметрии тяготеющих масс [13, 14]:

$$W=\frac{1}{2}\frac{GMa^2}{R^3}\left(3\cos^2\Theta-1\right), \qquad (1)$$

где G – гравитационная постоянная: $\approx 6{,}67\cdot10^{-11}$ м^3/(кг·с^2); M – масса притягивающего тела, кг; a – средний радиус Земли, м; R – расстояние между центрами масс Земли и притягивающего тела, м; Θ – зенитный угол положения притягивающего тела (отклонение от зенита), рад.

Из (1) можно получить отношение средних приливных потенциалов, вызываемых Солнцем и Луной на поверхности Земли:

$$k_{SM} = \frac{R_M^3 M_S}{R_S^3 M_M}, \quad (2)$$

где R_M – среднее расстояние до Луны: $3{,}84 \cdot 10^5$ км; R_S – среднее расстояние до Солнца: $1{,}49 \cdot 10^8$ км; M_M – масса Луны: $7{,}35 \cdot 10^{22}$ кг; M_S – масса Солнца: $1{,}99 \cdot 10^{30}$ кг.

Все исходные значения для расчета в (2) взяты из [13]. Отношение k_{SM} равно 0,4634. Другими словами, приливное воздействие от Луны на поверхности Земли в среднем в 2,1577 раза больше, чем от Солнца.

Зенитный угол Θ любого светила в экваториальной системе небесных координат в любой момент звездного времени s запишется по формуле из сферической астрономии [14] в следующем виде:

$$\cos\Theta = \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos H, \quad (3)$$

где Φ – географическая широта пункта наблюдения на Земле, рад; δ – склонение светила в экваториальной системе небесных координат, рад; H – часовой угол светила, рад;

После тригонометрических преобразований (3) с учетом (1) приливной потенциал W запишется в виде, изложенном еще Лапласом, – в форме суперпозиции трех гармоник [15] (в скобках сверху вниз: секториальной, тессеральной и зональной):

$$W = \frac{3}{4}\frac{GMa^2}{R^3}\begin{pmatrix} \cos^2\varphi \cdot \cos^2\delta \cdot \cos 2H + \\ + \sin 2\varphi \cdot \sin 2\delta \cdot \cos H + \\ + 3\left(\sin^2\varphi - 1/3\right)\left(\sin^2\delta - 1/3\right) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Результирующий суммарный приливной потенциал будет равен суперпозиции для Солнца (индекс «S») и для Луны (индекс «M»):

$$W_{SM} = W_S + W_M, \quad (5)$$

где W_S, W_M вычисляются согласно (4).

Помимо изменения угловых координат на небесной сфере во времени необходимо учитывать изменение расстояний до притягивающего тела. Изменение расстояния обусловлено эксцентриситетом как орбиты Луны, вращающейся вокруг Земли, так и орбиты Земли, вращающейся вокруг Солнца. Учитывая небольшое значение эксцентриситетов ($\varepsilon \ll 1$) у рассматриваемых в статье небесных тел, изменение расстояния $R(t)$ можно задать модуляционным множителем. Из основ небесной механики известно, что изменение расстояния до небесного тела, движущегося по эллиптической орбите, равно [15–20]:

$$R(t) = \bar{R} \cdot \left[1 - \varepsilon \cdot \cos\left(\omega\left(t - t_П\right)\right)\right], \quad (6)$$

где $\bar{R}$ – среднее расстояние по орбите до центра масс небесного тела, м; ω – угловая частота обращения небесного тела по своей орбите, сут.$^{-1}$; ε – эксцентриситет орбиты; t – момент времени, сут.; $t_П$ – начальный момент времени прохождения ближайшей точки к притягивающему телу (перигелий для Земли и перигей для Луны), сут.

Тогда выражение (6), обратное кубу расстояния (1), с учетом малого значения эксцентриситета $\varepsilon << 1$ запишется в следующем виде:

$$\frac{1}{R^3(t)} \approx \frac{1}{\bar{R}^3} \cdot \left[1 + 3 \cdot \varepsilon \cdot \cos\left(\omega\left(t - t_П\right)\right)\right] = \frac{1}{\bar{R}^3} \cdot \rho(t), \quad (7)$$

где $\rho(t)$ – модулирующий множитель, используемый для учета изменения расстояния до притягивающего центра.

С учетом (1), (2), (7) выражение (5) можно преобразовать к удобному виду:

$$W_{SM} = \frac{1}{2}\frac{GM_M a^2}{R_M^3}\begin{bmatrix} \rho_M(t)\left(3\cos^2\Theta_M - 1\right) + \\ + k_{SM}\rho_S(t)\left(3\cos^2\Theta_S - 1\right) \end{bmatrix}.$$

Исходя из закономерностей механики пласта, с пренебрежением эффектами инерционности в простейшем приближении приливная реакция уровня в скважине Δh_{ET} может быть принята пропорционально равной [13, 15] суммарному приливному потенциалу W_{SM} от Луны и Солнца. Фактические наблюдения [13–17] прямо подтверждают высокое сходство графиков приливного отклика уровня подземных вод и вариаций приливного потенциала. Следует определиться с соответствием знаков потенциала и реакции уровней: когда приливной потенциал положителен, земная кора расширяется, а уровни подземных вод падают, и наоборот. Т. е. изменения приливного потенциала и реакция уровня подземных вод всегда противоположны по своему знаку. Выражение, связывающее реакцию уровня Δh_{ET} на земноприливное возмущение с положением Луны и Солнца на небесной сфере, без учета инерционности системы «пласт–скважина» запишется в следующем виде:

$$\Delta h_{ET}(t) = -\frac{2}{3}A_{ET}\begin{bmatrix} \rho_M(t)\left(3\cos^2\Theta_M - 1\right) + \\ + k_{SM}\rho_S(t)\left(3\cos^2\Theta_S - 1\right) \end{bmatrix}.$$

Сокращенно это можно записать в виде безразмерной функции земного прилива $f_{ET}(t)$, состоящей из суммы двух безразмерных функций $f_M(t)$ (лунная составляющая) и $f_S(t)$ (солнечная составляющая), взятой с противоположным знаком и умноженной на характеристическую амплитуду A_{ET}:

$$\Delta h_{\mathrm{ET}}(t) = A_{\mathrm{ET}} f_{\mathrm{ET}}(t) = -A_{\mathrm{ET}} \left[f_{\mathrm{M}}(t) + k_{\mathrm{SM}} f_{\mathrm{S}}(t) \right], \quad (8)$$

где Δh_{ET} – земноприливное возмущение (вариация) уровня подземных вод, мм; A_{ET} – характеристическая амплитуда земноприливных колебаний уровня, индивидуальная для скважины, мм.

Часовой угол H светила, равномерно перемещающегося относительно небесного экватора (3), как функцию времени развернуто можно записать в следующем виде:

$$H(t) = s(t) - \alpha(t) = \Omega\left(t - t^0(\lambda)\right),$$

где $s(t)$ – момент звездного времени, рад.; $\alpha(t)$ – прямое восхождение светила в экваториальной системе небесных координат на момент времени t, рад; λ – географическая долгота местности, рад; t – местное поясное время на географической долготе λ, сут.; Ω – угловая частота периодичности наступления верхних кульминаций светила: для Луны – средние лунные сутки, для Солнца – средние солнечные сутки, сут.$^{-1}$; $t^0(\lambda)$ – средний начальный момент наступления верхней кульминации светила, задаваемый для пункта наблюдений на географической долготе λ, сут.

Тогда составляющая безразмерной функции земного прилива для светила с учетом (4), (7) предстанет в виде:

$$f(t) = \rho(t) \begin{bmatrix} \cos^2\varphi \cdot \cos^2\delta(t) \cdot \cos\left(2H(t) - \psi(t)\right) + \\ + \sin 2\varphi \cdot \sin 2\delta(t) \cdot \cos\left(H(t) - \psi(t)\right) + \\ + 3\left(\sin^2\varphi - 1/3\right)\left(\sin^2\delta(t) - 1/3\right) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $\delta(t)$ – склонение светила в момент времени t; $\rho(t)$ – модулирующий множитель, учитывающий изменение расстояния до притягивающего центра светила; $\psi(t)$ – угловая поправка за неравномерность наступления верхних кульминаций светила из-за неравномерности скорости его углового движения относительно небесного экватора, рад.

Теперь рассмотрим расчет склонения, а также поправок за счет изменения расстояний и неравномерности углового движения светила – отдельно для Луны (индекс «M») и для Солнца (индекс «S»), с целью их подстановки в (9). Вспомогательные зависимости и параметры взяты из литературы по соответствующей астрономической тематике [13, 14, 18–20].

Склонение Луны (в градусах) в экваториальной системе небесных координат для момента времени t:

$$\delta_{\mathrm{M}}(t) \cong \delta_e \cdot \sin\left(\omega_{\mathrm{M}}^{\mathrm{trop}}\left(t - t_{\mathrm{M}}^{\mathrm{trop}}\right)\right) + \\ + 5{,}14^\circ \cdot \cos\left(\omega_{\mathrm{M}}^{\mathrm{drac}}\left(t - t_{\mathrm{M}}^{\mathrm{drac}}\right)\right),$$

где δ_e – наклон эклиптики к плоскости земного экватора, равен 23,44°; $\omega_{\mathrm{M}}^{\mathrm{trop}}$ – угловая частота тропического лунного месяца, сут.$^{-1}$; $t_{\mathrm{M}}^{\mathrm{trop}}$ – средний момент времени пересечения Луной небесного экватора из южного в северное небесное полушарие, сут.; $\omega_{\mathrm{M}}^{\mathrm{drac}}$ – угловая частота драконического лунного месяца, сут.$^{-1}$; $t_{\mathrm{M}}^{\mathrm{drac}}$ – средний момент времени прохождения Луной восходящего лунного узла, сут.

Угловая поправка за неравномерность наступления верхних кульминаций Луны:

$$\psi_{\mathrm{M}}(t) = 2\bar{\varepsilon}_{\mathrm{M}} \cdot \sin\left(\omega_{\mathrm{M}}^{\mathrm{anom}}\left(t - t_{\mathrm{M}}^{\mathrm{anom}}\right)\right) - \\ - \left(\sin^2\frac{\delta_{\mathrm{M}}^{\max}(t)}{2} + \sin^4\frac{\delta_{\mathrm{M}}^{\max}(t)}{2}\right) \cdot \sin\left(\omega_{\mathrm{M}}^{\mathrm{trop}}\left(t - t_{\mathrm{M}}^{\mathrm{trop}}\right)\right),$$

где $\bar{\varepsilon}_{\mathrm{M}}$ – средний эксцентриситет орбиты Луны: ≅0,055545 [13, 14, 18–22]; $\omega_{\mathrm{M}}^{\mathrm{anom}}$ – угловая частота аномалистического лунного месяца, сут.$^{-1}$; $t_{\mathrm{M}}^{\mathrm{anom}}$ – средний момент времени прохождения перигея Луной, сут.; $\delta_{\mathrm{M}}^{\max}(t)$ – изменение максимального склонения Луны с периодом 18,61 лет (в градусах):

$$\delta_{\mathrm{M}}^{\max}(t) \cong 23{,}44^\circ + 5{,}14^\circ \cdot \cos\left(\omega_{\mathrm{M}}^{\mathrm{nod}}\left(t - t_{\mathrm{M}}^{\mathrm{nod}}\right)\right),$$

где $\omega_{\mathrm{M}}^{\mathrm{nod}}$ – угловая частота полного обращения лунных узлов с периодом 18,61 лет, сут.$^{-1}$; $t_{\mathrm{M}}^{\mathrm{nod}}$ – начальный момент времени, когда Луна в течение месяца достигала максимального склонения в ±28,58°, сут.

При предельно упрощенном вычислении моментов прохождения Луной перигея только через средний момент $t_{\mathrm{M}}^{\mathrm{anom}}$ и угловую частоту $\omega_{\mathrm{M}}^{\mathrm{anom}}$ ошибка в определении истинного перигея может достигать ±1,75 сут., что составляет ±6 % от продолжительности аномалистического лунного месяца, но для оценочных расчетов этого достаточно. Если необходимо более точное определение моментов прохождения Луной перигея, потребуется введение дополнительной поправки для момента времени $t_{\mathrm{M}}^{\mathrm{anom}}$, которая будет выражаться как функция от времени $\Delta t_{\mathrm{M}}^{\mathrm{anom}}(t)$.

Модуляция из-за изменения расстояния от Земли до Луны выражается с учетом (7):

$$\rho_{\mathrm{M}}(t) = 1 + 3 \cdot \varepsilon_{\mathrm{M}}(t) \cdot \cos\left(\omega_{\mathrm{M}}^{\mathrm{anom}}\left(t - t_{\mathrm{M}}^{\mathrm{anom}}\right)\right),$$

где $\varepsilon_{\mathrm{M}}(t)$ – эксцентриситет орбиты Луны.

Наиболее сложным астрономическим фактором, необходимым для расчета расстояния до Луны и вариаций приливного потенциала, является до-

вольно быстрое изменение вытянутости (эксцентриситета) лунной орбиты во времени. Причина изменений кроется в сложном воздействии на орбитальное движение Луны не только Земли, но и Солнца. В отличие от небольших изменений расстояния до Луны в апогее, сильные биения перигейного расстоянии способны существенно изменять приливное воздействие. Расстояние в перигее меняется от 356 до 370 тыс. км при среднем значении перигейного расстояния в 362 тыс. км. Этот разброс в относительных единицах составляет ±1,9 %. Апогейное расстояние меняется существенно слабее: от 404 до 407 тыс. км, составляя в среднем 405,5 тыс. км (разброс в относительных единицах ±0,37 %). Влияние этого процесса на климат и земные геосферы изучается разными авторами [18–23]. Основной задачей является получение зависимости изменения эксцентриситета лунной орбиты, удобной для практических расчетов, без привлечения сложных формул, единиц измерения и системы специальных обозначений, принятых в общей астрономии. Удобная для практического применения формула изменения эксцентриситета орбиты Луны во времени на основании анализа графиков из [19–25] записывается в виде:

$$\varepsilon_{\text{M}}(t) \cong \bar{\varepsilon}_{\text{M}} + 0,014 \cdot \cos\left(\omega_{\text{M}}^{\varepsilon 1}(t - t_0^{\varepsilon}) + \phi_1\right) + \\ + 0,0142 \cdot \cos\left(\omega_{\text{M}}^{\varepsilon 2}(t - t_0^{\varepsilon}) + \phi_2\right),$$

где $\omega_{\text{M}}^{\varepsilon 1}$ – угловая частота эвекции (отклонения) в долготе Луны (31,81 сут.), сут.$^{-1}$; $\omega_{\text{M}}^{\varepsilon 2}$ – угловая частота биений аномалистического и синодического полумесяцев (205,89 сут.), или период биений перигейного расстояния, сут.$^{-1}$; t_0^{ε} – начальный момент времени для расчета (18.11.2000), сут.; ϕ_1=2,148 рад; ϕ_2=10,565 рад.

Склонение Солнца (в градусах) в экваториальной системе небесных координат запишется в виде:

$$\delta_{\text{S}}(t) = \delta_{\text{S}}^{\max} \cdot \sin\left(\omega_{\text{S}}^{\text{trop}}\left(t - t_{\text{S}}^{\text{trop}}\right)\right);$$

- поправка за неравномерность наступления верхних кульминаций Солнца:

$$\psi_{\text{S}}(t) = 2\bar{\varepsilon}_{\text{S}} \cdot \sin\left(\omega_{\text{S}}^{\text{anom}}\left(t - t_{\text{S}}^{\text{anom}}\right)\right) - \\ - \left(\sin^2\frac{\delta_{\text{S}}^{\max}}{2} + \sin^4\frac{\delta_{\text{S}}^{\max}}{2}\right) \cdot \sin\left(\omega_{\text{S}}^{\text{trop}}\left(t - t_{\text{S}}^{\text{trop}}\right)\right);$$

- модуляция от изменения расстояния до Солнца:

$$\rho_{\text{S}}(t) = 1 + 3 \cdot \varepsilon_{\text{S}} \cdot \cos\left(\omega_{\text{S}}^{\text{anom}}\left(t - t_{\text{S}}^{\text{anom}}\right)\right),$$

где $\delta_{\text{S}}^{\max}$ – среднее максимальное склонение Солнца на данную эпоху: ≅ 23,44°, или наклон эклиптики к плоскости земного экватора; $\omega_{\text{S}}^{\text{trop}}$ – угловая частота тропического солнечного года, сут.$^{-1}$; $t_{\text{S}}^{\text{trop}}$ – момент времени прохождения Солнцем точки весеннего равноденствия на небесной сфере (21 марта любого года), сут.; $\bar{\varepsilon}_{\text{S}}$ – средний эксцентриситет орбиты Земли на данную эпоху: ≅ 0,0167. $\omega_{\text{S}}^{\text{anom}}$ – угловая частота аномалистического солнечного года, сут.$^{-1}$; $t_{\text{S}}^{\text{anom}}$ – момент времени прохождения Землей перигелия (3 января любого года), сут.

Выделение земноприливных вариаций из замеров уровня

Чтобы сравнить расчетные значения земноприливных вариаций с фактическими, необходимо выделить последние из зарегистрированных значений уровня подземных вод. Достаточно эффективным и простым решением здесь служит применение дискретного фильтра на основе скользящего среднего. Простой фильтрацией можно выделять высокочастотные земноприливные вариации в виде остаточной разности:

$$\Delta h_{\text{ET}}^{*}(t_i) = h^{\text{I}}(t_i) - \frac{1}{2N+1}\sum_{j=-N}^{j=N} h^{\text{I}}(t_{i+j}),$$

$$t_i = i \cdot T, \qquad (10)$$

где $\Delta h_{ET}{}^{*}(t)$ – значения земноприливных вариаций уровня подземных вод, выделенные из измерений, мм; $h^{\text{I}}(t)$ – замеры уровня с компенсированным влиянием искажений атмосферного давления, мм; T – период регистрации показаний уровня подземных вод, ч; N – половина ширины усредняющего окна, значений.

С учетом известных частот колебаний большинства типов приливных волн в окрестности периодов 12 и 24 ч, приведенных в [26–35], размер временно́го окна сглаживания для выделения приливных вариаций $(2N+1)\cdot T$ должен быть равным 26–27 ч. Это позволит подавить влияние всех основных высокочастотных земноприливных волн (суточных и полусуточных), период которых менее или равен заданной ширине скользящего окна осреднения [35].

Пример результатов выделения земноприливных вариаций $\Delta h_{\text{ET}}{}^{*}(t)$ изображен на рис. 3. Замеры уровня выполнены Уровнемером № 1 в период летнего максимального подъема уровня подземных вод в первой половине июня 2020 г. на ПГЗ ЖРО «Северский». Измерения уровня проводились в период с 31.05.2020 по 18.06.2020 в одной из скважин IV горизонта (буферного), вскрытого в интервале глубин 164–234 м, в условиях ненарушенного гидродинамического режима.

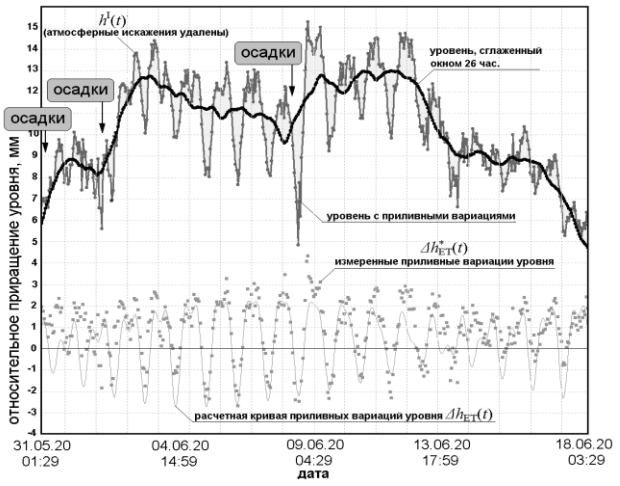


Рис. 3. *Пример выделения земноприливных вариаций уровня подземных вод при помощи численной фильтрации скользящим средним и сравнения с расчетными значениями*

Fig. 3. *Example of separation of earth-tidal variation of groundwater level through numerical filtration by moving mean and comparison with the calculated values*

Результаты работы

Всего по результатам измерений в скважине Т-21 за 2021–2022 гг. выбраны три принципиально различных периода, в которые можно выполнить сравнение показаний уровнемеров (рис. 2):

1) период № 1: 08.09.2021–22.09.2021 в окрестности осеннего равноденствия для сравнения Уровнемеров № 1, № 2, № 4;
2) период № 2: 04.12.2021–03.01.2022 в окрестности зимнего солнцестояния для сравнения Уровнемеров № 1 и № 2. (Благодаря удачному стечению астрономических условий: двум новолуниям вблизи перигея, зимнему солнцестоянию и перигелию, это вообще наилучшее время для регистрации наиболее сильных земноприливных вариаций уровня подземных вод за последние несколько лет);
3) период № 3: 17.01.2022–02.02.2022 для сравнения Уровнемеров № 1, № 2, № 3.

На рис. 4–6 представлены графики с выделенными земноприливными вариациями уровня подземных вод, полученные с уровнемеров в различные периоды измерений.

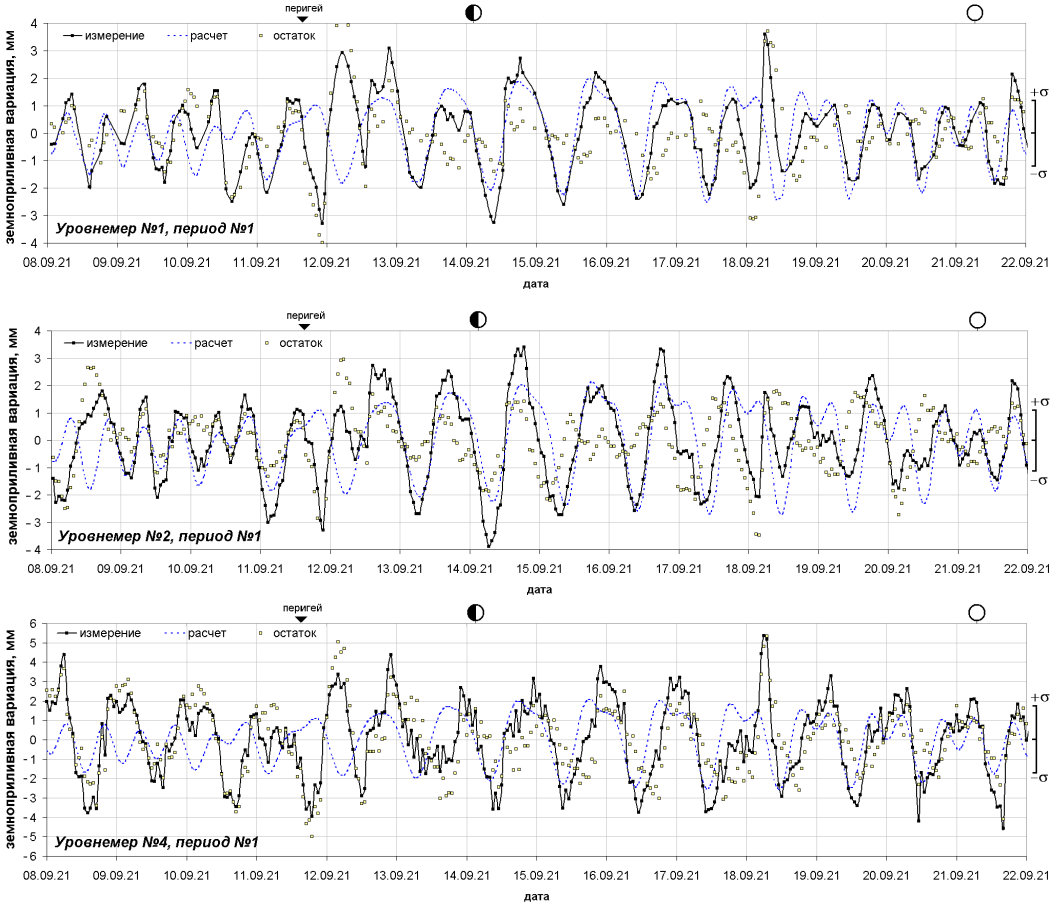


Рис. 4. *Сравнение земноприливных вариаций уровня подземных вод в скважине Т-21, выделенных из показаний Уровнемеров №№ 1, 2, 4, с расчетными значениями за период № 1 (08.09.2021–22.09.2021)*

Fig. 4. *Comparison of earth-tidal variations of groundwater level in T-21 well, extracted from readings of level gauges no. 1, 2 and 4, with the calculated values for period no. 1 (08.09.2021–22.09.2021)*

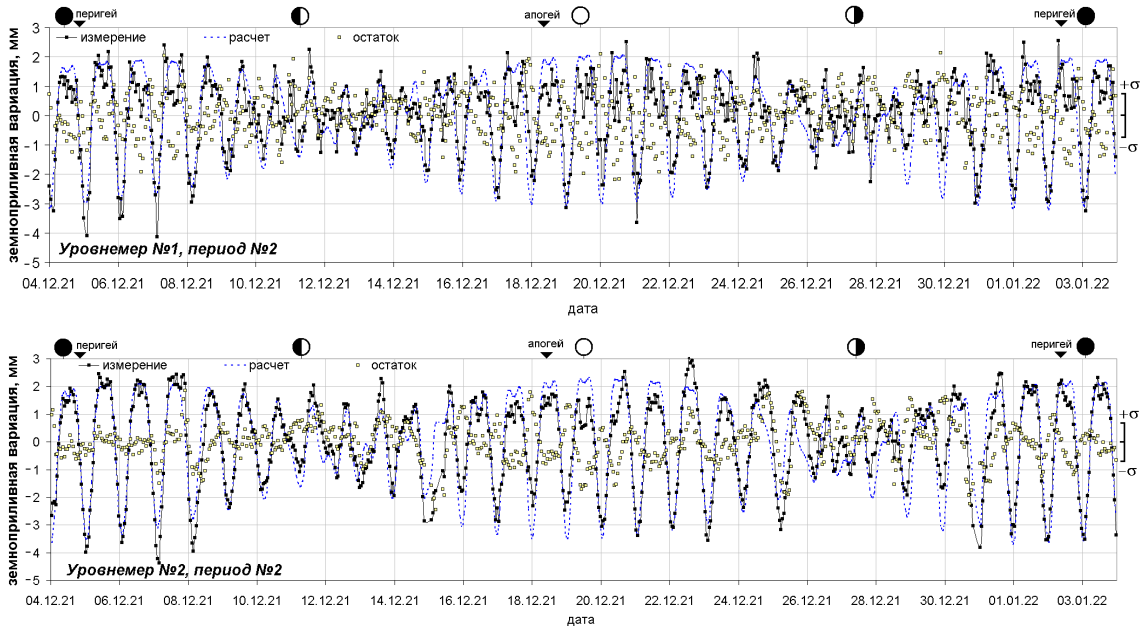


Рис. 5. *Сравнение земноприливных вариаций уровня подземных вод в скважине Т-21, выделенных из показаний Уровнемеров №№ 1, 2, с расчетными значениями за период № 2 (04.12.2021–03.01.2022)*

Fig. 5. *Comparison of earth-tidal variations of groundwater level in T-21 well, extracted from readings of level gauges no. 1 and 2 with the calculated values for period no. 2 (04.12.2021–03.01.2022)*

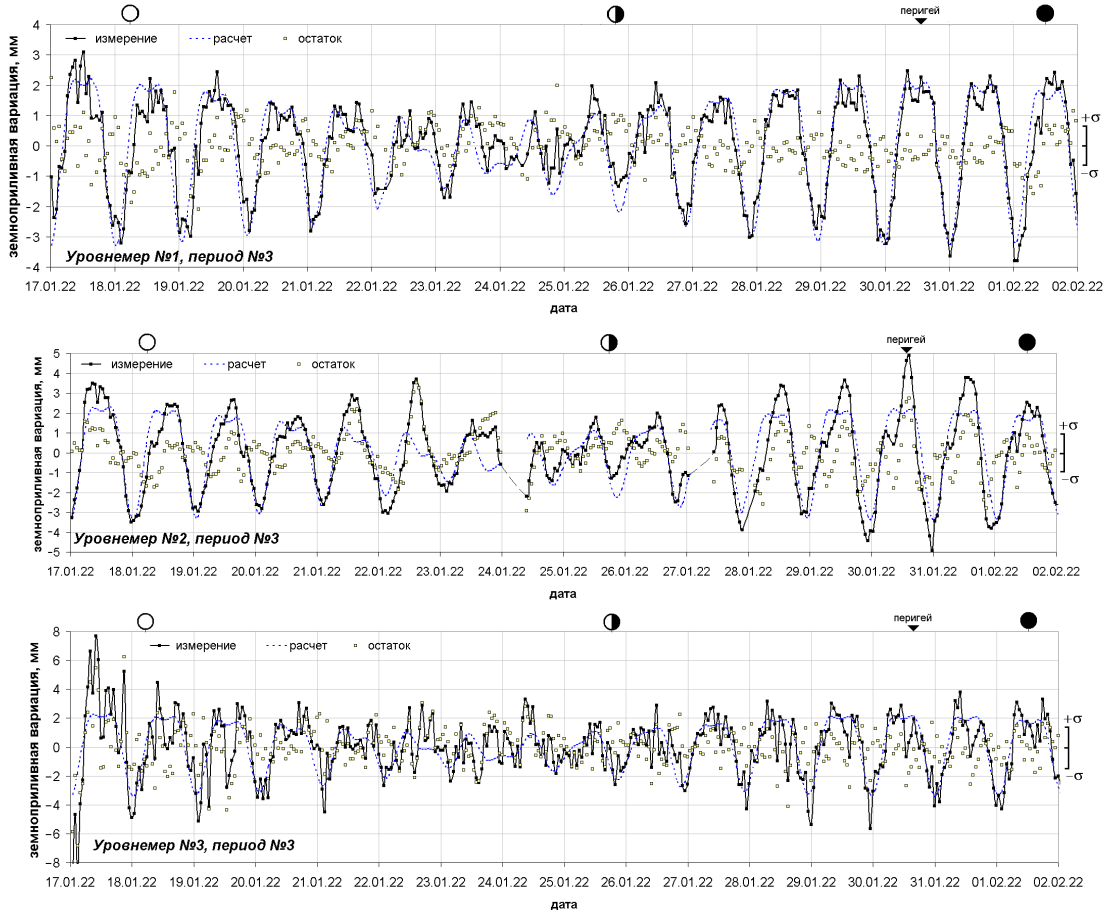
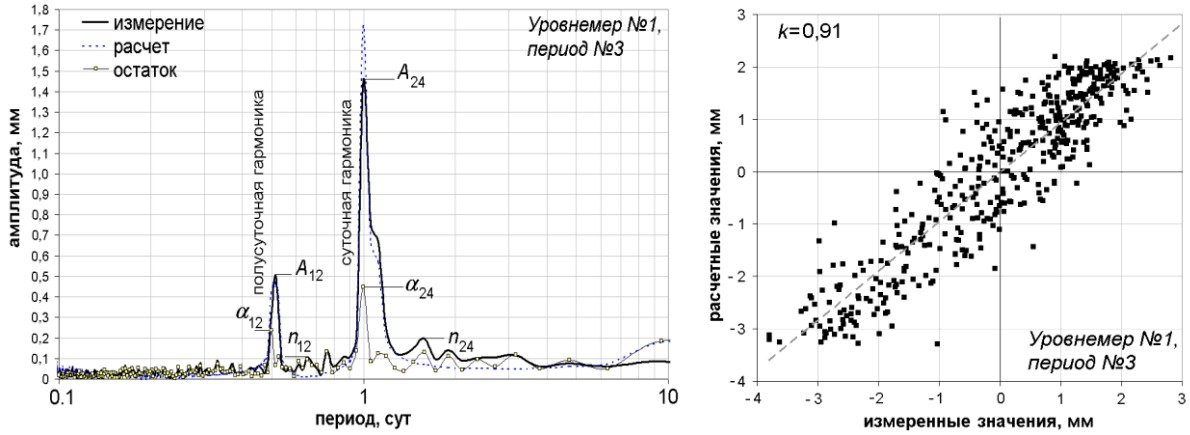


Рис. 6. *Сравнение земноприливных вариаций уровня подземных вод в скважине Т-21, выделенных из показаний Уровнемеров №№ 1, 2, 3, с расчетными значениями за период № 3 (17.01.2022–02.02.2022)*

Fig. 6. *Comparison of earth-tidal variations of groundwater level in T-21 well, extracted from readings of level gauges no. 1, 2 and 3 with the calculated values for period no. 3 (17.01.2022–02.02.2022)*



a *b*

Рис. 7. *Результаты частотного и корреляционного анализа земноприливных вариаций уровня подземных вод, выделенных из показаний Уровнемера № 1 в период № 3: a) амплитудно-частотные характеристики эмпирических, расчетных значений и их разности; b) корреляция между эмпирическими и расчетными значениями*

Fig. 7. *Results of the frequency and correlation analysis of earth-tidal variations of the groundwater level, extracted from the readings of level gauge no. 1 for period no. 3: a) amplitude-frequency characteristics of empirical and calculated values and their difference; b) correlation between empirical and calculated values*

В рамках сравнительной оценки случайной составляющей погрешности для каждого из уровнемеров подбирались или вычислялись следующие величины:

- A_{ET} – характеристическая амплитуда расчетных земноприливных вариаций уровня (множитель при функции $f_{ET}(t)$), обеспечивающая наилучшую линейную корреляцию расчетных значений с полученными эмпирически с использованием (10), мм;
- s_{res} – стандартное отклонение разности между земноприливными вариациями уровня, рассчитанными по (8) и (10): $\Delta h_{ET}^{*}(t)$–$\Delta h_{ET}(t)$, мм (гистограммы распределения значений $\Delta h_{ET}^{*}(t)$–$\Delta h_{ET}(t)$ по всем четырём датчикам в разные периоды наблюдений приведены на рис. 8);
- k – коэффициент линейной корреляции между земноприливными вариациями уровня, рассчитанными по (8) и (10);
- A_{12} – амплитуда полусуточной гармоники в спектре $\Delta h_{ET}^{*}(t)$, мм (рис. 7, *a*);
- A_{24} – амплитуда суточной гармоники в спектре $\Delta h_{ET}^{*}(t)$, мм (рис. 7, *a*);
- n_{12} – амплитуда наибольшей гармоники $\Delta h_{ET}^{*}(t)$ неприливной природы (фоновой) в окрестности периода 12 ч, мм (рис. 7, *a*);
- n_{24} – амплитуда наибольшей гармоники $\Delta h_{ET}^{*}(t)$ неприливной природы (фоновой) в окрестности периода 24 ч, мм (рис. 7, *a*);
- α_{12} – амплитуда полусуточной гармоники в спектре отклонений $\Delta h_{ET}^{*}(t)$–$\Delta h_{ET}(t)$, мм (рис. 7, *a*);
- α_{24} – амплитуда суточной гармоники в спектре отклонений $\Delta h_{ET}^{*}(t)$–$\Delta h_{ET}(t)$, мм (рис. 7, *a*).

Примечание: под суточной и полусуточной гармониками понимаются гармоники с периодом в окрестности 24 и 12 ч соответственно, имеющие наибольшую амплитуду в спектре.

Помимо самих значений амплитуд земноприливных гармоник, интерес также представляют их соотношения. Введем следующие относительные величины:

- $c_{12}=A_{12}/n_{12}$ – отношение амплитуды полусуточной гармоники A_{12} к амплитуде n_{12} ближайшей наибольшей гармоники неприливной природы в окрестности периода 12 ч;
- $c_{24}=A_{24}/n_{24}$ – отношение амплитуды суточной гармоники A_{24} к амплитуде n_{24} ближайшей наибольшей гармоники неприливной природы в окрестности период 24 ч;
- $r_{12}=A_{12}/\alpha_{12}$ – отношение амплитуды полусуточной гармоники A_{12} к амплитуде α_{12} в спектре остаточных отклонений (условно – коэффициент подавления полусуточной гармоники расчетным способом);
- $r_{24}=A_{24}/\alpha_{24}$ – отношение амплитуды суточной гармоники A_{24} к амплитуде α_{24} в спектре остаточных отклонений (условно – коэффициент подавления суточной гармоники расчетным способом);
- A_{12}/A_{24} – отношение амплитуды полусуточной гармоники к суточной для эмпирических значений (полусуточная амплитуда всегда меньше суточной).
- Результаты статистического и амплитудно-частотного анализа сравнения по всем испытанным уровнемерам сведены в табл. 2.

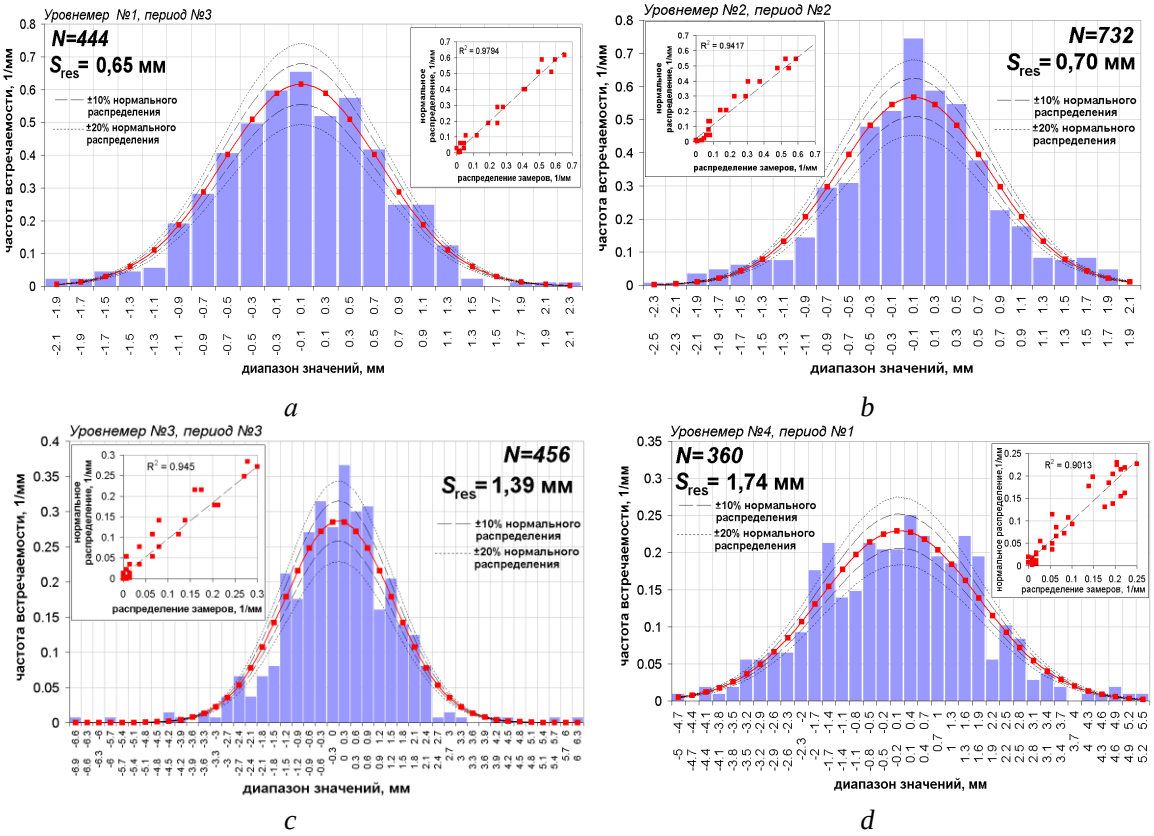


Рис. 8. *Гистограммы распределения по величине остаточной разности земноприливных вариаций уровня, рассчитанных по (8) и (10), для уровнемеров и сравнение ее с нормальным распределением: a) Уровнемер № 1; b) Уровнемер № 2 c) Уровнемер № 3; d) Уровнемер № 4*

Fig. 8. *Histograms of distribution by the residual difference of earth-tidal level variations calculated by (8) and (10), for level gauges and comparison with normal distribution: a) level gauge no. 1; b) level gauge no. 2 c) level gauge no. 3; d) level gauge no. 4*

В табл. 2 сведены результаты испытаний уровнемеров, включающие статистические характеристики и частотные показатели. К первым относятся коэффициент линейной корреляции k и величина стандартного отклонения остаточных разностей s_{res}, которая может считаться количественной мерой случайной составляющей погрешности испытанных уровнемеров. Но следует отметить, что в нее включены не только случайная составляющая погрешности уровнемера, но еще и не до конца скомпенсированные отклонения между рассчитанными и измеренными земноприливными вариациями, влияние осадков, а также, вероятно, собственные колебания исследуемой пластовой системы, индуцированные земными приливами. К частотным показателям относятся: коэффициенты подавления земноприливных гармоник расчетным способом r_{12}, r_{24} (чем они больше, тем лучше в показаниях уровнемера отражаются расчетные земноприливные колебания уровня), отношение амплитуд наибольших зарегистрированных полусуточной и суточной гармоник (A_{12}/A_{24}) и отношения c_{12}, c_{24}, характеризующие выраженность амплитуд земноприливных гармоник относительно окрестного фонового шума в отфильтрованном сигнале уровнемера.

На основании изложенного в табл. 2 можно сделать предварительные выводы относительно испытанных уровнемеров. Наилучшими по своим статистическим и амплитудно-частотным характеристикам относительно регистрации земноприливных вариаций уровня подземных вод являются Уровнемеры № 1 и № 2: они имеют наименьшее стандартное отклонение от расчетных значений (0,65–0,70 мм) и максимальную корреляцию с расчетными значениями (0,85–0,91). Наилучшая степень подавления земноприливных гармоник расчетным способом (почти в 6 раз) отмечена у Уровнемера № 2. Для Уровнемера № 1 отношение амплитуды полусуточной гармоники A_{12} к суточной A_{24} существенно больше (до 72 %), чем у Уровнемера № 2 (31–44 %). Гораздо слабее проявили себя Уровнемеры № 3 и № 4, причем последний – хуже всех, но с поправкой, что период его испытаний сильно искажался осадками, а из-за ослабленных приливов это вообще было наихудшее время в году (дни равноденствия) для измерений земноприливных вариаций уровня подземных вод в умеренных широтах.

Таблица 2. *Результаты статистического и амплитудно-частотного анализа земноприливных вариаций уровня в скважине Т-21, выделенных из показаний уровнемеров за период 2021–2022 гг.*

Table 2. *Results of statistical and amplitude-frequency analysis of earth-tidal level variations in well T-21, extracted from the readings of level gauges for 2021–2022*

№ п/п	Период измерений Period of measurements	Уровнемер Level gauge	Число точек измерения уровня Number of level measuring points (N)	s_{res}, мм/mm	Коэф. лин. корреляции Linear correlation coefficient k	Отношение Ratio				A_{ET}, мм/mm	Амплитуды/Amplitudes of						$\frac{A_{12}}{A_{24}}$ %
						$r=A/\alpha$		$c=A/n$			приливных гармоник tidal harmonics	гармоник локального фона local background harmonics			остаточных разностей residual differences		
						r_{12}	r_{24}	c_{12}	c_{24}		мм/mm						
											A_{12}	A_{24}	n_{12}	n_{24}	α_{12}	α_{24}	
1	№ 1 сент. 2021 Sept. 2021	№ 1	247	1,21	0,524	1,6	1,3	1,4	2,0	2,6	0,49	0,68	0,36	0,34	0,31	0,53	72
2		№ 2	360	1,15	0,641	2,7	1,4	2,5	4,5	2,8	0,56	1,27	0,22	0,28	0,21	0,87	44
3		№ 4	360	1,74	0,454	3,2	1,0	1,7	4,3	2,7	0,61	1,90	0,36	0,44	0,19	1,82	32
4	№ 2 дек. 2021 Dec. 2021	№ 1	723	0,75	0,856	3,1	2,4	6,3	6,9	2,4	0,75	1,10	0,12	0,16	0,24	0,45	68
5		№ 2	732	0,70	0,906	5,6	5,9	6,7	12,8	2,7	0,60	1,66	0,09	0,13	0,11	0,29	36
6	№ 3 янв. 2022 Jan. 2021	№ 1	444	0,67	0,910	2,1	3,3	8,5	7,3	2,6	0,51	1,46	0,06	0,20	0,24	0,44	35
7		№ 2	432	0,97	0,861	1,4	4,0	4,1	7,1	2,7	0,65	2,07	0,16	0,29	0,47	0,51	31
8		№ 3	456	1,39	0,731	1,5	4,5	4,3	5,5	2,7	0,95	1,48	0,22	0,27	0,63	0,32	64

В спектре остаточной разности между измеренными и расчетными земноприливными колебаниями уровня проявление ослабленных приливных гармоник было не лучше 17 % от исходных амплитуд, в среднем составляя (без серии заведомо «плохих» замеров сентября 2021 г.) 47 % для полусуточных и 27 % для суточных гармоник. Вероятно, это свидетельствует о сложности приливных явлений в земной коре и о нелинейности связи «приливной потенциал – уровень» для пластовой системы на участке выполнения описанных в статье измерений. Пример нелинейной связи приливной деформации и уровня подземных вод в водоносных горизонтах описан в [30, 35].

При планировании будущих наблюдений следует учитывать астрономические условия, влияющие на интенсивность земноприливных вариаций на протяжении нескольких лет.

Выводы

1. Все испытанные уровнемеры по отношению к земноприливным вариациям, зарегистрированным в скважине, имеют разброс измеренных значений (на уровне ±3σ), изменяющийся от ±2,01 до ±5,22 мм.
2. Для всех испытанных уровнемеров характерна фактическая чувствительность ~0,5 мм, позволяющая достоверно выделять земноприливные вариации с максимальной амплитудой колебаний ±3 мм.
3. У всех испытанных уровнемеров в частотном спектре выделенных земноприливных вариаций достоверно проявлены пики полусуточной и суточной гармоник колебаний. При дискретизации измерений с периодом не менее 1 ч зарегистрированная амплитуда полусуточных гармоник для разных уровнемеров в разные периоды года составила не менее 1/3 и не более 3/4 от амплитуды суточных гармоник.
4. В некоторые периоды измерений (период № 1) для уровнемеров наблюдалась низкая корреляция измеренных и рассчитанных земноприливных вариаций. Данный период соответствовал дням вблизи равноденствия, когда приливные явления в умеренных широтах максимально ослаблены по причинам астрономического характера. Вероятнее всего, дополнительной причиной недостаточного совпадения результатов измерений и расчета является сложная нелинейно-автоколебательная связь между регулярным приливным воздействием и объемной деформацией водонасыщенных пластовых систем.
5. Простое вычитание расчетных земноприливных вариаций не полностью удаляет их из фактических замеров уровня.
6. С учетом обобщения результатов выполненной работы наилучшим способом снятия земноприливных вариаций уровня из фактических замеров уровня, по всей видимости, должно быть не только расчетное их удаление, но и дополнительное подавление заграждающим дискретным фильтром, настроенным на области полусуточных и суточных гармоник с периодами: 0,5±0,05 и 1,0±0,15 сут., соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка деформационных свойств системы «пласт-скважина» на основе анализа барометрического и приливного откликов уровня воды в скважине / Г.Н. Копылова, Э.М. Горбунова, С.В. Болдина, Д.В. Павлов // Физика Земли. – 2009. – № 10. – С. 69–78.
2. Модернизация оборудования на скважинах Петропавловск-Камчатского полигона и результаты / Г.Н. Копылова, С.В. Болдина, В.А. Кобзев, Г.М. Коркина // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Тезисы XVI Международной сейсмологической школы. – Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2022. – С. 50.
3. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеологические предвестники землетрясений и вулканических активизаций по данным наблюдений в скважинах полуострова Камчатка // Науки о земле и недропользование. – 2021. – Т. 44. – № 2 (75). – С. 141–150.
4. Телеизмерительная информационная система геоэкологического мониторинга состояния недр и подземных сооружений пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов / О.Н. Кокорев, Н.Р. Адонин, В.Н. Самарцев, А.А. Щипков, М.Д. Носков, Е.Г. Язиков // Разведка и охрана недр. – 2023. – Т. 4. – С. 16–22.
5. Оценка влияния нагнетания жидких радиоактивных отходов на изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород / С.Ю. Малышков, О.Н. Кокорев, В.Ф. Гордеев, Т.Ю. Заведий, В.И. Поливач, А.И. Маневич // Разведка и охрана недр. – 2023. – Т. 4. – С. 43–48.
6. A high-accuracy phasor estimation algorithm for PMU calibration and its hardware implementation / S. Xu, H. Liu, T. Bi, K.E. Martin // Nano Energy. IEEE Transactions on Smart Grid. – 09 January 2020. – Vol. 11. – P. 3372–3383.
7. Vetterli B. Digital kompensierte Drucktransmitter zeigen die Grenzen des Machbaren URL: download.keller-druck.com/api/download/2HQkUzY8SAYKUv6SrMod7f/de/2008-04.pdf (дата обращения 28.05.2023).
8. Автоматизированная система гидродинамического мониторинга для обеспечения экологической безопасности пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов / О.Н. Кокорев, Н.Р. Адонин, М.Д. Носков, Т.Ю. Заведий, А.А. Щипков // Изв. вузов. Физика. – 2021. – Т. 64. – № 2-2. – С. 46–51.
9. Kopylova G.N., Boldina S.V. Preseismic groundwater ion content variations: observational data in flowing wells of the Kamchatka Peninsula and conceptual model // Minerals. – 2021. – Т. 11. – № 7 (731). DOI: doi.org/10.3390/min11070731
10. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов / А.И. Рыбальченко, М.К. Пименов, П.П. Костин и др. – М.: ИздАТ, 1994. – 256 с.
11. Experimental study of injection-interval hydraulic isolation from overlying formation at the disposal site of the Siberian chemical complex, using high-accuracy hydraulic head measurements / A.A. Zubkov, V.A. Sukhorukov, A.I. Zykov, E.A. Redkin, V.M. Shestakov, S.P. Pozdniakov, V.A. Bakshevskaya, V.M. Kurochkin // Developments in water science. Vol. 52. Underground injection science and technology, edited by Chin-Fu Tsang and John A. – Berkeley: Elseveir, 2005. – С. 151–155.
12. A universal high accuracy wearable pulse monitoring system via high sensitivity and large linearity graphene pressure sensor / Jiang He, Peng Xiao, Wei Lu, Jiangwei Shi, Ling Zhang, Yun Liang, Caofeng Pan, Shiao-Wei Kuo, Tao Chen // Nano Energy. – May 2019. – Vol. 59. – P. 422–433.
13. Мельхиор П. Земные приливы / пер. с англ. С.Н. Барсенкова, Ю.С. Доброхотова, Б.П. Перцева / под ред. Н.Н. Парийского. – М.: Изд-во «Мир», 1968. – 482 с.
14. Влияние гравитационного прилива Солнца и Луны на динамику параметров атмосферы, ионосферы и океана / Д.С. Хабитуев, Б.Г. Шпынев, А.В. Татарников, Е.С. Щеглова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – № 5. – С. 321–339.
15. Аллен К.У. Астрофизические величины / пер. с англ. Х.Ф. Халиуллина / перераб. и доп. изд-е под ред. Д.Я. Мартынова. – М.: Мир, 1977. – 279 с.
16. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии, изд. 4-е. – М.: Наука, 1977. – 544 с.
17. Гумен А.М. Оценка упругой емкости горных пород на основе анализа земноприливных вариаций уровня жидкости в пьезометрических скважинах // Вестник ГГТУ им. П.О.Сухого. – 2000. – № 3. – С. 37–41.
18. Исследование земноприливных колебаний уровня подземных вод на скважине «Обнинск» / А.Л. Багмет, М.И. Багмет, В.Л. Барабанов, А.О. Гриневский, И.Г. Киссин, В.А. Малугин, Т.А. Рукавишникова, И.В. Савин // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 1989. – № 11. – С. 84–95.
19. Отклик флюидонасыщенных коллекторов на лунно-солнечные приливы. Ч. 1. Фоновые параметры приливных компонент в смещении грунта и уровне подземных вод / А.Н. Беседина, Е.А. Виноградов, Э.М. Горбунова, Н.В. Кабыченко, И.С. Свинцов, П.И. Пигулевский, В.К. Свистун, С.В. Щербина // Физика Земли. – 2015. – № 1. – С. 73–82.
20. Numerical expressions for precession formulae and mean elements for the Moon and the planets / J.L. Simon, P. Bretagnion, J. Chapront, M. Chapront-Touzé, G. Francou, J. Laskar // Astronomy and Astrophysics. – 1994. – Vol. 282. – P. 663–683.
21. Wang Ch.-Y., Manga M. Water and earthquakes // Lecture Notes in Earth System Sciences. – Switzerland: Springer Cham, 2021. – 387 p.
22. Error in hydraulic head and gradient time-series measurements: a quantitative appraisal / G.C. Rau, V.E.A. Post, M.A. Shanafield, T. Krekeler, E.W. Banks, Ph. Blum. – Germany: Hydrology and Earth System Sciences (HESS), 2019. – P. 3603–3629.
23. Machine learning-based anomaly detection of groundwater microdynamics: case study of Chengdu, China / Haoxin Shi, Jian Guo, Yuandong Deng, Zixuan Qin // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – Article number 14718. DOI: 10.1038/s41598-023-38447-5.
24. Groundwater level prediction using machine learning models: a comprehensive review / Hai Tao, Mohammed Majeed Hameed, Haydar Abdulameer Marhoon, Mohammad Zounemat-Kermani et al. – Netherlands: Neurocomputing, 2022. – P. 271–308.
25. Varouchakis E.A., Guardiola-Albert C., Karatzas G.P. Spatiotemporal geostatistical analysis of groundwater level in aquifer systems of complex hydrogeology // American Geophysical Union: Water Resources Research. – 2022. – Vol. 58. – Iss. 3. DOI: doi.org/10.1029/2021WR029988

26. The origin of hydrological responses following earthquakes in a confined aquifer: insight from water level, flow rate, and temperature observations / Shouchuan Zhang, Zheming Shi, Guangcai Wang, Zuochen Zhang, Huaming Guo // Hydrology and Earth System Sciences (HESS). – 2023. – Vol. 27. – Iss. 2. – P. 401–415.
27. Toll N.J., Rasmussen T.C. Removal of barometric pressure effects and earth tides from observed water levels // Ground Water. – January-February 2007. – Vol. 45. – № 1. – P. 101–105.
28. Groundwater levels forecasting using machine learning models: a case study of the groundwater region 10 at Karst Belt, South Africa / B.A. Aderemi, Th.O. Olwal, J.M. Ndambuki, S.S. Rwanga // Systems and Soft Computing. – 2023. – Vol. 5. URL: https://doi.org/10.1016/j.sasc.2023.200049 (дата обращения 28.05.2023).
29. Физика и астрономия Луны / под ред. З. Копала / пер. с англ. под ред. Г.А. Лейкина. – М.: Мир, 1973. – 318 с.
30. Адушкин В.В., Спивак 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.
31. Сидоренков Н.С., Петров В.Н. Перигейно-сизигийные приливы в атмосфере // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2020. – № 2 (376). – С. 126–140.
32. Сидоренков Н.С. Небесно-механические причины изменений погоды и климата // Геофизические процессы и биосфера. – 2015. – Т. 14. – № 3. – С. 5–26.
33. NASA. Eclipse. URL: https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEhelp/moonorbit.html (дата обращения 28.05.2023).
34. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов: справочник. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.
35. Влияние лунно-солнечного прилива на вариации атмосферного давления / В.В. Адушкин, А.А. Спивак, Ю.С. Рыбнов, В.А. Харламов // Динамические процессы в геосферах. – 2016. – № 8. – С. 100–109.

Информация об авторах

Тарас Юрьевич Заведий, кандидат геолого-минералогических наук, инженер-технолог отдела экологического контроля АО «Сибирский химический комбинат», Россия, 636039, г. Северск, ул. Курчатова, 1. TYZavedy@rosatom.ru

Никита Русланович Адонин, аспирант кафедры электроники и автоматики физических установок, инженер научно-исследовательского сектора Северского технологического института Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65. d273ANR@edu.ssti.ru

Олег Николаевич Кокорев, главный специалист-гидрогеолог филиала «Северский», Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами, Россия, 636035, г. Северск, пр. Коммунистический, 8. Kokorev.podzemgazprom@yandex.ru

Александр Андреевич Щипков, кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и автоматики физических установок Северского технологического института Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65. aashchipkov@mephi.ru; https://orcid.org/0009-0006-4633-9175

Поступила в редакцию: 30.06.2023
Поступила после рецензирования: 31.10.2023
Принята к публикации: 20.12.2023

REFERENCES

1. Kopylova G.N., Gorbunova E.M., Boldina S.V., Pavlov D.V. Assessment of deformation properties of the “formation-well” system based on the analysis of barometric and tidal responses of the water level in the well. *Earth Physics*, 2009, no. 10, pp. 69–78. (In Russ.)
2. Kopylova G.N., Boldina S.V., Kobzev V.A., Korkina G.M. Modernization of equipment at wells of the Petropavlovsk-Kamchatka test site and results. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. *Abstracts of the XVI International Seismological School*. Obninsk, Federal Research Center «Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences», 2022. P. 50. (In Russ.)
3. Kopylova G.N., Boldina S.V. Hydrogeological precursors of earthquakes and volcanic activations according to observation data in wells of the Kamchatka Peninsula. *Geosciences and subsoil use*, 2021, vol. 44, no. 2 (75), pp. 141–150. (In Russ.)
4. Kokorev O.N., Adonin N.R., Samartsev V.N., Shchipkov A.A., Noskov M.D., Yazikov E.G. Telemetry information system for geoecological monitoring of the state of the subsoil and underground structures of deep disposal sites for liquid radioactive waste. *Exploration and protection of subsoil*, 2023, vol. 4, pp. 16–22. (In Russ.)
5. Malyshkov S.Yu., Kokorev O.N., Gordeev V.F., Zavediy T.Yu., Polivach V.I., Manevich A.I. Assessment of the influence of injection of liquid radioactive waste on changes in the stress-strain state of a rock mass. *Exploration and protection of subs*, 2023, vol. 4, pp. 43–48. (In Russ.)
6. Xu S., Liu H., Bi T., Martin K.E. A high-accuracy phasor estimation algorithm for PMU calibration and its hardware implementation. *Nano Energy. IEEE Transactions on Smart Grid*, 09 January 2020, vol. 11, pp. 3372–3383.
7. Vetterli B. *Digitally compensated pressure transmitters show the limits of what is possible*. (In Germ.) Available at: download.keller-druck.com/api/download/2HQkUzY8SAYKUv6SrMod7f/de/2008–04.pdf (accessed 28 May 2023).

8. Kokorev O.N., Adonin N.R., Noskov M.D., Zavediy T.Y., Shchipkov A.A. Automated hydrodynamic monitoring system to ensure environmental safety of a deep disposal site for liquid radioactive waste. *Izv. Universities. Physics*, 2021, vol. 64, no. 2–2, pp. 46–51. (In Russ.)
9. Kopylova G.N., Boldina S.V. Preseismic groundwater ion content variations: observational data in flowing wells of the Kamchatka Peninsula and conceptual model. *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 7 (731). DOI: doi.org/10.3390/min11070731
10. Rybalchenko A.I., Pimenov M.K., Kostin P.P. *Deep burial of liquid radioactive waste*. Moscow, IzdAT Publ., 1994. 256 p. (In Russ.)
11. Zubkov A.A., Sukhorukov V.A., Zykov A.I., Redkin E.A., Shestakov V.M., Pozdniakov S.P., Bakvskaya V.A. and Kurochkin V.M. Experimental study of injection-interval hydraulic isolation from overlying formation at the disposal site of the Siberian chemical complex, using high-accuracy hydraulic head measurements. *Developments in water science*. Vol. 52. Under-ground injection science and technology. Ed. by Chin-Fu Tsang, J.A. Apps. Berkeley, Elseveir, 2005. pp. 151–155.
12. Jiang He, Peng Xiao, Wei Lu, Jiangwei Shi, Ling Zhang, Yun Liang, Caofeng Pan, Shiao-Wei Kuo, Tao Chen. A universal high accuracy wearable pulse monitoring system via high sensitivity and large linearity graphene pressure sensor. *Nano Energy*, May 2019, vol. 59, pp. 422–433.
13. Melchior P. *Earth tides*. Translated from English by S.N. Barsenkova, Y.S. Dobrokhotova, B.P. Pertseva. Ed. by. N.N. Pariyskiy. Moscow, Mir Publ., 1968. 482 p. (In Russ.)
14. Habituev D.S., Shpynev B.G., Tatarnikov A.V., Shcheglova E.S. Influence of gravitational tide of the Sun and the Moon on the dynamics of parameters of the atmosphere, ionosphere and ocean. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2017, vol. 14, no. 5, pp. 321–339. (In Russ.)
15. Allen K.U. *Astrophysical quantities*. Translated from English by K.F. Khaliullin. Ed. by D.Y. Martynov. Moscow, Mir Publ., 1977. 279 p. (In Russ.)
16. Bakulin P.I., Kononovich E.V., Moroz V.I. *General astronomy course*. Moscow, Nauka Publ., 1977. 544 p. (In Russ.)
17. Gumen A.M. Evaluation of the rocks elastic capacity based on the analysis of earth-tidal level variations in piezometric wells. *P.O. Sukhoi GGTU Vestnik*, 2000, no. 3, pp. 37–41. (In Russ.)
18. Bagmet A.L., Bagmet M.I., Barabanov V.L., Grinevsky A.O., Kissin I.G., Malugin V.A., Rukavishnikova T.A., Savin I.V. Study of earth-tide fluctuations in the level of underground water at the Obninsk well. *Izv. AS USSR. Ser. Physics of the Earth*, 1989, no. 11, pp. 84–95. (In Russ.)
19. Besedina A.N., Vinogradov E.A., Gorbunova E.M., Kabychenko N.V., Svintsov I.S., Pigulevsky P.I., Svistun V.K., Shcherbina S.V. Response of fluid-saturated collectors to the lunar-solar tides. P. 1. Background parameters of the tidal component in ground displacement and groundwater level. *Earth physics*, 2015, no. 1, pp. 73–82. (In Russ.)
20. Simon J.L., Bretagnion P., Chapront J., Chapront-Touzé M., Francou G., Laskar J. Numerical expressions for precession formulae and mean elements for the Moon and the planets. *Astronomy and Astrophysics*, 1994, vol. 282, pp. 663–683.
21. Wang Ch.-Y., Manga M. Water and earthquakes. *Lecture Notes in Earth System Sciences*. Switzerland, Springer Cham, 2021. 387 p.
22. Rau G.C., Post V.E.A., Shanafield M.A., Krekeler T., Banks E.W., Blum Ph. *Error in hydraulic head and gradient time-series measurements: a quantitative appraisa*. Germany, Hydrology and Earth System Sciences (HESS), 2019. pp. 3603–3629.
23. Haoxin Shi, Jian Guo, Yuandong Deng, Zixuan Qin. Machine learning-based anomaly detection of groundwater microdynamics: case study of Chengdu, China. *Scientific Reports*, 2023, vol 13, Article number 14718. DOI: 10.1038/s41598-023-38447-5.
24. Hai Tao, Mohammed Majeed Hameed, Haydar Abdulameer Marhoon, Mohammad Zounemat-Kermani. *Groundwater level prediction using machine learning models: a comprehensive review*. Netherlands, Neurocomputing, 2022. pp. 271–308.
25. Varouchakis E.A., Guardiola-Albert C., Karatzas G.P. Spatiotemporal geostatistical analysis of groundwater level in aquifer systems of complex hydrogeology. *American Geophysical Union: Water Resources Research*, 2022, vol. 58, Iss. 3. DOI: doi.org/10.1029/2021WR029988.
26. Shouchuan Zhang, Zheming Shi, Guangcai Wang, Zuochen Zhang, Huaming Guo. *The origin of hydrological responses following earthquakes in a confined aquifer: insight from water level, flow rate, and temperature observations*. Germany, Hydrology and Earth System Sciences (HESS), 2023. Vol. 27, Iss. 2, pp. 401–415.
27. Toll N.J., Rasmussen T.C. Removal of barometric pressure effects and earth tides from observed water levels. *Ground Water*, January–February 2007, vol. 45, no. 1, pp. 101–105.
28. Aderemi B.A., Olwal Th.O., Ndambuki J.M., Rwanga S.S. Groundwater levels forecasting using machine learning models: a case study of the groundwater region 10 at Karst Belt, South Africa. *Systems and Soft Computing*, 2023, vol. 5. Available at: https://doi.org/10.1016/j.sasc.2023.200049 (accessed 28 May 2023).
29. *Physics and astronomy of the Moon*. Ed. by Z. Kopala. Translated from English by G.A. Leikin. Moscow, Mir Publ., 1973. 318 p.
30. Adushkin V.V., Spivak A.A., Kharlamov V.A. Influence of lunar-solar tide on the variation of geophysical fields on the Earth's crust-atmosphere boundary. *Earth's physics*, 2012, no. 2, pp. 14–26. (In Russ.)
31. Sidorenkov N.S., Petrov V.N. Perigean-syzygic tides in the atmosphere. *Hydrometeorological studies and projections*, 2020, no. 2 (376), pp. 126–140. (In Russ.)
32. Sidorenkov N.S. Celestial mechanical causes of weather and climate changes. *Geophysical processes and biosphere*, 2015, vol. 14, no 3, pp. 5–26. (In Russ.)
33. *NASA*. Eclipse. Available at: https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEhelp/moonorbit.html (accessed 28 May 2023).
34. Goldenberg L.M., Matiushkin B.D., Polyak M.N. *Digital signal processing: directory*. Moscow, Radio and Communication Publ., 1985. 312 p. (In Russ.)
35. Adushkin V.V., Spivak A.A., Rybnov Yu.S., Kharlamov V.A. Influence of the lunar-solar tide on variations of atmospheric pressure. *Dynamic processes in geospheres*, 2016, no. 8, pp. 100–109. (In Russ.)

Information about the authors
Taras Yu. Zavedy, Cand. Sc., Engineer-Technologist, JSC "Siberian Group of Chemical Enterprises", 1, Kurchatov street, Seversk, 636039, Russian Federation. TYZavedy@rosatom.ru
Nikita R. Adonin, Postgraduate Student, Research Engineer, Seversk Technological Institute of the National Research Nuclear University "MEPhI", 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation. d273ANR@edu.ssti.ru
Oleg N. Kokorev, Chief Specialist-hydrogeologist, "Seversky" branch of the "National operator for radioactive waste management", 8, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636035, Russian Federation. Kokorev.podzemgazprom@yandex.ru
Alexander A. Shchipkov, Cand. Sc., Associate Professor, Seversk Technological Institute of the National Research Nuclear University "MEPhI", 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation. aashchipkov@mephi.ru; https://orcid.org/0009-0006-4633-9175

Received: 30.06.2023
Revised: 31.10.2023
Accepted: 20.12.2023