

ОБОСНОВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ ИСПАРЕНИЯ РАПЫ ВОСТОЧНОГО БАСЕЙНА САКСКОГО ОЗЕРА

А.Б. Ситников¹, В.В. Чабан²

¹ *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: geoj@bigmir.net*

Доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией техногенной гидрогеологии.

² *Крымская режимно-эксплуатационная станция, Крым.*

Кандидат геологических наук, руководитель группы полевого мониторинга.

Для регулирования водно-солевым режимом лечебной рапы Сакского озера необходимо оценить физическое испарение из рапы. Основанием служат ежемесячные за 2007, 2010 и 2014 гг. фактические данные наблюдений и опробования за объемом и минерализацией рапы, объемами закачки пресными и морскими водами, отбором рапы на бальнеологию, рассчитанное пополнение грунтовыми водами, а также среднемесячные показатели по стационарному гидрометеопосту непосредственно в акватории Восточного лечебного водоема: атмосферные осадки, температуры воды и воздуха, относительные влажности воздуха. Численные исходные данные приведены в соответствии с правилами округлений. Результаты выполнены согласно предложенным уравнениям баланса объемов воды и масс воды и солей, а также с учетом разработанной эмпирико-аналитической формулы. Для показательных июня и июля 2007 г. представлено для наглядности и контроля выполнение математических операций. Систематизированы основные причины погрешностей. Результаты обобщены и представлены в таблице. Интересно, что упрощенное уравнение баланса оказалось практически пригодным для реализации.

Ключевые слова: достоверность, испарение, рапа, Сакское озеро, правило вычислений, общесбалансовые уравнения, молярность, плотность.

SUBSTANTIATION OF THE BRINE EVAPORATION ASSESSMENT VALIDITY FOR THE EASTERN BASIN OF SAKY LAKE

A.B. Sitnikov¹, V.V. Chaban²

¹ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: geoj@bigmir.net*

Doctor of geological-mineralogical sciences, professor, chief of Technogenic Hydrogeology Laboratory.

² *Crimean Secure-Operating Station, Crimea.*

Candidate of geologicale sciences, team of Leader of Field Monitoring.

The regulation of the salt-water state for remedial brine of Saky Lake needs to assess the physical evaporation from the brine. The substantiation is based on the monthly observations and sampling of the volumes and mineralization of brine, the volumes for injecting by fresh and sea waters, balneology sampling, the calculated refill by ground water as well as average monthly factors for the stationary meteorological gauging station directly within the Eastern remedial basin as the followings: precipitation, water and air temperatures, air relative moisture for 2007, 2010 and 2014. The numerical initial data are obtained according with the rounding-off rules. The results were retrieved by the proposed equations for balance among the water volume, water and salt masses using the developed empirical and analytical formulae. The mathematical operations are used for the illustration and control during the representative months such as June and July, 2007. The key reasons of the errors are systemized. The results are generalized and set out in the Table. It is interesting that the simplified equation is practically suitable for the realization.

Key words: validity, evaporation, brine, Saky Lake, calculation rule, balance-wide equation, molarity, density.

ОБГРУНТУВАННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ОЦІНКИ ВИПАРОВУВАННЯ РОПИ СХІДНОГО БАСЕЙНУ САКСЬКОГО ОЗЕРА

А.Б. Ситніков¹, В.В. Чабан²

¹ Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: geoj@bigmir.net

Доктор геолого-мінералогічних наук, професор, завідувач лабораторії техногенної гідрогеології.

² Кримська режимно-експлуатаційна станція, Крим.

Кандидат геологічних наук, керівник групи польового моніторингу.

Для регулювання водно-сольовим режимом лікувальної ропи Сакського озера необхідно оцінити фізичне випаровування з ропи. Основою слугують щомісячні за 2007, 2010 і 2014 рр. фактичні дані спостережень та опробування об'ємів і мінералізації ропи, об'ємів закачування прісних та морських вод, відбір ропи на бальнеологію, розрахування поповнення ґрунтовими водами, а також середньомісячні показники по стаціонарному гідрометеопосту безпосередньо в акваторії Східного лікувального водоймища (атмосферні опади, температури ропи і повітря, відносні вологості повітря). Числові висхідні дані наведені у відповідності до правил округлень. Результати отримані згідно із запропонованим рівнянням балансу об'ємів води та мас води і солей, а також з урахуванням розробленої емпірико-аналітичної формули. Для показових червня і липня 2007 р. представлено для наочності і контролю виконання математичних операцій. Систематизовані основні причини погрішностей. Результати узагальнені і представлені в таблиці. Цікаво, що спрощене рівняння балансу об'ємів виявилось практично придатним для реалізації.

Ключові слова: достовірність, випаровування, ропа, Сакське озеро, правило обчислень, загальнобалансові рівняння, молярність, щільність.

Для достоверности (подлинности, истинности, в конечном счете точности) оценки испарения из озерно-морских рассолов воспользуемся рекомендованной нами пятикритериальной оценкой этого понятия: выяснения физико-химической сущности, причинной обусловленности (детерминизма), компетентных размеров и времен, контролируемой точности опытных определений, а также вычислительных операций [Ситников, 2010]. В предыдущих статьях [Ситников, 2016а, б] нами подробно описаны особенности состояния рассолов типа рапы Сакского озера, подчиняющиеся 100%-но обеспеченным законам, подтвержденные компетентностью элементарного объема, равного около $\delta V_{\text{рапы}} = 1 \text{ м}^3$ и применяемого в расчетах времени $\delta t \approx 1 \text{ мес.}$ Обоснован метод расчета физического испарения воды из рассолов (рапы), основанный на уравнениях балансов масс воды и солей, по существу отражающих всеобщие законы сохранения массы веществ. Кроме общесбалансовых методов, разработана эмпирико-аналитическая формула, которая в комбинации с точными результатами по водно-солевому балансу рапы позволяет учесть роль основных метеорологических факторов (температур воздуха, атмосферных осадков и относительной влажности воздуха). Предварительные расчеты [Ситников, 2016а, б] подтвердили эффективность водно-

солевых балансов и указанной формулы, отвечающих первым трем из пятикритериальных требований достоверности, и показали несомненную важность детерминистического подхода к исходным параметрам и точности их определения.

Восточный бассейн в пределах Сакского озера [Чабан, 2014] – водоем с переменным уровнем режимом от $-1,20$ абс. м до $-0,74$ абс. м и изменяющейся минерализацией от 96 до 250 г/дм³. Созданная гидротехническая система каналов и насосных станций позволяет отводить излишки рапы в биологический пруд-поглотитель в осенне-зимний период и проводить закачку морской воды в летний период для повышения объема и снижения минерализации. Пропускная способность насосов 864 м³/ч не может обеспечить быстрого пополнения бассейна, поэтому подача морской воды осуществляется заблаговременно до периода интенсивного испарения. Гидрологические наблюдения ведутся со времени основания наблюдательной гидрометеостанции в 1926 г. В начале 80-х годов на базе автоматической информационной системы была разработана эколого-гидрохимическая модель, позволяющая выполнять прогнозы изменения гидрохимических показателей в Восточном бассейне, в том числе прогноз водного баланса. С 90-х годов по ныне этот прогноз не осуществляется, хотя весьма

актуален в настоящее время. Известно, что водный баланс Восточного водоема формируется из приходной части – грунтовых вод, жидких атмосферных осадков, закачиваемой морской и пресной воды; а также из расходной части – испарения и забора рапы на бальнеолечение. Приход грунтовых вод рассчитан по девяти наблюдательным скважинам на северном и южном берегах водоема. Количество осадков выполнено по натурным наблюдениям и на стационарном метеорологическом посту в акватории Восточного бассейна. Объемы морской и пресной вод определены по зависимости между временем работы насосной станции и пропускной способностью насоса. Количество отбираемой рапы определяется по показаниям счетчика. Регулярно в начале каждого месяца осуществляется опробование минерализации рассола лечебного водоема и измерение абсолютного уровня водоема, тарированного на объем бассейна. При этом специальных исследований одиночных замеров минерализации и уровней водоема с точки зрения применимости для всего бассейна не проводилось, за исключением эпизодического опробования по глубине водоема, оказавшегося вполне однородным. По-видимому, в специфических условиях малых глубин и ветровых волнений Восточного водоема стабилизация уровней и минерализации происходит достаточно быстро, чтобы одиночным измерением охарактеризовать весь объем работ.

Обращаем особое внимание на то, что, несмотря на отсутствие прямых определений погрешностей параметров, исходных для расчета, в частности балансовых составляющих, можно их оценить косвенным способом, если эти параметры определены с учетом принятых правил приближенных вычислений.

Есть смысл напомнить эти правила, хотя бы для наших сравнительно простых прогнозных математических операций (сложения, вычитания, умножения и деления) с учетом ручного счета. Согласно работам [Ситников, 2010; Бронштейн, Семендяев, 1981], все измерения характеризуются некоторой погрешностью, зависящей от точности измерительного устройства и от искусства экспериментатора. Одним из способов указания точности измерения являются записи с помощью знака \pm . Часто этот знак и следующие за ним цифры опускаются, полагая, что в последней цифре записи результатов измерения содержится погрешность, по крайней

мере, в одной единице. Например, при обрыве – получении приближенного числа путем отбрасывания цифр в его точном изображении, начиная с некоторого разряда. Кроме обрыва, существуют другие способы округления чисел, из которых наиболее употребительны следующие: 1) если за последней сохраняемой цифрой следуют цифры 0, 1, 2, 3 и 4, то никаких изменений в приближенное значение не вносится (округление с недостатком); 2) если за последней сохраняемой цифрой следуют цифры 9, 8, 7, 6 или 5, то к ней прибавляется единица (округление с избытком); 3) если за последней сохраняется лишь цифра 5 или цифра 5, за которой все цифры нули, и если последняя сохраняемая цифра имеет четное значение, то осуществляется округление с недостатком и в противном случае – округление с избытком. При округлении приближенное значение a числа z всегда не превосходит z и может быть больше или меньше, чем z . Если a – приближенное значение, полученное при округлении с недостатком или избытком с r десятичными разрядами после запятой, то ошибка округления $|a^r - z| \leq 0,5 \cdot 10^{-r}$. Цифры в записи приближенного значения a числа z называются верными цифрами. Если не превышает половины единицы разряда последней цифры числа a , то запись приближенного значения, полученная путем отбрасывания и округления, состоит только из верных цифр. Ранее указанные правила обеспечивают ошибку, не превосходящую по абсолютной величине половины единицы разряда последней сохраняемой цифры. К значащим цифрам относятся все цифры, кроме нулей слева. При записи приближенных чисел следует писать только верные значащие цифры, если a – погрешность числа не указывается каким-либо другим способом.

Если a обозначает приближенное значение числа z , то $a - z$ принято называть истинной погрешностью, $(a - z) / z$ – истинной относительной погрешностью. В большинстве случаев неизвестны эти истинные погрешности. Напротив, можно часто указать граничную их величину, т. е. Δa , называемую предельной абсолютной погрешностью, равную $\Delta a \geq a - z$ или $a - \Delta a \leq z \leq a + \Delta a$. Тогда $\delta a = \Delta a / a$ называется относительной погрешностью и обычно указывается в %.

Согласно работам [Ситников, 2010; Бронштейн, Семендяев, 1981], для сравнительно

простых функций можно предугадать результирующую абсолютную погрешность, если известны предельные абсолютные погрешности переменных:

$$1) f(x_1, x_2) = x_1 + x_2;$$

$$\Delta(a_1 + a_2) = \Delta a_1 + \Delta a_2;$$

$$2) f(x_1, x_2) = x_1 - x_2;$$

$$\Delta(a_1 - a_2) = \Delta a_1 - \Delta a_2;$$

$$3) f(x_1, x_2) = x_1 \cdot x_2;$$

$$\Delta(a_1 \cdot a_2) = \Delta a_1 \cdot [a_2] + \Delta a_2 [a_1];$$

$$4) f(x_1, x_2) = \frac{x_1}{x_2};$$

$$\Delta\left(\frac{a_1}{a_2}\right) = \Delta a_1 \frac{1}{[a_2]} + \Delta a_2 \left[\frac{a_1}{a_2^2}\right].$$

Если результаты измерений используются в каких-либо расчетах, то следует руководствоваться правилом, согласно которому точность результата ограничена наименее точным из результатов измерения. При умножении или делении численный результат должен включать не больше значащих цифр, чем результат измерений с наименьшим количеством значащих цифр. Если результат расчета содержит больше значащих цифр, то его следует округлить. Однако при сложении или вычитании следует применять иное правило. Результат этих действий должен включать столько знаков после десятичной запятой, сколько их содержится в числе с наименьшим количеством знаков после десятичной запятой.

Очень важно выполнить предварительный анализ размерностей, которые для всех членов исходных уравнений должны быть одинаковы.

В заключение, учитывая важность числа значащих цифр в записях результатов измерений, напомним некоторое правило [Бронштейн, Семендяев, 1981; Ситников, 2010]: все не нулевые цифры являются значащими; нули, стоящие между ненулевыми цифрами, являются значащими; нули, стоящие слева от первой не нулевой цифры результата, не относятся к значащим цифрам, они указывают положение десятичной запятой; если число заканчивается нулями, стоящими справа от десятичной запятой, то они относятся к значащим цифрам; если число закан-

чивается нулями, но они не стоят справа от десятичной запятой, то они относятся к значащим цифрам. Последняя запись численных величин в степенной форме позволяет избежать неясностей относительно того, являются ли нули в конце числа значащими цифрами. Например, массу в 10300 г можно записать в степенной форме, указав три, четыре или пять значащих цифр: $1,0300 \cdot 10^4$ – пять значащих цифр; $1,030 \cdot 10^4$ – четыре; $1,03 \cdot 10^4$ – три значащие цифры. В этих числах все нули справа от десятичной запятой являются значащими.

Несомненно, изложенные правила пригодны для реализации ручным способом применяемых нами простых математических вычислительных операций с учетом оценки предельной абсолютной погрешности. Хотя в работе [Бронштейн, Семендяев, 1981] указаны правила вычислений (алгоритмы) более сложных функциональных зависимостей, в том числе с помощью аналоговых и цифровых вычислительных машин. Отметим, что сложные функции, например тригонометрические, логарифмические с требуемой точностью, можно заменить более простыми приближенными формулами с требуемой точностью [Бронштейн, Семендяев, 1981]. Нами для учета предельных погрешностей результатов расчетов предлагается воспользоваться предельными абсолютными погрешностями исходных параметров, обеспечивающих предельные абсолютные погрешности результирующих расчетов с последующим округлением цифровых значений по общим правилам. В частности, если исходная для расчета площадь Восточного бассейна составляет приблизительно $1160000 \pm 100 \text{ м}^2$, то предлагается для расчета применять значения $1159900 \div 1160100 \text{ м}^2$, которые обеспечат результирующее значение с предельно возможной относительной точностью:

$$\delta a = \frac{\Delta a}{a} = \frac{100}{1159900} \cdot 100 = 0,008621\%$$

$$\text{или } \frac{100}{1160100} \cdot 100 = 0,008620\%,$$

$$\text{при точном значении } 1160000 \text{ м}^2 \\ \delta a = \frac{100}{1160000} \cdot 100 = 0,0086206\%.$$

Расчеты испарения рапы Восточного бассейна предлагается выполнять согласно таким общепринятым уравнениям [Ситников, 2016а, б]:

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}}|_{T^{\text{с}}} \cdot V_{\text{исп}}^{\text{мес}} = (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{p|T^{\text{с}}} \cdot V_{\text{рапа}}^{\text{т}} - (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{p|T^{\text{с}}} \cdot V_{\text{рапа}}^{\text{т}+1} + (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{p|T^{\text{с}}}^0 \cdot V_{\text{морс}} + (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{p|T^{\text{с}}} \times \\ \times V_{\text{пресн}} + \rho_{\text{H}_2\text{O}}|_{T^{\text{с}}} \cdot V_{\text{осад}} + (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{p|T^{\text{с}}} \cdot V_{\text{гр}} - (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{p|T^{\text{с}}} \cdot V_{\text{бальн}}; \quad (1)$$

$$V_{\text{исп}}^{\text{мес}} = V_{\text{рапа}}^{\tau} - V_{\text{рапа}}^{\tau+1} + V_{\text{морс}} + V_{\text{пресн}} + V_{\text{осад}} + V_{\text{гр}} - V_{\text{бальн}}; \quad (2)$$

$$\sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{р}} \cdot V_{\text{рапа}}^{\tau+1} = \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{р}} \cdot V_{\text{рапа}}^{\tau} + \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{р}} \cdot V_{\text{морс}} + \\ + \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{р}} \cdot V_{\text{пресн}} + \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{р}} \cdot V_{\text{гр}} - \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{р}} V_{\text{бальн}}; \quad (3)$$

$$(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{р}|_{\text{T}^{\circ}\text{C}}} = \rho_{\text{H}_2\text{O}|_{\text{T}^{\circ}\text{C}}} - [\sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{р}}]_{\text{п}}, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{H}_2\text{O}|_{\text{T}^{\circ}\text{C}}}$ – табличная плотность воды при $T^{\circ}\text{C}$, $\text{кг}/\text{м}^3$; $(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{р}|_{\text{T}^{\circ}\text{C}}}$ – масса (плотность) воды в жидком водном растворе соответствующего происхождения с учетом температуры изменения плотности воды, $\text{кг}/\text{дм}^3$; $V_{\text{рапа}}^{\tau}$, $V_{\text{рапа}}^{\tau+1}$ – объемы рапы, равные объему Восточного водоема соответственно на дату опробования, увязанные с абсолютной отметкой уровня, м^3 ; $V_{\text{морс}}$, $V_{\text{пресн}}$, $V_{\text{осад}}$, $V_{\text{гр}}$, $V_{\text{бальн}}$, $V_{\text{исп}}^{\text{мес}}$ – месячное пополнение бассейна морской, пресной водой, жидкими атмосферными осадками, грунтовыми водами, отбор рапы на бальнеологию, физическое испарение с поверхности водоема, $\text{м}^3/\text{мес.}$; V_i^{**} , V_i^* – объемы возможного водопоступления и отбора рапы, приведенные к расчетному интервалу $\tau^{\tau+1} - \tau^{\tau}$, $\text{м}^3/\text{мес.}$; $\sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{р}}$ – концентрация массы всех растворенных «к»-х веществ (плотностей), за исключением воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{р}}^0$ – плотность закачиваемой морской воды, равная около $18,1 \text{ кг}/\text{м}^3$. От ранее отмеченных уравнений [Ситников, 2016а] баланса объемов рапы уравнение (2) и баланса масс воды уравнение (1) отличаются членом $V_{\text{пресн}}$ (периодически подаваемой пресной воды).

Также для расчета испарения предложена эмпирико-аналитическая формула:

$$\rho_{\text{п}} \cdot \vartheta_{\text{п}} = - \frac{k_{\text{п}}}{\ell - \ell_0} \left(p_{\text{п}|_{\ell, \text{T}^{\circ}\text{C}}} - p_{\text{экв}|_{\ell_0, \text{T}^{\circ}\text{C}}} \right); \quad \ell - \ell_0 = \frac{\rho_{\text{к}} \cdot \vartheta_{\text{п}}}{(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{р}|_{\text{T}^{\circ}\text{C}}} \cdot V_{\text{исп}}^{\text{мес}}};$$

$$k_{\text{п}} = \frac{(D_{\text{п}})_0 \cdot \left(\frac{T}{273,15} \right)^{2,072} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}}{RT}; \quad p_{\text{п}|_{\ell, \text{T}^{\circ}\text{C}}} = p_{\text{п}|_{\ell, \text{T}^{\circ}\text{C}}}^0 \cdot (\varphi_{\text{п}})_{\text{возд}|_{\ell, \text{T}^{\circ}\text{C}}};$$

$$p_{\text{экв}|_{\ell_0, \text{T}^{\circ}\text{C}}} = p_{\text{п}|_{\ell_0, \text{T}^{\circ}\text{C}}}^0 \cdot \chi_{\text{H}_2\text{O}};$$

$$(\varphi_{\text{п}})_{\text{возд}|_{\ell_0, \text{T}^{\circ}\text{C}}} = \chi_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{р}|_{\ell_0, \text{T}^{\circ}\text{C}}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{р}|_{\ell_0, \text{T}^{\circ}\text{C}}} + \sum_{\text{к}}^{N-1} \frac{(\rho_{\text{к}})_{\text{р}|_{\ell_0, \text{T}^{\circ}\text{C}}}}{M_{\text{к}}}};$$

$$V_{\text{исп}}^{\text{мес}} = -k_{\text{п}} \frac{\left(p_{\text{п}|_{\ell, \text{T}^{\circ}\text{C}}} - p_{\text{экв}|_{\ell_0, \text{T}^{\circ}\text{C}}} \right)}{(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{р}|_{\text{T}^{\circ}\text{C}}} \cdot (\ell - \ell_0)}; \quad (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{р}|_{\ell_0, \text{T}^{\circ}\text{C}}} = \frac{(\rho_{\text{H}_2\text{O}})^{\tau} + (\rho_{\text{H}_2\text{O}})^{\tau+1}}{2};$$

$$(\rho_{\text{к}})_{\text{р}|_{\ell_0, \text{T}^{\circ}\text{C}}} = \frac{(\rho_{\text{к}})_{\text{р}}^{\tau} + (\rho_{\text{к}})_{\text{р}}^{\tau+1}}{2}; \quad \sum_{\text{к}}^{N-1} \frac{(\rho_{\text{к}})_{\text{р}}}{M_{\text{к}}} = \frac{\sum_{\text{к}}^{N-1} \frac{(\rho_{\text{к}})_{\text{р}}^0}{M_{\text{к}}} \cdot \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{р}}}{\sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{р}}^0}; \quad V_{\text{исп}}^{\text{мес}} = \frac{\rho_{\text{п}} \cdot \vartheta_{\text{п}}}{(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{р}|_{\text{T}^{\circ}\text{C}}}},$$

где $\rho_{\text{п}}$ – плотность парообразной влаги, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\vartheta_{\text{п}}$ – скорость парообразной влаги, $\text{м}/\text{сут}$; $k_{\text{п}}$ – коэффициент переноса, с ; $D_{\text{п}}$ – коэффициент диффузии парообразной влаги, $\text{м}^2/\text{с}$; T – абсолютная температура, К ; $M_{\text{H}_2\text{O}}$ – молярная масса воды, равная $0,018 \text{ кг}/\text{моль}$; R – газовая постоянная, равная $8,3144 \text{ Дж}/\text{моль} \cdot \text{К}$; $M_{\text{к}}$ – молярная масса растворенного «к»-вещества, $\text{кг}/\text{моль}$; $p_{\text{п}|_{\ell, \text{T}^{\circ}\text{C}}}$ – давление парообразной влаги на высоте (ℓ), Па ; $p_{\text{п}|_{\ell, \text{T}^{\circ}\text{C}}}^0$, $p_{\text{п}|_{\ell_0, \text{T}^{\circ}\text{C}}}^0$ – табличные значения давления насыщенной парообразной влаги ($\varphi_{\text{п}} = 100\%$) с учетом температуры, соответствующие определенной высоте от поверхности водоема (ℓ) и непосредственно вблизи него (ℓ_0), Па ; $p_{\text{экв}|_{\ell_0, \text{T}^{\circ}\text{C}}}$ – так называемое приведенное эквивалентное давление непосредственно у поверхности водоема (ℓ_0), Па ; $(\varphi_{\text{п}})_{\text{возд}}$ – относительная влажность воздуха, % или доли от единицы; $(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{р}}$, $(\rho_{\text{к}})_{\text{р}}$ – средне-месячные значения плотностей воды и растворенных солей в рапе, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\chi_{\text{H}_2\text{O}}$ – молярная доля

воды в водном растворе, равная относительной влажности соприкасающегося воздуха, %, доли;
 $(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{p}}^{\tau}$, $(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{p}}^{\tau+1}$ – плотности воды в рапе на моменты времени τ и $\tau + 1$, кг/м³; $(\rho_{\text{к}})_{\text{p}}^{\tau}|_{t_0, T^{\circ}\text{C}}$,
 $(\rho_{\text{к}})_{\text{p}}^{\tau+1}|_{t_0, T^{\circ}\text{C}}$ – плотности растворенных веществ на моменты времени τ и $\tau + 1$, кг/м³; $\sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{p}}^0$,
 $\sum_{\text{к}}^{N-1} \frac{(\rho_{\text{к}})_{\text{p}}^0}{M_{\text{к}}}$ – постоянные плотности растворенных веществ и их молярность в морской воде, кг/м³,
 моль/м³; $\sum_{\text{к}}^{N-1} \frac{(\rho_{\text{к}})_{\text{p}}}{M_{\text{к}}}$ – молярность растворенных «к»-веществ в рапе, моль/м³.

В качестве исходных данных использованы ежемесячные фактические данные гидрометеопоста для трех типовых по водности годов (2014 г. – засушливого, 2007 г. – среднего, 2010 г. – многоводного). Это с учетом дат отбора в сутках вначале каждого месяца года значений дополнительно закаченных объемов морской и пресной воды, отбора рапы на бальнеологию, среднемесячных фактических значений концентраций рапы и абсолютных отметок уровня водоема, отвечающих определенным объемам рапы. Известны также определенные расчетным путем притоки грунтовых вод с максимальной минерализацией 10–13 кг/м³. Кроме указанного, известно, что оптимальный благоприятный уровень –1,05 абс. м минимально допустимый для проходки баржи –1,20 абс. м при глубине водоема до природного дна 0,40 м. Дно водоема неравномерно, на участке выработки имеются котловины глубиной более 2 м относительно естественного природного дна (–1,7517 абс. м). Площадь Восточного бассейна $S_{\text{бас}} = 1\,160\,000 \text{ м}^2$, но требует уточнений, возможно окажется $1\,270\,000 \text{ м}^2$.

Обращаем внимание, что фактически замеренные и рассчитанные значения являются, строго говоря, приближенными числами и представлены нами согласно правилам округлений. Поэтому можно определить их приближенный характер, оценив количество значащих цифр, а также предельно возможные абсолютные и относительные погрешности. Так, значения объемов закаченных вод и отбора на бальнеологию, по сути, определены с точностью 100 м^3 , т. е. $\pm 0,1 \text{ тыс. м}^3$. Площадь бассейна можно считать равной $1\,160\,000 \pm 100 \text{ м}^2$, измеренный объем рапы, по-видимому, с точностью $\pm 200 \text{ м}^3$. Обратим внимание, что дата опробования позволяет оценить интервал расчетного времени $\tau^{\tau+1} - \tau^{\tau}$, который, судя по ежемесячным значениям, изменяется от 24 до 34 суток, частично охватывая следующий месяц. По сути можно применить два способа приведения: первый способ

$V_i^* = \frac{V_i}{30(31)} (\tau^{\tau+1} - \tau^{\tau})$ учитывает только расчетный месяц, второй V_i^{**} учитывает нехватку нескольких суток расчетного месяца, а также несколько дней следующего месяца с особенностями его атмосферных осадков.

Размерность определяемого испарения рекомендуется принять как м³/мес., а также как $\frac{\text{м водян. сл.}}{\text{мес.}} = \frac{V_{\text{исп}}^{\text{мес.}}}{S_{\text{бас}}}$.

Наиболее достоверным является уравнение (1) баланса массы воды в рапе, подтвержденное детерминированным всеобщим законом сохранения массы. Уравнение (4) практически пригодно для оценки плотности воды, не является точным, так как теоретически не доказана связь с минерализацией растворенных солей, особенно в водных рассолах. Уравнение (2) баланса объемов воды при постоянстве плотности воды, равной 1000 кг/м^3 , по сути соответствующей температуре $3,98^{\circ}\text{C}$, вычисляется менее трудоемко, наглядно из-за меньшего количества вычислений, меньше склонно к появлению случайных ошибок, особенно при ручном счете. Уравнение (3) вообще в прямом виде не содержит определяемого испарения, но весьма перспективно для надежного контроля за влиянием минерализации рапы. Предлагается в основу расчетов испарения взять уравнение (1), приняв за истинные исходные параметры, фактически измеренные при значении площади рапы $S_{\text{бас}} = 1\,160\,000 \text{ м}^2$, средней за расчетный месяц минерализации отбираемого объема на бальнеологию, объем притока грунтовых вод, а также помесечные атмосферные осадки, температуры воздуха и рапы.

Теперь систематизируем возможные ошибки расчета значений испарения из рапы, сравнив их (в %) с принятыми за условно точные. Эти погрешности следующие: погрешности уравнения (2) за счет неучета плотностей воды в рапе, т. е. постоянства плотностей, равных 1000 кг/м^3

и сокращенных в уравнении (2); за счет учета площади бассейна с погрешностью $\pm 100 \text{ м}^2$; за счет погрешности объемов рапы $\pm 200 \text{ м}^3$; за счет приведения к расчетному интервалу времени $\tau^{\tau+1} - \tau^{\tau}$, т. е. V_i^* и V_i^{**} ; за счет усреднения ежемесячных показателей гидрометеопоста и возможного изменения по сравнению с многолетними среднемесячными значениями; за счет учета максимально возможной минерализации отбираемой воды на бальнеологию $\sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})^{\tau+1}$

вместо $\frac{\sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})^{\tau+1} + \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})^{\tau}}{2}$, за счет изменения минерализации подаваемой морской воды и ее молярности; за счет отсутствия притока грунтовых вод; за счет минерализации закаченной пресной воды; за счет усреднения минерализации рапы по площади бассейна и по компетентному объему рапы, т. е. по глубине.

Особенности расчетных вычислений покажем на примере июня и июля 2007 г.

Итак, в июне (30 суток):

$$\tau^{\tau+1} - \tau^{\tau} = 04.06 \div 2.07 = 29 \text{ суток}; S_{\text{бас}} = 1160000 \text{ м}^2; \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_p^0 = 18,1 \text{ кг/м}^3;$$

$$\sum_{\text{к}}^{N-1} \frac{(\rho_{\text{к}})_p^0}{M_{\text{к}}} = 606,87 \text{ моль/м}^3; T_{\text{возд}} = 23,1 \text{ }^{\circ}\text{C} = 296,25 \text{ К}; T_{\text{рапы}} = 24,6 \text{ }^{\circ}\text{C} = 297,75 \text{ К};$$

$$T_{\text{гр}} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_{\text{рапы}} = T_{\text{бальн}} = T_{\text{пресн}} = T_{\text{морск}}; (\varphi_{\text{п}})_{\text{возд}} = 57\%;$$

$$\sum_{\text{к}}^{N-1} [(\rho_{\text{к}})_p]_{\text{ср}} = \frac{161,25 + 150,1}{2} = 155,68 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}}|_{23,1 \text{ }^{\circ}\text{C}} = 997,51 \text{ кг/м}^3; \rho_{\text{H}_2\text{O}}|_{24,6 \text{ }^{\circ}\text{C}} = 997,38 \text{ кг/м}^3; \rho_{\text{H}_2\text{O}}|_{15 \text{ }^{\circ}\text{C}} = 999,10 \text{ кг/м}^3;$$

$$V_{\text{рапа}}^{\tau+1} = 826000 \text{ м}^3/\text{мес.} (-1,04 \text{ абс. м}); (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p|_{T_{24,6 \text{ }^{\circ}\text{C}}} = 836,13 \text{ кг/м}^3; \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})^{\tau+1} = 161,25 \text{ кг/м}^3;$$

$$\sum_{\text{к}}^{N-1} \frac{(\rho_{\text{к}})_p^{\tau+1}}{M_{\text{к}}} = 5465,51 \text{ моль/м}^3;$$

$$V_{\text{рапа}}^{\tau} = 914400 \text{ м}^3/\text{мес.}, (-0,94 \text{ абс. м}); (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p|_{T_{24,6 \text{ }^{\circ}\text{C}}} = 847,28 \text{ кг/м}^3; \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})^{\tau} = 150,10 \text{ кг/м}^3;$$

$$\sum_{\text{к}}^{N-1} \frac{(\rho_{\text{к}})_p^{\tau}}{M_{\text{к}}} = 5032,66 \text{ моль/м}^3;$$

$$V_{\text{морск}} = 0 \text{ м}^3/\text{мес.};$$

$$V_{\text{пресн}} = 1000 \text{ м}^3/\text{мес.};$$

$$(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p|_{24,6 \text{ }^{\circ}\text{C}} = 993,88 \text{ кг/м}^3; \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_p = 3,5 \text{ кг/м}^3;$$

$$V_{\text{пресн}}^* = \frac{10000}{30} \cdot 29 = 9666,7 \text{ м}^3/\text{мес.};$$

$$V_{\text{осад}} = 0,0013 \text{ м водян. сл./мес.} \cdot 1160000 = 1508 \text{ м}^3; \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_p = 0; \rho_{\text{H}_2\text{O}}|_{23,1 \text{ }^{\circ}\text{C}} = 97,51 \text{ кг/м}^3;$$

$$V_{\text{осад}}^* = \frac{1508}{30} \cdot 29 = 1508 (1457,7) \text{ м}^3/\text{мес.}; V_{\text{осад}}^{**} = \frac{1508}{30} \cdot 29 = 1462,31 \text{ м}^3/\text{мес.};$$

$$V_{\text{гр}} = 2652 \text{ м}^3; (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p|_{15 \text{ }^{\circ}\text{C}} = 986,10 \text{ кг/м}^3; \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_p = 13 \text{ кг/м}^3; V_{\text{гр}}^* = \frac{2652}{30} \cdot 29 = 2564,60 \text{ м}^3/\text{мес.};$$

$$V_{\text{гр}}^{**} = 2560,75 \text{ м}^3/\text{мес.};$$

$$V_{\text{бальн}} = 1500 \text{ м}^3/\text{мес.} (\text{при } \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_p = 155,68 \text{ кг/м}^3); (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p|_{24,6 \text{ }^{\circ}\text{C}} = 836,13 (\text{при } \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_p = 161,25 \text{ кг/м}^3);$$

$$V_{\text{бальн}}^* = 1500 \text{ м}^3/\text{мес.}; V_{\text{бальн}}^{**} = 1454 \text{ м}^3/\text{мес.}$$

Достоверное значение величины испарения за июнь вычисляем по уравнению (1) с достоверными значениями $S_{\text{бас}} = 1160000 \text{ м}^2$, $[\sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_p]_{\text{бальн}} = 155,68 \text{ кг/м}^3$:

$$\begin{aligned} 997,51 V_{\text{исп}}^{\text{июнь}} &= 847,28 \cdot 914400 - 836,13 \cdot 826000 + 993,88 \cdot 10000 (9333,3) + \\ &+ 997,51 \cdot 1508 (1462,31) + 986,1 \cdot 2652 (2560,75) - 841,70 \cdot 1500 (1454) = \\ &= 774752832 - 690643380 + 9938800 (9276180,2) + 1504245,08 (1458668,85) + \\ &+ 2615137,2 (2525155,58) - 1262550 (1224638,83) = 84109452 + \dots = \\ &= 96905084,28 (96144817,80) \text{ кг/мес.} \end{aligned}$$

$$V_{\text{исп}}^{\text{июнь}} = 97146,98 (9638482) \text{ м}^3/\text{мес.}; \frac{V_{\text{исп}}^{\text{июнь}}}{S_{\text{бас}}} = 0,0837 (0,0830) \text{ м водян. сл./мес.},$$

где второй способ учета приведения к расчетному времени $\tau^{\tau+1} - \tau^{\tau}$, при этом значение V^* без учета суток в июне оказывает меньше влияния.

Расчет по уравнению (2) дает:

$$V_{\text{исп}}^{\text{июнь}} = 914400 - 826000 + 10000 (9333,3) + 1508 (1462,31) + 2652 (2560,75) - 1500 (1454,84) = 88400 + \dots = 101060 (100301,52) \text{ м}^3/\text{мес.};$$

$$\frac{V_{\text{исп}}^{\text{июнь}}}{S_{\text{бас}}} = 0,0871(0,0864) \text{ м водян. сл./мес.};$$

$$\frac{0,083090}{0,0864668} \cdot 100 = 96,095\%; \quad \frac{0,083747}{0,0871207} \cdot 100 = 96,128\%.$$

Приведем пример расчета по эмпирико-аналитической формуле:

$$K_{\Pi} = \frac{0,205 \cdot 10^{-4}}{8,3144} \left(\frac{296,22}{273,15} \right)^{2,072} \cdot \frac{18 \cdot 10^{-3}}{296,22} = 1,77178 \cdot 10^{-10} \text{ с} = 0,4439 \cdot 10^{-3} \text{ мес.};$$

$$\chi_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{46761,39}{51980,97} = 0,89958; \quad p_{\Pi|_{\ell, 23,1^\circ\text{C}}} = 0,57 \cdot 2825,3 = 1610,42 \text{ Па};$$

$$p_{\Pi|_{\ell, 23,1^\circ\text{C}}}^0 = 2825,3 \text{ Па}; \quad p_{\Pi|_{\ell_0, 24,6^\circ\text{C}}}^0 = 3092 \text{ Па};$$

$$p_{\text{экв}|_{\ell_0, 24,6^\circ\text{C}}} = 3092,1 \cdot 0,89958 = 2781,61 \text{ Па};$$

$$\rho_{\Pi} \cdot \vartheta_{\Pi} = -0,4439384 \frac{1610,42 - 2781,61}{\ell - \ell_0} = \frac{519,94 \cdot 10^{-3}}{\ell - \ell_0} \text{ кг/м} \cdot \text{мес.};$$

$$\ell - \ell_0 = \frac{519 \cdot 10^{-3}}{996,86 \cdot 0,16059826} = 0,0032418458 \approx 0,0032 \text{ м}.$$

Теперь воспользуемся уравнением (3), рассмотрев $V_{\text{рапа}}^{\tau+1} = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} (\rho_k)^{\tau}}{\sum_{k=1}^{N-1} (\rho_k)^{\tau+1}} \cdot V_{\text{рапа}}^{\tau}$. Так, для июня 2007 г. получим $V_{\text{рапа}}^{\text{июнь}} = \frac{150,1}{161,25} \cdot 914400 = 851171,7 \text{ м}^3$, что указывает на уменьшение объема рапы за расчетный интервал времени на $914400 - 851171,72 = 63228,28 \text{ м}^3$. Последнее значение, увеличенное за счет расчетного объема грунтовых вод на 2652 м^3 и деленное на $S_{\text{бас}}$, равную 1160000 м^2 ($\frac{63228,28 + 2652}{1160000} = 0,05679$), составит уход влаги, по-видимому $0,057 \text{ м водян. сл./мес.}$, за счет физического испарения. То же, выполнив за июль этого года $V_{\text{исп}}^{\text{июль}} = \frac{161,25}{192,01} \cdot 826000 = 693674,80 \text{ м}^3$; рассчитав разницу с учетом грунтовых вод $826000 - 693674,80 + 2652$ и разделив на 1160000 , получим $\frac{V_{\text{исп}}^{\text{июль}}}{S_{\text{бас}}} = 0,1163 \text{ м водян. сл./мес.}$

Повторим особенности вычислений на примере июля 2007 г.

Итак, в июле 2007 г. (31 сутки):

$$\sum_{k=1}^{N-1} \frac{(\rho_k)_p^0}{M_k} = 606,87 \text{ моль/м}^3; \quad T_{\text{возд}} = 25,7^\circ\text{C} = 298,85 \text{ К}; \quad T_{\text{рапы}} = 26,8^\circ\text{C} = 299,95 \text{ К}; \quad T_{\text{гр}} = 15^\circ\text{C};$$

$$\sum_{k=1}^{N-1} [(\rho_k)_p]_{\text{ср}} = 176,63 \text{ кг/м}^3; \quad \sum_{k=1}^{N-1} \left[\frac{(\rho_k)_p}{M_k} \right]_{\text{ср}} = 5928,18 \text{ м}^3; \quad (\varphi_{\Pi})_{\text{возд}} = 54\%;$$

$$(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{p|_{T, 25,7^\circ\text{C}}} = 996,86 \text{ кг/м}^3; \quad (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{p|_{26,8^\circ\text{C}}} = 996,56 \text{ кг/м}^3; \quad (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{p|_{15^\circ\text{C}}} = 999,10 \text{ кг/м}^3;$$

$$V_{\text{рапа}}^{\tau} = 826000 \text{ м}^3 (-1,04 \text{ абс. м}); \quad \sum_{k=1}^{N-1} (\rho_i)_p = 161,25 \text{ кг/м}^3; \quad \sum_{k=1}^{N-1} \frac{(\rho_k)_p}{M_k} = 5406,51 \text{ моль/м}^3;$$

$$(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{p|_{26,8^\circ\text{C}}} = 835,31 \text{ кг/м}^3;$$

$$V_{\text{рапа}}^{\tau+1} = 721600 \text{ м}^3 (-1,13 \text{ абс. м}); \quad \sum_{k=1}^{N-1} (\rho_i)_p = 191,01 \text{ кг/м}^3; \quad \sum_{k=1}^{N-1} \frac{(\rho_k)_p}{M_k} = 6437,85 \text{ моль/м}^3;$$

$$\begin{aligned}
 (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{p_{126,8^\circ\text{C}}} &= 804,55 \text{ кг/м}^3; V_{\text{морс}} = 60500 \text{ м}^3; \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_p^0 = 18,10 \text{ кг/м}^3; (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{p_{126,8^\circ\text{C}}} = \\
 &= 978,46 \text{ кг/м}^3; \\
 V_{\text{морс}}^* &= \frac{60500}{31} \cdot 30 = 58548,30 \text{ м}^3; \\
 V_{\text{пресн}} &= 16000 \text{ м}^3; \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_p = 3,5 \text{ кг/м}^3; (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{p_{126,3^\circ\text{C}}} = 993,06 \text{ кг/м}^3; \\
 V_{\text{пресн}}^* &= \frac{16000}{31} \cdot 30 = 15483,87 \text{ м}^3; \\
 V_{\text{осад}} &= 0 \text{ м}^3; \\
 V_{\text{гр}} &= 2652 \text{ м}^3; \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_p = 13 \text{ кг/м}^3; (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{p_{10^\circ\text{C}}} = 986,1 \text{ кг/м}^3; V_{\text{гр}}^* = \frac{2652}{31} \cdot 30 = 2566,45 \text{ м}^3; \\
 V_{\text{бальн}} &= 1700 \text{ м}^3; \sum_{\text{к}}^{N-1} [(\rho_{\text{к}})_p]_{\text{ср}} = 176,63 \text{ кг/м}^3; V_{\text{бальн}}^* = \frac{1700}{31} \cdot 30 = 1645,16 \text{ м}^3; \\
 V_{\text{исп}}^{\text{июль}} &= (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{p_{126,8^\circ\text{C}}} = 996,86 \text{ кг/м}^3;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 996,86 V_{\text{исп}}^{\text{июль}} &= 835,31 \cdot 826000 - 804,55 \cdot 721600 + 978,46 \cdot 60500 (58548,39) + \\
 &+ 993,06 \cdot 16000 (15483,87) + 2652 (2566,45) - 819,93 \cdot 1700 (1645,16) = \\
 &= 689966060 - 5800563280 + 59196830 (57287257,68) + 15888960 (1537411,94) + \\
 &+ 2615137,2 (2530776,35) - 1353881 (1348916,04) = 109402780 + \dots = \\
 &= 185709826,2 (183248309,9) \text{ кг/мес.};
 \end{aligned}$$

$$V_{\text{исп}}^{\text{июль}} = 186294,79 (183825,52) \text{ м}^3/\text{мес.}; \frac{V_{\text{исп}}^{\text{июль}}}{S_{\text{бас}}} = 0,1605 (0,1584) \text{ м водян. сл./мес.};$$

$$\begin{aligned}
 V_{\text{исп}}^{\text{июль}} &= 826000 - 721600 + 60500 (58548,31) + 16000 (15483,87) + 2652 (2566,45) - \\
 &- 1700 (1645,16) = 104400 + \dots = 181852 (179353,65) \text{ м}^3/\text{мес.}
 \end{aligned}$$

$$\frac{V_{\text{исп}}^{\text{июль}}}{S_{\text{бас}}} = 0,1567 (1546152) \text{ м водян. сл./мес.}$$

Числа в скобках указывают на объемы V^* .

Также был выполнен расчет для июля 2007 г. по эмпирико-аналитической формуле:

$$K_{\text{п}} = \frac{0,205 \cdot 10^{-4}}{8,3144} \left(\frac{298,85}{273,15} \right)^{2,072} \cdot \frac{18 \cdot 10^{-3}}{298,85} = 1,789 \text{ с} = 0,444 \cdot 10^{-3} \text{ мес.};$$

$$p_{\text{п}}|_{t,25,7^\circ\text{C}} = 0,54 \cdot 3301,4 = 1782,76 \text{ Па};$$

$$p_{\text{экв}}|_{t,026,8^\circ\text{C}} = 0,8849 \cdot 3543,7 = 3135,99 \text{ Па};$$

$$\chi_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{819,93/18 \cdot 10^{-3}}{819,33 + 5922,18} = \frac{45551,67}{51473,85} = 0,8849477 \text{ Па};$$

$$\rho_{\text{п}} \cdot \vartheta_{\text{п}} = - \frac{0,46376 (178281 - 3135,99)}{\ell - \ell_0} = \frac{627,55}{\ell - \ell_0} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2/\text{мес.}};$$

$$\ell - \ell_0 = \frac{627,55 \cdot 10^{-3}}{996,86 \cdot 0,157625} = 0,003993825 \approx 0,0040 \text{ м}.$$

Отметим, что подобным образом выполнены расчеты для других месяцев 2007, 2010, 2014 гг. Основные результаты сведены в таблице с указанием полученных значений испарения с рапы.

Помесячные значения испарения рапы Восточного бассейна

Год, месяц	Испарение, м водян. сл./мес.				$\ell - \ell_0$, м	Год, месяц	Испарение, м водян. сл./мес.				$\ell - \ell_0$, м
	Уравнение (1)	Уравнение (2)	Уравнение (3)	V''			Уравнение (1)	Уравнение (2)	Уравнение (3)	V''	
2007						2014					
январь	0,066	0,0660	0,0959	0,0660	0	июль	0,3311	0,3247	0,3667	0,355	0,0018
февраль	0,0052	0,0028	0,0228	0,0062	-	август	-	0,278	0,2547	0,024	-
март	-	0,0055	0,0194	0,0071	-	сентябрь	-	0,1081	0,1481	0,1037	-
апрель	0,0735	0,0773	0,0705	0,0761	0,0028	октябрь	-	0,0023	0,0509	0,0023	-
май	-	0,1190	0,1183	0,1940	-	ноябрь	-	0,0158	0,0022	0,0161	-
июнь	0,0837	0,0871	0,0654	0,0865	0,0032	декабрь	-	0,0656	-	0,0656	-
июль	0,1606	0,1568	0,1808	0,1585	0,0040	2010					
август	-	0,1776	0,1882	0,1866	-	январь	-	0,058	0,0797	0,0654	0,0045
сентябрь	-	0,0758	0,0916	0,0565	-	февраль	-	0,0502	0,0528	0,5020	0,006
октябрь	0,0484	0,488	0,0135	-	-	март	-	0,0055	0,0789	0,0071	-
ноябрь	-	0,0182	0,0083	0,0227	-	апрель	-	0,0773	0,1057	0,0761	-
декабрь	-	0,04756	-	0,0468	0,0937	май	-	0,1080	0,0837	0,01036	-
2014					2014	июнь	-	0,1187	0,1193	0,1056	-
январь	0,0139	0,0139	0,0282	0,0308	0,0001	июль	-	0,1153	0,1231	0,1126	-
февраль	0,0206	0,0016	0,1892	0,0311	0,00068	август	-	0,2443	0,2685	0,2378	-
март	-	0,0134	0,1440	0,0117	-	сентябрь	-	0,0431	0,0733	0,0468	-
апрель	-	0,232	0,3370	0,1249	-	октябрь	-	0,0049	0,0353	0,0049	0,0013
май	-	0,200	0,0707	0,1871	0,0007	ноябрь	-	0,0589	0,0875	0,0465	-
июнь	0,2532	0,2510	0,2606	0,2509	0,0014	декабрь	-	0,0016	-	0,0015	-

Уравнение (2) оказалось вполне пригодным для практического применения, отличаясь от решения уравнения (1) в сторону увеличения, в

частности для июля 2007 г. составляя: $\frac{0,1605}{0,1567} = 102,5\%$ и $\frac{0,1585}{0,1546} = 103,5\%$. Что касается осталь-

ных причин, то наибольшую погрешность обычно показывает второй способ приведения к расчетному времени $\tau^{t+1} - \tau^t$ с частичным учетом особенностей атмосферных осадков за несколько недостающих дней следующего месяца. Даже предполагаемое возможное изменение площади водоема с 1 160 000 до 1 270 000 м² приводит к непосредственному уменьшению

$\frac{V_{\text{исп}}^{\text{мес.}}}{S_{\text{бас}}} \text{ в } \frac{1270000}{1160000} = 1,048$ раз, т. е. изменяет досто-

верное значение до 95,4%. Другие причины, такие как увеличение минерализации отбираемой воды на бальнеологию и подаваемой морской воды, значимость объема грунтовых вод

и минерализации закачиваемой пресной воды, вообще практически незначимы. Кстати, приведенные решения для июня и июля являются наиболее типичными и могут быть проанализированы путем сравнения отдельных членов уравнения. Относительно формулы отметим, что ее погрешности оценки испарения прежде всего определяются достоверностью определения по общесбалансовым уравнениям. Для ее эффективного применения требуется увеличить количество определений, а также провести специальные эксперименты и наблюдения за состоянием приповерхностной зоны. В определенной степени остается открытым вопрос значения усреднения минерализации рапы по всему водоему и по глубине. Желательно проводить контрольные одно-временные замеры хотя бы в нескольких типовых местах. Кстати, необходимы эпизодические контрольные замеры химического состава рапы.

Теперь обратим внимание на используемое решение уравнения (3), требующее более тщательной проверки.

Для этого используем уравнение (3) следующим образом: $V_{рапа}^{\tau+1} = \frac{\sum_k^{N-1} (\rho_k)_P^{\tau+1}}{\sum_k^{N-1} (\rho_k)_P^{\tau+1}} \cdot V_{рапа}^{\tau}$, затем находим $V_{исп}^{июнь} = V_{рапа}^{\tau} - V_{рапа}^{\tau+1} + V_{морс} + V_{пресн} + V_{осад} + V_{гр} - V_{бальн}$.

В частности, для июня 2007 г.:

$$V_{рапа}^{\tau+1} = \frac{150,1}{161,25} \cdot 914400 = 851171,72 \text{ м}^3. \text{ Тогда } V_{исп}^{июнь} = 914400 - 851171,72 + 0 + 10000 + 1508 + 2652 - 1500 = 75888 \text{ м}^3/\text{мес.}, \text{ а } \frac{V_{исп}^{июнь}}{S_{бас}} = 0,0654 \text{ м водян. сл./мес.}$$

Для июля 2007 г.:

$$V_{рапа}^{\tau+1} = \frac{161,25}{192,01} \cdot 826000 = 693674,81 \text{ м}^3. \text{ Тогда } V_{исп}^{июль} = 826000 - 693674,81 + 60500 + 16000 + 2652 - 1700 = 209777,19 \text{ м}^3/\text{мес.}, \frac{V_{исп}^{июль}}{S_{бас}} = 0,1808 \text{ м водян. сл./мес.}$$

Настораживает несовпадение с расчетами по уравнению (1) за июнь $\frac{0,0837}{0,0654} \cdot 100 = 127,9\%$ и июль $\frac{0,1606}{0,1808} \cdot 100 = 88,8 \%$.

Применить уравнение (3) можно также иным способом, подставив в это уравнение фактические инструментально замеренные данные о минерализации и объемах рапы на τ и $\tau + 1$, объемах подаваемой пресной воды, морской воды и грунтовых вод, а также отбираемых на бальнеологию, при этом приняв минерализацию: пресной воды $3,5 \text{ кг/м}^3$, грунтовых вод 13 кг/м^3 , морской воды $18,1 \text{ кг/м}^3$, отбираемой на бальнеологию в июне $155,67 \text{ кг/м}^3$, а в июле $176,63 \text{ кг/м}^3$.

В частности, для июня 2007 г.:

$$150,1 \cdot 914400 - 161,25 \cdot 826000 + 3,15 \cdot 10000 + 13 \cdot 2652 - 155,67 \cdot 1500 = 137251440 - 133192500 - 164029 \text{ (кг)}.$$

$$\text{Для июля: } 161,25 \cdot 826000 - 192,01 \cdot 721600 + 3,5 \cdot 16000 + 18,1 \cdot 60500 + 13 \cdot 2652 - 176,63 \cdot 1700 = 132986000 - 138554416 + 885255 \text{ (кг)}.$$

$$\text{Затем для июня: } 137251440 - 164029 = 137087411/82600 = 165,97 \text{ кг/м}^3.$$

$$\text{Для июля: } 132986000 + 885255 = 133871255/721600 = 185,52 \text{ кг/м}^3.$$

Произведем расчет при новых значениях:

Для июня:

$$V_{рапа}^{\tau+1} = \frac{150,1}{165,97} \cdot 914400 = 826965,36 \text{ м}^3,$$

$$\text{тогда } V_{исп}^{июнь} = 914400 - 826965,36 + 0 + 10000 + 1508 + 2652 - 1500 = 100094,64 \text{ м}^3/\text{мес.}, \text{ а } \frac{V_{исп}^{июнь}}{S_{бас}} = 0,0863 \text{ м водян. сл./мес.}$$

Для июля:

$$V_{рапа}^{\tau+1} = \frac{161,25}{185,52} \cdot 826000 = 717941,46 \text{ м}^3,$$

$$\text{тогда } V_{исп}^{июль} = 826000 - 717941,46 + 60500 + 16000 + 2652 - 1700 = 185510,54 \text{ м}^3/\text{мес.}, \text{ а } \frac{V_{исп}^{июль}}{S_{бас}} = 0,1599 \text{ м водян. сл./мес.}$$

Тогда за июнь $\frac{0,0863}{0,0837} \cdot 100 = 103\%$, за июль $\frac{0,1599}{0,1606} \cdot 100 = 99,6 \%$, т. е. результаты расчетов практически пригодны для применения.

А это значит, что предложенные решения по уравнениям (3) и (1) могут быть рекомендованы для взаимного контроля результатов расчета испарения из рапы по уравнению (2).

Список литературы / References

1. **Браун Т., Лемей Г.Ю.** Химия – в центре наук. Москва: Мир, 1983. Ч. 1. 447 с.; Ч. 2. 520 с.
Braun T., Lemey H.Yu., 1983. Chemistry – in the centre of sciences. Moscow: Mir Publishing House, part 1, 447 p., part 2, 520 p. (in Russian).
2. **Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.** Справочник по математике. Лейпциг: Тойбнер; Москва: Наука, 1981. 720 с.
Bronshtein I.N., Semendiayev K.A., 1981. Mathematical Handbook. Leipzig: Teubner; Moscow: Nauka, 720 p. (in Russian).
3. **Ситников А.Б.** Вопросы миграции веществ в грунтах. Киев, 2010. 625 с.
Sitnikov A.B., 2010. Issues of substance migration in soils. Kiev, 625 p. (in Russian).
4. **Ситников А.Б.** Методика оценки испарения с поверхности рапы Восточного лечебного бассейна Сакского озера на основе баланса масс солей и объемов рассолов. *Геол. журн.* 2016а. № 3 (356). С. 104–112.
Sitnikov A.B., 2016а. The estimation technique for evaporation from the surface of brine at the eastern remedial basin of Saky Lake using the balance of salt masses and salt brine volumes. *Geologichnyy zhurnal*, № 3 (356), p. 104–112 (in Russian).
5. **Ситников А.Б.** Разработка эмпирико-аналитической формулы испарения (конденсации) воды из рапы Восточного лечебного бассейна Сакского озера. *Геол. журн.* 2016б. № 4 (357). С. 77–86.
Sitnikov A.B., 2016б. The development of empiric-analytical formula for water evaporation (condensation) from brine of the eastern remedial basin of Saky lake. *Geologichnyy zhurnal*, № 4 (357), p. 77–86 (in Russian).
6. **Чабан В.В.** Техногенное воздействие на эколого-геологическое состояние водосбора и гидроминеральные ресурсы Сакского озера: дис. ... канд. геол. наук. Симферополь, 2014. 231 с.
Chaban V.V., 2014. Technogenic impact on the ecological conditions of watershed and hydro-mineral resources for Saky Lake: diss. ... cand. geol. sci. Simferopol, 231 p. (in Russian).

Статья поступила

13.07.2016