

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ИСПАРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ РАПЫ ВОСТОЧНОГО ЛЕЧЕБНОГО БАСЕЙНА САКСКОГО ОЗЕРА НА ОСНОВЕ БАЛАНСА МАСС СОЛЕЙ И ОБЪЕМОВ РАССОЛОВ

А.Б. Ситников

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

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

Предложены и предварительно опробованы по известным исходным данным методы расчета испарения из водных рассолов Восточного лечебного бассейна Сакского озера, основанные на балансе объемов рапы, массовых содержаний растворенных солей и растворителя (воды). Рапа получается путем искусственного периодического пополнения морской водой и за счет ее природного испарения до необходимой концентрации. Результаты расчетов из-за вероятностного характера и неизвестных погрешностей используемых исходных данных не позволяют оценить достоверность предлагаемых методов. Поэтому требуется тщательный критический анализ применяемых параметров.

Ключевые слова: баланс воды и солей, жидкие водные рассолы, рапа, составляющие баланса, массовое содержание веществ, плотность, испарение.

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

A.B. Sitnikov

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.

The calculation methods for evaporation from aqueous salt brines at the Eastern remedial basin of Saky Lake based on the balance of brine volumes, weight contents of dissolved salts and solvent (water) are proposed and tested using the known initial data. Brine is formed as a result of artificial periodic refill by seawater and its natural evaporation to the certain concentration. Calculation data don't allow estimating the assurance of the proposed methods due to the probabilistic nature and unknown uncertainties of initial data. Thus the comprehensive critical analysis of implemented parameters is needed.

Key words: balance of water and salts, liquid aqueous solutions, brine, balance components, weight contents of compounds, density, evaporation.

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВИПАРОВУВАННЯ З ПОВЕРХНІ РОПИ СХІДНОГО ЛІКУВАЛЬНОГО БАСЕЙНУ САКСЬКОГО ОЗЕРА НА ОСНОВІ БАЛАНСУ МАС СОЛЕЙ ТА ОБ'ЄМІВ РОЗСОЛІВ

А.Б. Ситніков

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

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

© А.Б. Ситников, 2016

Запропоновані та попередньо опробовані за відомими вихідними даними методи розрахунку випаровування з водних розсолів Східного лікувального басейну Сакського озера, основані на балансі об'ємів ропа, масових вмістів розчинених солей і розчинника (води). Роба отримується шляхом штучного періодичного поповнення морською водою і за рахунок її природного випаровування до необхідної концентрації. Результати розрахунків через ймовірний характер і невідомі похибки уживаних вихідних даних не дозволяють оцінити достовірність запропонованих методів. Тому потрібен більш ретельний критичний аналіз застосовуваних параметрів.

Ключові слова: баланс води та солей, рідких водних розсолів, роба, складові балансу, масовий вміст речовин, щільність, випаровування.

Рапа Сакського озера – это высокоминерализованный полиминеральный рассол, формирующийся в условиях грязевого месторождения. За счет многократного концентрирования морских солей и обмена веществ с целебной грязевой толщей Сакская рапа имеет минерализацию около 200 г/дм³ и богатейший химический состав (соли натрия, магния, кальция, железа, калия, ионы йода, брома, борная кислота и другие микроэлементы, растворенные газы и органические соединения), определяющие ее косметическую и терапевтическую ценность. Рапа предназначена для приготовления лечебных ванн, ванночек, полостных орошений, ингаляций в домашних условиях (литровая бутылка рапы ценой примерно 125 грн имеется в продаже) и применения процедур прямо в озере. Рапные ванны и лиманные купания стимулируют деятельность сердца и сосудов, обменные процессы, повышают мышечный тонус, укрепляют центральную нервную систему, а также успешно применяются для лечения простудных, гинекологических и кожных заболеваний.

Восточный бассейн-водоем характеризуется переменным гидрологическим режимом и минерализацией от 96 до 250 г/дм³. Для регулирования водного баланса бассейна создана гидротехническая система, состоящая из каналов и насосных станций, позволяющая отводить излишки рапы в биологический пруд-поглотитель в осенне-зимний период и проводить закачку морской воды в летний сезон для повышения объема и снижения минерализации. Пропускная способность насоса 864 м³/ч не может обеспечить быстрого наполнения Восточного бассейна, поэтому подача морской воды осуществляется заблаговре-

менно до периода интенсивного природного испарения, обычно в марте и мае. В настоящее время назрела необходимость в достоверном прогнозировании дополнительного объема закачки морской воды в летний период, на основании которого спланировать наиболее эффективный режим работы гидротехнической системы [Чабан, 2014].

Гидрологические наблюдения на Сакском озере ведутся с 1926 г. В 80-90-х годах прошлого столетия действовала автоматическая информационная система и была создана эколого-гидрохимическая модель, предназначенная для выполнения прогнозов изменения гидрохимических показателей, в том числе прогнозов водного баланса. Сейчас прогноз водного баланса не осуществляется. Хотя накоплены эмпирические данные климатических, гидрологических и гидрогеологических наблюдений на Сакском озере за последние 20 лет, которые систематизированы, в частности в диссертации канд. геол. наук В.В. Чабана [Чабан, 2014], посвященной оценке техногенного воздействия на экологическое состояние водосбора и гидроминеральные ресурсы Сакского озера.

Восточный бассейн – это один из семи изолированных друг от друга водоемов, каждый из которых имеет свое промышленное и лечебное назначение. Именно Восточный бассейн – основной район добычи и использования минеральных ресурсов (лечебных пелоидов) и покровной рапы. Согласно работе [Чабан, 2014], его площадь составляет около 1 160 000 м², глубина от 0,4-0,6 до 1,02 м. При минимально допустимом уровне рапы 1,20 м абс., объем составляет около 640 000 м³, глубина 0,55 м; при оптимальном 1,05 м

абс. объем около 814 000 м³ и глубина 0,70 м. Минерализация (точнее плотность) растворенных основных солей в подаваемой морской воде, за исключением воды, составляет: $\sum_{\kappa}^{N-1}(\rho_{\kappa})_p^0 = 18,1$ кг/м³, количество

веществ в ней $\sum_{\kappa}^{N-1} \frac{(\rho_{\kappa})^0}{M_{\kappa}} = 606,87$ моль/м³, где ⁰ – указывает на стандартное значение подаваемой морской воды.

Для морской воды в Черном море наблюдаются небольшие изменения солевого состава не более 1%. По сравнению с Мировым океаном содержится несколько больше углекислого Са и КСl, но меньше сернокислого кальция. Кстати, Черное море у Южного берега Крыма имеет $\sum_{\kappa}^{N-1}(\rho_{\kappa})_p^0 = 21,09$ кг/м³ при $\sum_{\text{л}}^{N-1} \frac{(\rho_{\kappa})_p}{M_{\kappa}} = 668,78$ моль/м³ и $\rho_p = 1020$ кг/м³, а Мертвое море $\rho_p = 1258$ кг/м³ при $(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p = 0,99$ кг/м³.

Согласно работе [Чабан, 2014], на 05.05.2010 г. минерализация рапы Восточного бассейна составляла 134,278 кг/м³, на 01.06.2010 г. – 120,82 кг/м³, в среднем за май – 127,549 кг/м³; на 01.07.2010 г. – около 148,761 кг/м³, в среднем за июнь – 134,79 кг/м³; на 02.08.2010 г. – около 177,862 кг/м³, в среднем за июль – около 163,31 кг/м³; на 01.09.2010 г. – около 179,337 кг/м³, в среднем за август – 178,60 кг/м³; на 04.10.2010 г. – около 186,014 кг/м³, в среднем за сентябрь – 182,675 кг/м³. Количество вещества, рассчитанное по средним его значениям, составляло в июне этого года около 4282,41, а в июле – 4252,86 моль/кг.

По среднесуточным данным метеостанции «Саки», расположенной непосредственно в центре Восточного водоема, в мае, июне, июле, августе, сентябре средние значения температур (°С) таковы: 15,2; 20,4; 23,8; 22,8; 17,7; сумма атмосферных водных осадков (мм водян. слоя): 29, 41, 37, 24, 29; относительная влажность воздуха (%): 59, 54, 47, 47, 52. Из работы [Чабан, 2014] нам также известны среднесуточные температуры воздуха (°С) за указанные месяцы в 2008 г.: 15,9; 20,5; 25,0; 21,1; 17,9. Кроме того, указано, что температура рапы в июне 2015 г. изменилась от 19 до 21,5 (°С). Вообще температура поверхностного

слоя Сакского озера обычно определяется температурой воздуха. Эти данные не противоречат работам [Благов, Иванов, 1992; Чабан, 2014].

В работе [Чабан, 2014] упоминается, что грунтовые воды в изучаемый водоем поступают главным образом с северной части в количестве 2652 м³/мес с минерализацией не более 13 г/дм³. Наиболее очевидно, что в июне и июле не было поступления морской воды и отбора на бальнеологическое применение. Известно, что средний уровень рапы в Восточном водоеме в мае 2010 г. составлял около 0,8 м абс., т. е. объем водоема был равен 1 104 000 м³ при глубине 0,952 м.

В нашем понятии пятипоказательной критерияльной оценки достоверности [Химический..., 1983; Ситников, 2010] представленная информация не может быть использована для доказательства достоверного прогноза прежде всего потому, что имеет вероятностный характер. Однако, без сомнения, она пригодна для предварительной проверки предлагаемых количественных расчетов, при сравнительно высокой вероятности оправданных результатов. В настоящее время мы систематизируем и критически анализируем накопленный многочисленный эмпирический материал, который будет отвечать поставленным требованиям достоверности.

Чтобы обосновать водный и солевой балансы Восточного лечебного бассейна Сакского озера, необходимо использовать всеобщий закон сохранения массы веществ [Физический..., 1984; Ситников, 2010], который требует неизменности алгебраической суммы балансовых составляющих, отражающих для исследуемого объекта изменения в нем массы веществ во времени, поступление и уход из объекта, а также внутреннее химическое и физическое преобразование, в частности фазового состояния объекта.

Для Восточного лечебного бассейна, т. е. жидкого водного раствора, в общем случае такое балансовое уравнение будет иметь следующий вид:

$$m_{\text{бас}}^{\tau+1} - m_{\text{бас}}^{\tau} = m_{\text{морс}} + m_{\text{осад}} + m_{\text{гр}} + m_{\text{возд}} + m_{\text{сток}} + m_{\text{дно}} + m_{\text{конд}} + m_{\text{хим}} + m_{\text{лед}} + m_{\text{дамб}} - m_{\text{исп}} - m_{\text{бальн}}, \quad (1)$$

где $\tau, \tau + 1$ – дискретные моменты времени, указывающие на время определения балансовых составляющих и отражающие времен-

ной интервал расчетного времени $t^{\tau+1} - t^{\tau}$, величина которого определяется интенсивностью их проявления, обычно с точностью до суток или часового проявления; $m_{\text{бас}}$ – масса жидкой воды (H_2O) или солей в водном растворе всего бассейна, кг; $m_{\text{морс}}$ – масса жидкой воды или солей в морской воде, периодически пополняющей водоем за расчетный период, кг; $m_{\text{осад}}$ – масса жидкой воды или солей, поступающих в водоем за расчетный период, кг; $m_{\text{гр}}$ – приток этих веществ с грунтовыми водами за расчетный период, кг; $m_{\text{возд}}$ – ветровой привнос за расчетный период, кг; $m_{\text{сток}}$ – поступление с поверхностным стоком, кг; $m_{\text{дно}}$ – переток за расчетный период из залегающих ниже отложений, кг; $m_{\text{бальн}}$ – отбор за расчетный период для бальнеологических целей, кг; $m_{\text{конд}}$ – конденсация атмосферной влаги, приведенная к расчетному периоду, кг; $m_{\text{исп}}$ – вследствие испарения за расчетный период, кг; $m_{\text{хим}}$ – вследствие химических преобразований за расчетный период (в том числе осаждения и изменения солевого состава), кг; $m_{\text{лед}}$ – вследствие превращения в лед и сублимации из него за расчетный период, кг; $m_{\text{дамб}}$ – вследствие фильтрации через глинистую дамбу за расчетный период, кг.

Все приведенные массы удобно указывать в кг, они являются средними за расчетный интервал времени $\tau, \tau + 1$.

Проблемными вопросами в уравнении являются составляющие, отражающие вследствие испарения превращение поступающей морской воды в лечебную рапу.

Так как испарение главным образом проявляется в летние месяцы, есть смысл сократить уравнение (1), исключив составляющие вследствие конденсации и льдообразования. Из-за очевидной малости можно исключить ветровой привнос и фильтрацию через дно из-за наличия непроницаемых залегающих ниже отложений. Кроме того, специальными дренажными сооружениями исключен поверхностный сток, например со стороны жилого массива г. Саки дренажным каналом, а с южной стороны проходит обходной канал. Фильтрация через глинистые водонепроницаемые дамбы возможна лишь в аварийных ситуациях.

Интересно, что для морских и океанических вод практически отсутствуют химичес-

кие преобразования, изменяющие основные свойства рапы: общую минерализацию, массовое количество солей, плотность воды. После выпаривания и разбавления чистой водой указанные свойства восстанавливаются. Кстати, это не исключает загрязнения рапы микроколичественным поступлением опасных органических и неорганических веществ.

Без сомнения, для Восточного бассейна первостепенное значение имеет балансовая составляющая за счет поступления морских вод, а также составляющая отбора рапы на бальнеологию. Целесообразно также оценивать роль атмосферных осадков и притоков грунтовых вод.

Таким образом, общее балансовое уравнение можно упростить при его использовании, в частности за июнь, июль и август:

$$m_{\text{бас}}^{\tau+1} - m_{\text{бас}}^{\tau} = m_{\text{морс}} + m_{\text{осад}} + m_{\text{гр}} - m_{\text{бальн}} - m_{\text{исп}}.$$

Учитываем, что любую массу вещества «к» можно оценить по формуле $m_k = \rho_k \cdot V_p$, где $V_k = V_p$ – объем вещества [Физический..., 1984; Браун, Лемей, 1983], точнее объем жидкого водного раствора, в котором равномерно растворено вещество «к», м^3 ; ρ_k – плотность веществ, равная отношению достоверной массы вещества к достоверному его объему $\frac{\delta m_k}{\delta V_p}$, где δ – достоверность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Тогда предыдущее уравнение баланса жидкой воды видоизменится:

$$\begin{aligned} & [(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p]_{\text{бас}}^{\tau+1} \cdot V_{\text{бас}}^{\tau} - [(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p]_{\text{бас}}^{\tau} \cdot V_{\text{бас}}^{\tau} = \\ & = [(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p]_{\text{морс}} \cdot V_{\text{морс}} + [(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p]_{\text{осад}} \cdot V_{\text{осад}} + \\ & + [(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p]_{\text{гр}} \cdot V_{\text{гр}} - (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p \cdot V_{\text{бальн}} - \\ & - (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{исп}} \cdot V_{\text{исп}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $[(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p]_i$ – плотность жидкой воды при конкретной температуре ($^{\circ}\text{C}$) и давлении в составе водных растворов разного генезиса (i), в первом приближении изменяется так же, как и чистая вода. При необходимости изменения этих плотностей от температуры можно учесть согласно таблице [Гороновский и др., 1987]. Изменение их от давления менее значительно, судя по коэффициентам сжимаемости за счет давления и теплового расширения [Винников, Прокуряков, 1988]:

$$\alpha_T = 2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}, \quad \alpha_{\text{давл}} = 5 \cdot 10^{-10} \frac{1}{\text{Па}}.$$

Упрощенное для летних месяцев уравнение солевого баланса также упростится:

$$\left[\sum_k^{N-1} (\rho_k)_p \right]_{\text{бас}}^{\tau+1} \cdot V_{\text{бас}}^{\tau+1} - \left[\sum_k^{N-1} (\rho_k)_p \right]_{\text{бас}}^{\tau} \cdot V_{\text{бас}}^{\tau} = \left[\sum_k^{N-1} (\rho_k)_p \right]_{\text{морс}} \cdot V_{\text{морс}} + \left[\sum_k^{N-1} (\rho_k)_p \right]_{\text{осад}} \cdot V_{\text{осад}} + \left[\sum_k^{N-1} (\rho_k)_p \right]_{\text{гр}} \cdot V_{\text{гр}} - \left[\sum_k^{N-1} (\rho_k)_p \right]_{\text{бальн}} \cdot V_{\text{бальн}} - \left[\sum_k^{N-1} (\rho_k)_p \right]_{\text{исп}} \cdot V_{\text{исп}}, \quad (3)$$

где $\left[\sum_k^{N-1} (\rho_k)_p \right]_i$ – массовая концентрация (плотность) всех растворенных веществ разного генезиса, за исключением воды, кг/м³; $V_{\text{бас}}^{\tau}, V_{\text{бас}}^{\tau+1}$ – соответственно объемы рапы Восточного бассейна на момент времен $t^{\tau}, t^{\tau+1}$ (м³); V_i – объемы водных растворов разного генезиса, поступившие в Восточный бассейн за расчетное время $t^{\tau+1} - t^{\tau}$ (м³).

Подчеркнем, что физическое испарение не предусматривает ухода растворенных веществ, т. е.

$$\left[\sum_k^{N-1} (\rho_k)_p \right]_{\text{исп}} = 0.$$

Указанные объемы по существу равны сумме так называемых компетентных объемов, под которыми подразумеваем реальный объем (физическую точку), для которого усредненные значения свойств среды являются достоверными для количественных расчетов и позволяют выполнять математические операции, обоснованные понятием так называемой математической точки ($dV \rightarrow 0$). Более подробно это изложено в работе [Ситников, 2010].

По-видимому, для Восточного бассейна компетентный объем в первом приближении равен 1 м³, компетентное время $\delta t \approx 1$ сут, а компетентная глубина исследуемого бассейна будет примерно $0,552 \div 1,02$ м, что подтверждается многолетним опытом эксплуатации этого месторождения рапы.

Обращаю внимание, что принятые для бассейна $(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p$ и $\sum_k^{N-1} (\rho_k)_p$ представляют по сути средние значения как минимум по 10 характерным для бассейна точкам [Вентцель и др., 1998], т. е. $\left[\sum_k^{N-1} (\rho_k)_p \right]_{\text{cp}} = \frac{\sum^{10} \cdot \sum_k^{N-1} (\rho_k)_p}{10}$. Такое же представление о средних значениях составляющих солевого баланса. Хотя для рапы исследуемого водоема при поддерживаемых эффективных уровнях около $0,40 \div 0,60$ м быстрое выравнивание минерализации за счет поступившей морской воды может обеспечиваться ветровым перемешиванием и особенностями заполнения морской водой [Благов, Иванов, 1992].

Так как поступление веществ (воды и солей) в водоем обычно происходит нерав-

номерно, надо эти поступления привести к принятому расчетному периоду времени $t^{\tau+1} - t^{\tau}$. Это значит, что вначале находятся средние реальные значения за компетентное время, в частности $\delta t = 1$ сут, а затем путем умножения определяют суммарные значения за $t^{\tau+1} - t^{\tau}$. Кстати, суммарные атмосферные осадки обычно усредняются за месяц, однако июль и август имеют 31 сутки, а июнь 30 суток. В этом случае желательно учесть это различие.

Конкретизируем значение составляющей баланса воды за счет испарения. Согласно уравнению (2) она равна:

$$(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{исп}} \cdot V_{\text{исп}} = \rho_{\text{п}} \cdot \vartheta_{\text{п}} \cdot (t^{\tau+1} - t^{\tau}) \cdot S_{\text{бас}},$$

где $\rho_{\text{п}} \cdot \vartheta_{\text{п}}$ – массовая скорость испарения паробразной влаги (кг/м² · сут).

Из-за допущения о малости изменения плотности воды обменных слабоминерализованных жидких водных растворах есть смысл сократить уравнение (2) на $[(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p]_i$, получив традиционно используемое для расчетов балансовое уравнение суммы объемов жидких рассолов. В частности, желательно на плотность воды с учетом влияния температуры: при 20,4 °С плотность равна 998,12 кг/м³, при 22,8 °С – 997,58 кг/м³, при 23,8 °С – 997,24 кг/м³, при 25,0 °С – 997,04 кг/м³ [Винников, Проскураков, 1988; Гороновский и др., 1987; Физический..., 1984].

Итак, после сокращения плотностей воды в уравнении (2) получим следующее упрощенное равенство:

$$V_{\text{бас}}^{\tau+1} - V_{\text{бас}}^{\tau} = V_{\text{морс}} + V_{\text{осад}} + V_{\text{гр}} - V_{\text{бальн}} - V_{\text{исп}}, \quad V_{\text{исп}} = \frac{\rho_{\text{п}} \vartheta_{\text{п}} \cdot S_{\text{бас}} (t^{\tau+1} - t^{\tau})}{(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{п}|T^{\circ}\text{C}}}$$

Напомню, что плотность воды в растворе может оказаться для рассолов существенно меньше, чем для чистой воды. Этот эффект даже назван стрикционным [Ситников, 2010]. Одно из его объяснений заключается в том, что часть растворенных веществ внедряется в некую условную пустоту матрицы жидкой воды, несколько расширяя ее и тем самым уменьшая плотность растворителя (воды). Экспериментально плотность раствора можно определить на образце массой 1 кг, зная общее количество или массу растворенных веществ, а также объем раствора.

$$\text{Тогда } (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{p } |_{\text{T}^\circ\text{C}}} = \rho_{\text{p } |_{\text{T}^\circ\text{C}}} - \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{p } |_{\text{T}^\circ\text{C}}}.$$

Прежде, чем приступить к количественным расчетам, укажем, что в отдельных случаях по изменению во времени плотности растворенных веществ можно рассчитать изменение объема раствора. Например, если

$$\sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{p}}^{\tau} \cdot V_{\text{p}}^{\tau} = \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{p}}^{\tau+1} \cdot V_{\text{p}}^{\tau+1},$$

а сам раствор остается гомогенным жидким и не происходит его химического преобразования, то при известных массовых концентрациях получим:

$$\delta V_{\text{p}}^{\tau+1} = \frac{\sum_{\text{к}}^N (\rho_{\text{к}})_{\text{p}}^{\tau}}{\sum_{\text{к}}^N (\rho_{\text{к}})_{\text{p}}^{\tau+1}} \cdot \delta V_{\text{p}}^{\tau}.$$

Это значит, что объем раствора на t^{τ} уменьшится во столько раз, на сколько плотность растворенных веществ меньше ее плотности на $t^{\tau+1}$. Известно, что объем бассейна в мае составлял 1 104 000 м³ при средней глубине 0,8 м абс. Значит,

$$\text{при } \frac{\sum_{\text{к}}^N (\rho_{\text{к}})_{\text{p}}^{\tau}}{\sum_{\text{к}}^N (\rho_{\text{к}})_{\text{p}}^{\tau+1}} := 0,8122 \text{ в июне получим}$$

$$V_{\text{бас}}^{\tau+1} = 0,8122 \cdot 1\,104\,000 = 896\,641,42 \text{ м}^3.$$

Наконец, приступим к количественным расчетам, используя упрощенные уравнения баланса воды (точнее, баланса объема воды) и солей.

Начнем с уравнения баланса солей. Для оценки $V_{\text{бас}}^{\tau+1}$ за июнь воспользуемся уравнением (3), учитывая, что в июне и июле отсутствовали составляющие, отражающие поступление морской воды и отбор на бальнеологию:

$$\sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{p}}^{\tau+1} \cdot V_{\text{бас}}^{\tau+1} = \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{p}}^{\tau} \cdot V_{\text{бас}}^{\tau} +$$

$$+ \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{p}}^{\tau} \cdot V_{\text{осад}} + \sum_{\text{к}}^{N-1} (\rho_{\text{к}})_{\text{p}}^{\tau} \cdot V_{\text{гр}}. \quad (5)$$

При заведомо большой концентрации растворенных веществ 0,05 кг/м³ и их количестве 0,041 м водян. сл./мес атмосферные осадки в количестве 47 560 м³ обеспечили поступление максимум $0,041 \cdot 0,05 \cdot S_{\text{бас}} = 2378$ кг солей. Это количество составляет $\frac{2378 \cdot 100}{148,761 \cdot 896641,42} = 0,0018\%$ от содержания солей в водоеме на 01.07.2010 г.

Напомню, что поступление солей с грунтовыми водами за июнь со стороны северного берега Восточного бассейна составляло 2652 м³/мес при их минерализации 13 кг/м³, т. е. $2652 \cdot 13 = 34\,476$ кг/мес.

Это соответствует $\frac{34476 \cdot 100}{148,761 \cdot 896641,42} = 0,025\%$ от реально зафиксированной плотности рапы.

Таким образом, приведенные расчеты указывают на практически незначительное поступление солей и на главенствующую роль природного испарения, которое можно оценить так:

$$\frac{V_{\text{исп}}^{\text{июнь}}}{S_{\text{бас}}} = V_{\text{бас}}^{\tau+1} - V_{\text{бас}}^{\tau} - 896\,641,42 - 1\,104\,000 =$$

$$= -207\,358,6 \text{ (} 1160000 \cdot 0,179 \text{) м}^3/\text{мес},$$

где $\delta S_{\text{бас}} = 1\,160\,000 \text{ м}^2$; $V_{\text{исп}}^{\text{июнь}} |_{\text{T}^\circ\text{C}} = -0,179 \text{ м водян. сл./мес}$ – испарение воды.

Однако указанное значение $-207\,358,6$ м³/мес, т. е. $-0,179$ м водян. сл., является явно заниженным, так как солевой баланс не учитывает водного объема осадков 47 560 м³/мес и притока с грунтовыми водами 2652 м³/мес, которые следует добавить. В результате значение испарения в июне 2010 г. составит $-(207\,358,6 + 47\,560 + 2652) = -257\,570,6$ м³/мес. Следовательно, испарение в иных единицах измерения будет равно $\frac{V_{\text{исп}}^{\text{июнь}}}{S_{\text{бас}}} = -0,222 \text{ м водян. сл./мес}$.

Из сказанного следует вывод, что солевой баланс сам по себе может вносить значительную ошибку при расчете испарения, в частности $\frac{0,222 - 0,179}{0,222} \cdot 100 = 19,94\%$. Его следует дополнять, используя водный баланс либо единовременные фактические значения концентраций и объемов изучаемых рассолов. Последнее утверждение, несомненно, более правильное и необходимое при оценке достоверности прогнозных результатов.

Рассчитаем таким же образом испарение за июль. Без сомнения за этот месяц в водоем не поступило ощутимого количества солей, и плотность рапы увеличилась лишь за счет физического испарения. Так, за

счет осадков поступило $\frac{0,037 \cdot 0,05 \cdot 1160000}{177,862 \cdot 749936,8} \cdot 100 = 0,016\%$ от плотности рапы на 02.07.2010 г. Составляющая за счет грунтовых вод равна $\frac{34476 \cdot 100}{177,862 \cdot 749936,8} = 0,026\%$. Объем бассейна на

02.07.2010 г. составляет $\frac{148,761}{177,862} \cdot V_{\text{бас}}^{\tau} = 0,8364 \times 896641,42 = 749936,8 \text{ м}^3$. Следовательно, $\frac{V_{\text{исп}}^{\text{июль}}}{S_{\text{бас}}} = 749936,8 - 896641,42 = -146704,62 \text{ м}^3/\text{мес}$, т.е. около $\frac{146704,62}{1160000} = -0,1265 \text{ м водян. сл./мес}$.

Однако указанное значение может быть уточнено за счет осадков и грунтовых вод (42920 + 2652): $-(146704,62 + 45572) = -192276,62 \text{ м}^3/\text{мес}$, т.е. $\frac{V_{\text{исп}}^{\text{июль}}}{S_{\text{бас}}} = -\frac{149356,62}{1160000} = -0,1657557 = -0,166 \text{ м водян. сл./мес}$.

Теперь обратимся к упрощенному уравнению водного баланса, точнее, баланса объемов воды. Напомним, что мы допустили в июне и июле отсутствие притоков морских вод и отбора рапы на бальнеологию. Составляющая за счет осадков в июне будет равна $0,041 \cdot 1160000 = 47560 \text{ м}^3$ (т.е.

$\frac{47560}{1104000} \cdot 100 = 3,89\%$ от объема водоема в начале месяца). Составляющая за счет грунтовых вод по расчету в июле будет равна $0,037 \cdot 1160000 = 42920 \text{ м}^3$, т.е. $\frac{42920 \cdot 100}{896641} = 4,79\%$

от объемов на 01.07.2010 г. Соответственно, за счет грунтовых вод в июне и июле приток составит $2652 \text{ м}^3/\text{мес}$. Есть смысл

учесть эти изменения с целью расчета испарения.

За июль 2010 г. месячное реальное пополнение воды в Восточный водоем без испарения будет равно

$$V_{\text{бас}}^{\text{июль}} = V_{\text{бас}}^{\tau} + V_{\text{осад}} + V_{\text{гр}} = 1104000 + 47560 + 2652 = 1154212 \text{ м}^3.$$

Из-за отсутствия данных о реальном объеме воды на $t^{\tau+1}$ примем рассчитанное по солевому балансу

$$V_{\text{бас}}^{\tau+1} = \frac{120,82}{148,761} \cdot 1104000 = 896641,42 \text{ м}^3. \text{ Тогда}$$

$$V_{\text{исп}}^{\text{июль}} = V_{\text{бас}}^{\tau+1} - V_{\text{бас}}^{\text{июль}} = 896641,42 - 1154212 = -257570,58 \cdot (1160000 \cdot 0,22204336) \text{ м}^3.$$

$$\text{Отсюда } \frac{V_{\text{исп}}^{\text{июль}}}{S_{\text{бас}}} = -0,2220436 \text{ м водян. сл./мес.}$$

Теперь оценим испарение по балансу объемов рассолов за июль 2010 г.:

$$V_{\text{бас}}^{\text{июль}} = 896641,42 - 42920 + 2652 = 942213,42 \text{ м}^3,$$

$$V_{\text{бас}}^{\tau+1} = \frac{148,761}{177,862} \cdot 896641,42 = 749936,8 \text{ м}^3.$$

Тогда $V_{\text{исп}}^{\text{июль}} = 749936,8 - 942213,42 = -192276,62 \times (1160000 \cdot 0,165755) \text{ м}^3$.

Значит, $\frac{V_{\text{исп}}^{\text{июль}}}{S_{\text{бас}}} = -0,165755 = -0,166 \text{ м водян. сл./мес}$.

Наконец, чтобы оценить в первом приближении погрешности упрощения уравнения баланса массы воды, как растворителя, в уравнении баланса объемов рассолов, воспользуемся значениями плотностей, рассчитав их согласно формуле:

$$(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p = \rho_{\text{H}_2\text{O}}|_{T^{\circ}\text{C}} - \left[\sum_k^{N-1} (\rho_k)_i \right],$$

где $\rho_{\text{H}_2\text{O}}|_{T^{\circ}\text{C}}$ – плотность воды при данной температуре, $\text{кг}/\text{м}^3$; i – указывает на плотность воды в жидких водных рассолах разных водобалансовых составляющих; $\left[\sum_k^{N-1} (\rho_k)_i \right]$ – плотность всех растворенных солей.

Итак, в июне 2010 г. для Восточного бассейна при $\rho_{\text{H}_2\text{O}}|_{20,4 T^{\circ}\text{C}} = 998,12 \text{ кг}/\text{м}^3$, $V_{\text{бас}}^{\tau} = 1104000 \text{ м}^3$,

$$V_{\text{бас}}^{\tau+1} = \frac{120,82}{148,761} \cdot V_{\text{бас}}^{\tau} = 896641,42 \text{ кг}/\text{м}^3, V_{\text{осад}}^{\text{июль}} = 47560 \text{ м}^3, V_{\text{гр}}^{\text{июль}} = 2652 \text{ м}^3, \text{ плотность воды}$$

$$\left[(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p \right]_{\text{бас}}^{\tau} = 998,12 - 120,82 = 877,3 \text{ кг}/\text{м}^3, \text{ т.е. } (\rho_p)_{\text{бас}}^{\tau} = 1139,9 \text{ кг}/\text{м}^3; \left[(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_p \right]_{\text{бас}}^{\tau+1} = 998,12 -$$

$$-148,761 = 849,36 \text{ кг}/\text{м}^3, (\rho_p)_{\text{бас}}^{\tau+1} = 1117,36 \text{ кг}/\text{м}^3; (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{осад}}^{\text{июль}} = 998,12 - 0,05 = 990,07 \text{ кг}/\text{м}^3,$$

$$\text{т.е. } (\rho_p)_{\text{осад}}^{\text{июль}} = 1002,0 \text{ кг}/\text{м}^3; (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{гр}} = 998,12 - 13 = 985,12 \text{ кг}/\text{м}^3, (\rho_p)_{\text{гр}}^{\text{июль}} = 1015,11 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Обращу внимание, что согласно [Таблицы..., 1976; Гороновский и др., 1987; Ситников, 2010], указанные плотности близки к реальным.

Напомним, что масса испарившейся воды равна $\rho_{\text{H}_2\text{O}} \tau_{\text{°C}} \cdot V_{\text{исп}}$, и эта величина должна быть равна

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} \tau_{\text{°C}} \cdot V_{\text{исп}}^{\text{июнь}} = \left[(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{р}} \right]^{\tau} \cdot V_{\text{бас}}^{\tau} + (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{осад}}^{\text{июнь}} \cdot V_{\text{осад}}^{\text{июнь}} + (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{гр}}^{\text{июнь}} \cdot V_{\text{гр}}^{\text{июнь}} - \left[(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{р}} \right]^{\tau+1} \cdot V_{\text{бас}}^{\tau+1}.$$

Решаем указанное уравнение, подставив численные значения:

$$998,12 \cdot V_{\text{исп}}^{\text{июнь}} = 877,3 \cdot 1\,104\,000 - 849,36 \cdot 896\,641,42 + 998,07 \cdot 47\,560 + 985,12 \cdot 2652.$$

$$998,12 \cdot V_{\text{исп}}^{\text{июнь}} = 9685 \cdot 9200 - 761\,574\,870 + 46\,992\,608 + 2\,612\,538,2 = 256\,569\,477,2 \text{ кг.}$$

$$V_{\text{исп}}^{\text{июнь}} = \frac{256\,569\,477,2}{998,12} = 257\,053 = (1\,160\,000 \cdot 0,2215974) \text{ м}^3, (\theta_{\text{п}})_{\text{исп}}^{\text{июнь}} = 0,222 \text{ м водян. сл./мес.}$$

$$\text{В июле 2010 г. при } \rho_{\text{H}_2\text{O}}_{22,84 \text{ °C}} = 997,58 \text{ кг/м}^3, V_{\text{бас}}^{\tau} = 896641,42 \text{ м}^3; V_{\text{бас}}^{\tau+1} = \frac{148,761}{177,862} \cdot V_{\text{бас}}^{\tau} =$$

$$= 749\,936,8 \text{ кг/м}^3, V_{\text{осад}}^{\text{июль}} = 42\,920 \text{ м}^3, V_{\text{гр}}^{\text{июль}} = 2652 \text{ м}^3 \text{ плотность воды } \left[(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{р}} \right]^{\tau} = 997,58 -$$

$$- 148,761 = 848,82 \text{ кг/м}^3, \text{ т. е. } (\rho_{\text{р}})_{\text{бас}}^{\tau} = 1178,11 \text{ кг/м}^3; \left[(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{р}} \right]^{\tau+1} = 997,58 - 177,862 =$$

$$= 819,72 \text{ кг/м}^3, (\rho_{\text{р}})_{\text{бас}}^{\tau+1} = 1219,93 \text{ кг/м}^3; (\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{осад}}^{\text{июль}} = 998,07 \text{ кг/м}^3; \left[(\rho_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{р}} \right]^{\text{июль}}_{\text{гр}} = 985,12 \text{ кг/м}^3.$$

Отсюда

$$997,58 \cdot V_{\text{исп}}^{\text{июль}} = 849,82 \cdot 896\,641,42 - 819,72 \cdot 749\,936,8 + 998,07 \cdot 42\,920 + 985,12 \cdot 2652 = 2\,415\,035,82 \text{ кг.}$$

$$V_{\text{исп}}^{\text{июль}} = \frac{2\,415\,035,82}{997,58} = 2\,415\,035,82 = (1\,160\,000 \cdot 0,2081922) \text{ м}^3,$$

$$\theta_{\text{исп}} = \frac{V_{\text{исп}}^{\text{июль}}}{1160000} = 0,208 \text{ м водян. сл./мес.}$$

Как и следовало ожидать, расчеты за июнь $-0,222$ м водян. сл./мес. совпадают по водному и солевому балансам, а также балансу объемов водных рассолов, так как, по сути, мы за основу начального объема приняли $V_{\text{бас}}^{\tau} = 1\,104\,000 \text{ м}^3$, как условно фактическую величину. Однако в июле несовпадение значений на $\frac{0,208 - 0,166}{0,208} \cdot 100 = 20,19\%$ логично указывает на ошибку методов балансов солей и объемов водных растворов.

Таким образом, результаты исследований позволяют сделать ряд важных выводов. Отметим, что применяемые общебалансовые методы, в том числе баланса водных объемов расчета испарения (конденсации) влаги с поверхности водных рассолов, типа рапы, вполне приемлемы, хотя лишь в первом приближении из-за возможных больших

погрешностей упрощения исходных балансовых уравнений сохранения баланса массы растворителя воды. Кроме этого недостатка, достоверность решений требует доказанной детерминированной взаимосвязи исходных параметров, а не вероятностных их значений. К тому же не доказаны ошибки, связанные с приборной точностью экспериментальных определений, усреднения по времени и пространству значений таких параметров, как концентрация растворенных солей, относительная влажность воздуха, температура, количество осадков, уровень водоема, количество воды в рассолах и др. Судя по существующей фондовой информации, ее вполне достаточно для повышения достоверности исследуемых балансовых методов и количественной оценки их погрешностей.

Список литературы / References

1. *Благов А.С.* Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря / Благов А.С., Иванов В.А. – Киев: Наук. думка, 1992. – 239 с.
Blagov A.S., Ivanov V.A. Hydrology and hydrodynamics for the shelf zone of the Black Sea. Kiev: Naukova Dumka, 1992. 239 p.
2. *Браун Т.* Химия – в центре наук / Браун Т., Лемей Г.Ю. – М.: Мир, 1983. – Ч. 1. – 447 с.; – Ч. 2. – 520 с.
Braun T., Lemey H.Yu. Chemistry – in the centre of sciences. Part 1. 1983. Moscow: Mir Publishing House, 447 p. (in Russian).
3. *Вентцель Е.С.* Теория вероятности / Вентцель Е.С., Благов Н.С., Иванов В.А. – М.: Высш. шк., 1998. – 575 с.
Venttsel E.S., Blagov A.S., Ivanov V.A. Probability Theory. Moscow: Vyssh. Shk., 1998. 575 p.
4. *Винников С.Д.* Гидрофизика / Винников С.Д., Проскуряков Б.В. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 248 с.
Vinnikov S.D., Proskuriakov B.V., 1988. Hydrophysics. Leningrad: Hydrometeoizdat, 248 p. (in Russian).
5. *Гороновский И.Т.* Краткий справочник по химии / Гороновский И.Т., Назаренко Ю.П., Некряч Е.Ф. – Киев: Наук. думка, 1987. – 829 с.
Horonovsky I.T., Nazarenko Y.P., Nekriach Ye.F., 1987. Quick Reference Handbook of Chemistry. Kiev: Naukova Dumka, 829 p. (in Russian).
6. *Ситников А.Б.* Вопросы миграции веществ в грунтах / Ситников А.Б. – Киев, 2010. – 625 с.
Sitnikov A.B., 2010. Issues of substance migration in soils. Kiev, 625 p. (in Russian).
7. *Таблицы физических величин.* Справочник / под ред. акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
Tables of physical values. Handbook, 1976. (Ed. academician I.K. Kikoin). Moscow: Atomizdat, 1008 p. (in Russian).
8. *Физический энциклопедический словарь* / гл. ред. Прохоров А.М. – М.: Сов. энцикл., 1984. – 944 с.
Physical encyclopedic dictionary, 1984. (Editor-in-Chief A.M. Prochorov). Moscow: Sovetskaya Encyclopedia, 944 p. (in Russian).
9. *Химический энциклопедический словарь* / гл. ред. Кнунянц И.Л. – М.: Сов. энцикл., 1983. – 791 с.
Chemical encyclopaedic dictionary, 1983. (Editor-in-Chief Knunians I.L). Moscow: Sovetskaya Encyclopedia, 791 p. (in Russian).
10. *Чабан В.В.* Техногенное воздействие на эколого-геологическое состояние водосбора и гидроминеральные ресурсы Сакского озера: дис. канд. геол. наук. – Симферополь, 2015. – 231 с.
Chaban V.V. Technogenic impact on the ecological conditions of watershed and hydro-mineral resources for Saky Lake. Cand. geol. sci., diss. – Simferopol, 2014. – 231 p.

Статья поступила
10.03.2016