

подземных вод достигает 20—30 м в год. Засоление палеоген-неогенового водоносного горизонта идет интенсивнее в 1,2—2 раза.

Интегральным показателем рассмотренных инженерно-геологических процессов является существенное повышение минерализации водной массы малого водосбора Солигорского водохранилища. Наряду с засолением поверхностных вод и почв происходит и загрязнение атмосферы при ветровой эрозии солеотвалов. Выявленные процессы происходят на всех солеотвалах производственного объединения «Белоруськалий», интенсивность и стадии их развития зависят от возраста солеотвалов.

Солеотвалы являются удобным полигоном для изучения инженерно-геологических процессов этой категории: они находятся в климатической зоне с хорошим увлажнением, имеют достаточно низкий базис эрозии, что способствует увеличению интенсивности протекания процессов.

Исследование инженерно-геологических процессов на солеотвалах действующих калийных комбинатов позволяет разработать мероприятия по безопасному проведению работ складирования галитовых отходов в солеотвалы, а также по устранению загрязнения природной среды отходами калийных производств.

Список литературы

1. Богомолов Г. В., Роткин С. М., Козлов М. Ф. // Охрана окружающей среды калийных производств. Минск, 1979. С. 25.
2. Клементьев В. П., Еременко Ю. П., Колпашников Г. А. // Докл. АН БССР. 1973. № 3.
3. Колпашников Г. А. // Гидрогеология и инженерная геология Белоруссии. Минск, 1975.
4. Колпашников Г. А., Еременко Ю. П., Курбатова Н. М. и др. Там же.
5. Еременко Ю. П., Рябцева Т. В. // Формирование ореолов засоленных вод. Минск, 1974.
6. Колпашников Г. А. // Гидрогеология и инженерно-геологические условия Белоруссии. Минск, 1978.
7. Шпаков О. Н., Клементьев В. П. // Охрана окружающей среды калийных производств. Минск, 1979. С. 65.
8. Bogomolov G. W., Klementev V. P., Turensov V. I. // Erosion and Sediment Transport Measurement (Proceeding of the Elorence Symposium, Jump. 1981) IAHN Publ. 1981. P. 513.
9. Гончарова М. В., Амосова Л. Е., Волченко Е. Г. // Поваренная соль и ее растворители. Л., 1970.

УДК 551.526

Г. М. БАЗЫЛЕНКО, Л. А. БЛАЖЕВИЧ

РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ НАРОЧАНСКИХ ОЗЕР

Актинометрические наблюдения на озерной гидрометеостанции Нарочь, выполненные Л. А. Блажевич в течение 1982—1985 гг., эпизодические гидрооптические исследования озер К. А. Мокневским [1, 2], обработка многолетних актинометрических и метеорологических материалов наблюдений И. А. Савиковским [3, 4 и др.] явились основой для количественной оценки процессов изменения во времени взаимно связанных поступающей и отраженной радиации, излучения атмосферы, поглощения и отражения радиации поверхностью деятельного слоя методом радиационного баланса, рассчитанного авторами настоящей работы за 25-летний безледный период (1961—1985).

Нарочанские озера расположены в единой гидрографической сети, в радиусе до 50 км, в относительно однородных гидрометеорологических условиях (средние облачность, суммарная солнечная радиация, температура воздуха и поверхности воды); различие в величине радиационных параметров (эффективное излучение, альбедо, проникновение поглощенной радиации на глубину) может быть обусловлено особенностями морфометрии и гидрооптическими показателями (табл. 1).

Сравнительные показатели Нарочанских озер

Показатель	Нарочь	Мястро	Баторино
Площадь зеркала, км ²	79,6	9,0	3,0
Глубина средняя/максимальная, м	9,0/24,8	5,4/11,3	3,0/5,5
Цветность воды по платино-кобальтовой шкале, °	5—20	20—50	40—70
Прозрачность по диску Секки, м, безледный период	3,5—8,0	1,0—2,7	0,4—1,3

Радиационный баланс озер (B) получен расчетным методом:

$$B = Q(1 - A) - E_{\text{эф}}, \quad (1)$$

где Q — суммарная солнечная радиация; A — альbedo водной поверхности; $E_{\text{эф}}$ — эффективное излучение. Радиация выражена в МДж/м² горизонтальной поверхности; ее суммы в шкале МРЭ (мировой радиометрич. эталон).

Суммарная солнечная радиация. Наблюдения прямой и суммарной радиации над оз. Нарочь проводились в течение 1982—1985 гг. с учетом среднемесячных за этот период коэффициента прозрачности и фактора мутности; месячные суммы Q приведены в табл. 2.

Суммарная радиация конкретного месяца года за период 1961—1981 гг. рассчитана по следующей методике с использованием формулы Н. И. Гойса [5]:

$$Q = Q_0(1 - kN), \quad (2)$$

где Q_0 — возможные месячные суммы суммарной радиации при безоблачном небе; N — средневзвешенное количество общей и нижней облачности; k — эмпирический коэффициент, учитывающий влияние облачности на суммарную радиацию.

Принимая во внимание данные наблюдений опорной актинометрической станции Минск ($Q_{(M)}$):

$$Q/Q_{(M)} = Q_0(1 - kN)/Q_{0(M)}(1 - k'N'), \quad (3)$$

а также среднемноголетние месячные суммы радиации, вычисленные для оз. Нарочь ($\bar{Q}_{(H)}$) по осредненной за многолетие облачности [4], и среднемноголетние месячные суммы радиации по наблюдениям в Минске ($\bar{Q}_{(M)}$), получаем:

$$Q/Q_{(M)} = \bar{Q}_{(H)}/\bar{Q}_{(M)} \quad \text{или} \quad Q = (Q_{(M)} \cdot \bar{Q}_{(H)})/\bar{Q}_{(M)}. \quad (4)$$

Сопоставление месячных величин суммарной радиации по наблюдениям на оз. Нарочь за 1982—1985 гг. с рассчитанными по формуле (4) за тот же период показало, что коэффициенты корреляции для безледного периода (май—октябрь): $r=0,998$, для периода ноябрь—апрель $r=0,948$ соответственно.

Поглощенная водой суммарная солнечная радиация. Приходная часть радиационного баланса: $Q(1 - A) = Q_{\text{п}}$ (основной источник тепла, поступающего в водную массу водоемов) рассчитана за безледный период 1961—1985 гг. (табл. 2) в зависимости от среднемесячных значений A (%) для суммарной радиации озер соответствующей широты [6]. При

Месячные суммы суммарной (Q) и поглощенной водой суммарной радиации (Q_{II}) Нарочанских озер, МДж/м²

Год	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1961	68	101	275	503	$\frac{543}{502}$	$\frac{655}{612}$	$\frac{612}{566}$	$\frac{468}{431}$	$\frac{326}{297}$	$\frac{191}{167}$	41	37
1962	51	118	306	419	$\frac{480}{444}$	$\frac{597}{558}$	$\frac{571}{528}$	$\frac{536}{493}$	$\frac{334}{304}$	$\frac{179}{157}$	59	40
1963	78	132	332	466	$\frac{659}{610}$	$\frac{651}{609}$	$\frac{771}{713}$	$\frac{564}{519}$	$\frac{366}{306}$	$\frac{144}{126}$	54	46
1964	68	146	283	404	$\frac{574}{531}$	$\frac{750}{701}$	$\frac{642}{594}$	$\frac{460}{423}$	$\frac{306}{278}$	$\frac{171}{150}$	63	22
1965	63	134	279	446	$\frac{515}{476}$	$\frac{577}{539}$	$\frac{614}{568}$	$\frac{525}{483}$	$\frac{373}{339}$	$\frac{172}{150}$	76	43
1966	64	104	195	375	$\frac{592}{548}$	$\frac{708}{662}$	$\frac{595}{550}$	$\frac{604}{556}$	$\frac{292}{266}$	$\frac{169}{148}$	66	43
1967	84	114	205	316	$\frac{595}{550}$	$\frac{688}{643}$	$\frac{727}{672}$	$\frac{539}{496}$	$\frac{366}{333}$	$\frac{127}{111}$	32	50
1968	78	128	301	397	$\frac{528}{488}$	$\frac{705}{659}$	$\frac{641}{593}$	$\frac{511}{470}$	$\frac{369}{336}$	$\frac{125}{109}$	46	35
1969	86	143	381	364	$\frac{477}{441}$	$\frac{586}{548}$	$\frac{711}{658}$	$\frac{497}{457}$	$\frac{365}{332}$	$\frac{175}{153}$	52	48
1970	77	152	227	350	$\frac{613}{567}$	$\frac{628}{587}$	$\frac{605}{560}$	$\frac{466}{429}$	$\frac{284}{258}$	$\frac{100}{87}$	46	33
1971	57	102	242	442	$\frac{654}{605}$	$\frac{630}{589}$	$\frac{720}{666}$	$\frac{580}{534}$	$\frac{281}{256}$	$\frac{146}{128}$	74	28
1972	86	90	301	374	$\frac{549}{508}$	$\frac{654}{611}$	$\frac{553}{511}$	$\frac{533}{490}$	$\frac{287}{261}$	$\frac{164}{143}$	50	43
1973	79	71	323	387	$\frac{497}{460}$	$\frac{601}{562}$	$\frac{616}{570}$	$\frac{623}{573}$	$\frac{284}{258}$	$\frac{165}{144}$	77	42
1974	63	87	356	484	$\frac{523}{484}$	$\frac{513}{480}$	$\frac{550}{509}$	$\frac{520}{478}$	$\frac{337}{307}$	$\frac{115}{101}$	46	22
1975	49	133	197	277	$\frac{584}{540}$	$\frac{503}{470}$	$\frac{625}{578}$	$\frac{599}{551}$	$\frac{406}{369}$	$\frac{154}{135}$	72	37
1976	79	157	237	424	$\frac{549}{508}$	$\frac{648}{606}$	$\frac{647}{598}$	$\frac{514}{473}$	$\frac{341}{310}$	$\frac{181}{158}$	33	28
1977	67	88	190	275	$\frac{326}{301}$	$\frac{604}{565}$	$\frac{404}{374}$	$\frac{407}{374}$	$\frac{295}{268}$	$\frac{124}{108}$	37	42
1978	58	113	216	385	$\frac{454}{420}$	$\frac{567}{530}$	$\frac{548}{507}$	$\frac{464}{427}$	$\frac{197}{179}$	$\frac{145}{127}$	40	41
1979	55	160	223	415	$\frac{596}{551}$	$\frac{697}{652}$	$\frac{493}{456}$	$\frac{505}{465}$	$\frac{294}{267}$	$\frac{187}{164}$	54	34
1980	73	125	334	379	$\frac{453}{419}$	$\frac{540}{505}$	$\frac{513}{474}$	$\frac{443}{408}$	$\frac{279}{254}$	$\frac{112}{98}$	66	39
1981	65	135	275	398	$\frac{626}{579}$	$\frac{543}{508}$	$\frac{613}{567}$	$\frac{467}{430}$	$\frac{294}{267}$	$\frac{160}{140}$	56	35
1982	52	122	301	359	$\frac{549}{508}$	$\frac{551}{515}$	$\frac{593}{548}$	$\frac{536}{493}$	$\frac{325}{296}$	$\frac{155}{136}$	64	24
1983	34	137	236	371	$\frac{600}{555}$	$\frac{609}{569}$	$\frac{622}{575}$	$\frac{620}{570}$	$\frac{298}{271}$	$\frac{141}{123}$	84	41
1984	54	148	302	505	$\frac{560}{518}$	$\frac{490}{458}$	$\frac{544}{503}$	$\frac{527}{485}$	$\frac{246}{224}$	$\frac{167}{146}$	77	40
1985	82	184	260	387	$\frac{685}{634}$	$\frac{537}{502}$	$\frac{606}{560}$	$\frac{555}{511}$	$\frac{311}{283}$	$\frac{139}{122}$	58	39

Примечание: Q — в числителе, Q_{II} — в знаменателе.

Таблица 3

Изменение проникающей солнечной радиации с глубиной от падающей на водную поверхность Нарочанских озер, $T_0 = Q_z/Q$, %

$Z_{ср}$, м	Глубина, м								
	0,10	0,25	0,50	1,00	2,00	3,00	5,00	7,00	10,00
оз. Нарочь, за безледный период 1962 — 1981 гг.									
9,5—9,0	78,2—77,8	66,9—66,2	60,5—59,6	45,4—44,6	29,1—29,0	20,4—20,3	10,2—10,1	7,1—7,0	3,2—3,1
8,5—8,0	77,3—76,8	65,7—65,3	59,1—58,8	44,3—44,1	28,8—28,7	20,1—20,0	10,0—9,9	6,8—6,7	3,0—2,9
7,8—7,0	76,4—75,4	64,8—64,1	54,5—53,5	43,9—42,6	28,6—27,9	19,4—18,9	9,8—9,4	5,9—5,7	2,6—2,1
6,8—6,0	75,0—73,4	63,5—62,0	52,0—51,4	41,4—40,0	26,4—24,8	18,0—17,3	9,0—8,7	5,3—5,0	2,0—1,8
5,8—5,0	73,1—70,8	61,8—60,4	48,4—46,8	37,3—34,3	24,2—22,3	16,9—14,5	8,4—7,2	3,0—2,1	1,6—1,0
4,9—4,0	70,2—66,8	59,7—56,8	45,1—42,6	33,8—21,3	22,0—13,8	14,3—6,9	7,1—3,4	2,0—0,9	0,8—0,3
3,9—3,0	65,5—60,2	55,7—51,2	41,8—38,4	20,9—19,2	13,6—12,8	6,5—6,0	2,5—2,0	0,8—0,5	0,2—0,1
оз. Мясро, за безледный период 1964 — 1970 гг.									
	0,10	0,25	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	
4,0—3,0	66,8—60,2	50,1—45,1	34,8—31,5	17,4—15,8	4,6—4,0	1,84—1,6	0,55—0,2	0,24—0,1	
2,7—2,0	57,0—45,3	42,7—36,2	31,4—28,0	15,2—11,0	4,0—3,4	1,2—0,8	0,18—0,08	0,06	
1,8—1,5	40,7—38,0	32,6—18,0	18,3—6,7	4,3—1,7	1,8—0,78	0,52—0,1	0,06		
оз. Баторино, за безледный период 1964 — 1970 гг.									
2,0—1,4	45,3—23,9	22,7—12,0	11,4—6,0	2,85—1,5	1,14—1,0	0,24—0,17			
1,3—1,0	18,0—9,1	9,0—4,6	4,5—2,3	1,3—1,0	0,3—0,15	0,03			

этом для характеристики проникающей в водную массу солнечной радиации использован коэффициент пропускания [6, 8]:

$$T_0 = Q_z/Q, \quad \% \quad (5)$$

расчет которого выполнен нами для безледного периода в зависимости от измеренной прозрачности воды в озерах (табл. 3). Из отношения (5) убывание радиации с глубиной определено по экспоненциальному закону Буге: $Q_z = Q_n e^{-\alpha z}$, где Q_z — суммарная радиация, проникающая до глубины Z ; Q_n — поглощенная водой радиация; α — коэффициент ослабления радиации с глубиной, рассчитанный по Ф. Е. Арэ, Д. Н. Толстякову [9]: $\alpha = 2,39/\sqrt{Z_c} + 0,38$ (Z_c — прозрачность по диску Секки), где корреляция $\alpha = f(Z_c)$ равна $r = 0,95$. Расчет коэффициента T_0 выполнен (см. табл. 3) исходя из пределов измеренной прозрачности воды за безледный период и наибольшей прозрачности, которая отмечалась в июне 1963 г. в оз. Нарочь ($Z_c = 9,5$ м), Мястро ($Z_c = 4,0$ м), Баторино ($Z_c = 2,0$ м).

Эффективное излучение. Расходная часть радиационного баланса $E_{эф}$ определяется разностью потоков восходящей ($\delta \sigma T_n^4 + (1 - \delta) E_a$) и нисходящей (E_a) радиации, $E_{эф}$ рассчитана в зависимости от абсолютной влажности воздуха (e_{200}), общей (N_0) и нижней (N_n) облачности, измеренных температур воздуха над поверхностью на высоте 2 м (T_{200}) и поверхности воды (T_n) на испарительной установке оз. Нарочь за безледный период 1974—1981 гг., а также на рейдовых вертикалях оз. Мястро и Баторино — за 1964—1969 гг. по следующей методике.

$$E_{эф} = \delta \sigma T_n^4 + (1 - \delta) E_a - E_a \quad (6)$$

где $\delta = 0,95$ — коэффициент излучательной способности водной поверхности; σ — постоянная Стефана—Больцмана, равная $4,898 \cdot 10^{-9}$ МДж/($m^2 \cdot сут \cdot ^\circ C^4$); E_a — встречное излучение атмосферы [7]: $E_a = \sigma T_{200}^4 (b_1 + b_2)$. Отсюда из выражения (6):

$$E_{эф} = \delta \sigma T_n^4 - \delta \sigma T_{200}^4 (b_1 + b_2) \quad \text{или} \quad E_{эф} = \delta [\sigma T_n^4 - \sigma T_{200}^4 (b_1 + b_2)], \quad (7)$$

где параметры σT_n^4 , σT_{200}^4 , $b_1 = f(e_{200}, N_0)$, $b_2 = f(T_{200}, N_0, N_n)$ определены по таблицам [7]. За остальные годы 25-летнего безледного периода месячные суммы $E_{эф}$ получены из соотношения $E_{эф}/Q_n = d$ по осредненным данным для оз. Нарочь за 1974—1981 гг. и оз. Мястро и Баторино — за 1964—1969 гг. Средние многолетние величины $E_{эф}$ приведены в табл. 4.

Радиационный баланс (остаточная радиация, задерживаемая в деятельном слое озер) получен как разность между Q_n и $E_{эф}$; средние многолетние величины B приведены в табл. 4.

Анализ основных компонентов B в 25-летнем режиме позволяет сделать следующие выводы.

Годовая величина суммарной радиации за 1961—1985 гг. изменяется от 2859 до 4263 (в среднем 3708) МДж/ m^2 . Сумма средних месячных величин Q за безледный период (в октябре — 152, в июне — 609 МДж/ m^2) составляет 74 % годовой, а за май—август — 83 % безледного периода.

Из суммы средних месячных величин $Q = 2753$ МДж/ m^2 за безледный период 92 % поглощается водой озер. В июне—июле рассматриваемого режима Q_n достигала 700—713 МДж/ m^2 . Результаты расчета относительной интенсивности проникающей радиации с глубиной по измеренной прозрачности (см. табл. 3) согласуются с исследованиями К. А. Мокневского и др. [2, 8], выполненными с помощью термоэлектрических пиранометров. При характерной прозрачности вод оз. Нарочь $Z_c = 6,0$ м на глубину 1 м проникает 40 % падающей на поверхность солнечной радиации; этот же процент радиации (при средней Z_c) достигает глубин в оз. Мястро и Баторино 0,25 и 0,10 м соответственно.

Средние месячные суммы $E_{эф}$ наибольшие в июле—августе (см. табл. 4), разница $E_{эф}$ между озерами не превышает 5—10 МДж/ m^2 ;

Средние месячные величины составляющих радиационного баланса Нарочанских озер за безледный период 1961—1985 гг., МДж/м²

Элемент	05	06	07	08	09	10	05—10
оз. Нарочь							
B	383	439	419	327	157	28	1753
$Q(1 - A) = Q_{\Pi}$	510	570	560	481	285	133	2539
$E_{эф}$	127	131	141	154	128	105	786
$E_{эф}/Q_{\Pi} = d$	0,25	0,23	0,25	0,32	0,45	0,79	0,31
оз. Мястро							
B	388	439	419	317	157	30	1750
$Q(1 - A) = Q_{\Pi}$	510	570	560	481	285	133	2539
$E_{эф}$	122	131	141	164	128	103	789
$E_{эф}/Q_{\Pi} = d$	0,24	0,23	0,25	0,34	0,45	0,77	0,31
оз. Баторино							
B	392	445	426	322	160	30	1775
$Q(1 - A) = Q_{\Pi}$	510	570	560	481	285	133	2539
$E_{эф}$	118	125	134	159	125	103	764
$E_{эф}/Q_{\Pi} = d$	0,23	0,22	0,24	0,33	0,44	0,77	0,30

абсолютный максимум в расчетном режиме достигает $E_{эф} = 170—195$ МДж/м². Доля $E_{эф}$ по отношению к величине Q_{Π} в среднем за безледный период составляет 30 %, в мае—июле — почти не меняется (около 25 %), в октябре — увеличивается в три раза, характеризуя начало интенсивного охлаждения водной массы.

За безледный период средний многолетний максимум радиационного баланса Нарочанских озер приходится на июнь, уменьшаясь в октябре почти в 15 раз. Сумма B за период нагревания (май—июль) составляет 71 % суммы за безледный период. Отношение B/Q в среднем за безледный период для озер равно 0,64.

Полученные величины составляющих радиационного баланса могут быть использованы в расчете теплового режима Нарочанских озер, а данные табл. 3 — для оценки интенсивности проникающей радиации с глубиной.

Список литературы

1. Мокневский К. А. // Первичная продукция морей и внутренних вод. Минск, 1961. С. 273.
2. Мокневский К. А., Ковалевская Р. З., Михеева Т. М. // Биологические основы рыбного хозяйства на внутренних водоемах Прибалтики. Минск, 1964. С. 165.
3. Материалы по радиационному режиму Белоруссии: Дополнение к Справочнику по климату СССР. Минск, 1977. Вып. 7. Ч. 1.
4. Таутнева З. Х., Савиковский П. А. Климат курорта Нарочь. Минск, 1985.
5. Гойса Н. П. Уточнение методики расчета суммарной радиации по наблюдениям над облачностью: Тр. УкрНИГМИ. 1961. Вып. 26.
6. Кириллова Т. В. Радиационный режим озер и водохранилищ. Л., 1970. С. 22.
7. Браславский А. П. Исследования и расчеты гидрологического режима озер и водохранилищ. Алма-Ата, 1966. С. 57.
8. Ковалевская Р. З., Мокневский К. А. // Экологическая система Нарочанских озер. Минск, 1985. С. 14.
9. Арэ Ф. Е., Толстяков Д. Н. // Метеорология и гидрология. 1969. № 6.