

УДК 574.5 : 551.465.7 (474.2)

Галина ФИШТЕЙН, Айно МИЙЛЬМЕТС, Март ХЕРМАН

РАСЧЕТ ВОДООБМЕНА В МАТСАЛУСКОМ ЗАЛИВЕ И ЕГО РОЛЬ В БАЛАНСЕ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ

Матсалуский залив является частью Государственного заповедника Матсалу. Этот мелководный залив Балтийского моря защищен от вод открытого моря грядой островов. Часть моря между этими островами, площадью более 2000 км², имеет название Вьянамери (Mardiste, 1970). В Матсалуский залив впадает несколько рек. Более 90% воды приносится рекой Казари, которая впадает в восточную часть залива (Ресурсы..., 1972).

В ряде работ (Ярвекюльг, 1979; Симм, 1985 и др.) отмечается, что водами р. Казари и ее притоков в залив приходят большие количества биогенных веществ. Содержание таких биогенных веществ, как азот и фосфор, неоднократно измерялось сотрудниками сектора морской биологии Института Зоологии и Ботаники АН ЭССР (Porgasaar, Viik, 1984; Porgasaar, 1985). В названных работах указывается, что уровень вноса биогенных веществ в залив характеризуют данные анализа проб воды, отобранных в объединенном русле рек Казари, Лийви, Пенйыги, Суйтсу. По расчетам А. Ярвекюльга и В. Поргасаар (Järvekülg, Porgasaar, 1983) в Матсалуский залив с поверхностными водами вносится 70 т фосфора и 1200 т азота. Пути передвижения биогенного вещества в заливе до сих пор мало изучены. Очевидно, что часть его поступает на баланс экосистемы залива, а часть выносится течением в Вьянамери. Для оценки количества поступающего в Вьянамери вещества необходимо знать закономерности водообмена в Матсалуском заливе.

В настоящей работе приводится расчет водообмена в Матсалуском заливе и дается оценка его роли в переносе биогенных веществ на примере минерального азота.

Климатические условия в Матсалу лучше всего характеризуются данными Хаапсалуской метеостанции (Eirge, Pärn, 1982). Кроме того, мы располагаем данными метеостанции, расположенной на территории заповедника в Пенйыэ, где наблюдения ведутся с 1976 г. (нами использованы сведения об осадках, скорости и направлении ветра). Ряд данных и сведений, необходимых для расчетов, были получены из литературных источников: дефицит влажности по измерениям метеостанции Хаапсалу и расход воды для реки Казари (Eirge, Pärn, 1982), результаты батиграфии залива (Lutt, Kask, 1980; Ярвекюльг, 1979) и характеристика гидрогеологических условий на территории Матсалуского заповедника (Кааге и др., 1980). Сведения, позволяющие выявить характер взаимодействия вод залива с водами моря получены из работ (Mardiste, 1970; Осадкообразование..., 1981; Черновская и др., 1965; Орвику, 1974; Хупфер, 1982; Гидрогеология СССР, 1966; Ресурсы..., 1972 и др.).

Методика

Сток из залива в море (S), вызванный градиентом высот, может быть выражен следующим балансовым уравнением:

$$S = (U_1 - U_2) + P + G + R - E - I,$$

где $U_1 - U_2$ — объем воды на создание градиента высот, P — речной приток, G — грунтовый приток, R — осадки на поверхности водоема, E — испарение с поверхности водоема, I — инфильтрация через ложе.

В период ледового покрытия $S = (U_1 - U_2) + P - I$,
во время ледохода (12—22 апреля)

$$S = P + \sum_{r=1}^a R_n - \sum_{n=1}^a E_n - I,$$

где a — период ледового покрытия. Для Матсалуского залива a продолжается с середины декабря до середины апреля. Интенсивность водообмена определяется в динамике с временным интервалом один месяц.

Месячное количество осадков находили через умножение среднесуточного количества осадков (r) на площадь водного зеркала (s) и на количество суток в месяце (t)

$$R = r \cdot s \cdot t.$$

Объем испарения вычисляли по формуле

$$E = e \cdot s \cdot t,$$

где e — среднесуточное испарение, учитывающее дефицит влажности ($e_0 - e_2$) и скорость ветра (w_2) (Указание . . . , 1969)

$$e = \frac{0,14(e_0 - e_2)(1 + 0,72w_2)}{1000}.$$

Расчет грунтового притока G затруднен из-за недостаточной изученности вопроса. Т. Кааре и др. (Кааге и др., 1980) сообщают, что грунтовое питание осуществляется напорными водами с южной стороны залива (Кааге и др., 1980). Приблизительная оценка G составляет $> 10 \cdot 10^6$ м³ в год. Если это соответствует действительности, то объем G в балансе воды залива незначителен. I тоже по всей вероятности низка, так как ложе залива подстилают водонепроницаемые ленточные глины. Исходя из сказанного, при расчете поверхностного стока допустим, что $G = 0$ и $I = 0$. ($U_1 - U_2$) из особенностей строения ложа залива в первом приближении можно также принять равным нулю.

Таким образом,

$$S = P + \left[r - \frac{0,14(e_0 - e_2)(1 + 0,72w_2)}{1000} \right] \cdot s \cdot t.$$

В водообмене залива с Вьянамери слабо участвуют прибрежные воды и воды бухт. Основной поток формируется на сечении шириной в 3 км, что составляет $100 \cdot 10^6$ м³ воды. Для этого потока рассчитали мгновенную максимально возможную скорость (v_{\max})

$$v_{\max} = \mu_1 \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{l}},$$

где g — ускорение свободного падения (9,81 м/с), l — длина залива, $\frac{h_1 - h_2}{l}$ — прирост высоты на одном метре, μ_1 — коэффициент обтекаемости. Ожидаемая скорость (v_0)

$$v_0 = \frac{S}{A \cdot t},$$

где A — площадь сечения активного потока за отрезок времени t .

Судя по литературным данным (Вильбасте, 1982 и др.) и собственным наблюдениям, существенное влияние на водообмен, выражающееся в перемещении масс морских вод в восточную часть залива, оказывает ветер. Анализ данных, приведенных в работе Х. Мардисте (Mardiste, 1970) показывает, что заходящие в Матсалуский залив течения вызываются западными и юго-западными ветрами. Ветер со скоростью 7 м/с вызывает поток (v_1) со скоростью 0,1 м/с. Итак,

$$v_1 = 0,0143 \cdot \omega_2.$$

При движении потока из моря в залив происходит уменьшение его скорости рассеканием мысами у устья залива и преодолением градиента высот. С учетом этого, ожидаемая скорость потока (v_0), с поправкой на ветер

$$v_0 = \frac{S}{A \cdot t} - (\mu_2 \cdot 0,0143 \omega_2 - v_{\max}),$$

где μ_2 — коэффициент обтекаемости ($0 < \mu_2 \leq 1$).

Таблица 1

Периоды (B_i) и скорость западных и юго-западных ветров в 1981 г.

Месяц	B_i в декаду, сут	Продолжительность ветра (сут) со скоростью					
		2—4 м/с	4—6 м/с	6—8 м/с	8—10 м/с	10 м/с	15 м/с
Апрель	$B_I = 4$	4					
Май	$B_I = 2$		2				
Июнь	$B_I = 4$			2		2	
	$B_{II} = 4$	1	2				1
	$B_{III} = 2$		2				
Июль	$B_I = 3$					3	
	$B_{II} = 3$	2			1		
	$B_{III} = 5$	1	1	1	2		
	$B_{IV} = 1$			1			
Август	$B_I = 2$	1			1		
	$B_{II} = 3$	2	1				
	$B_{III} = 6$	1	1	2	2	1	
	$B_{IV} = 3$	1					
Сентябрь	$B_I = 6$	2	3				1
Октябрь	$B_I = 2$	4	3		1		1
	$B_{II} = 7$						
Ноябрь	$B_I = 4$		1		1	1	1

Предварительный анализ влияния ветра на водообмен показал, что течение воды вызывается ветром со скоростью не менее 3 м/с и продолжительностью не менее 4—5 сут. В течение месяца может быть несколько периодов (B_i) с преобладанием ветров, вызывающих течения вод в восточном направлении. Данные продолжительности периодов западных и юго-западных ветров и их скорости в 1981 г. (табл. 1) использованы в расчете среднemesячного водообмена (\bar{v}_0)

$$\bar{v}_0 = \frac{S}{A \cdot t} \frac{v_3 \cdot B_{I3} + v_5 \cdot B_{II5} + \dots + v_n \cdot B_{in}}{B_{I3} + B_{II5} + \dots + B_{in}},$$

где v_3, v_5, \dots, v_n — скорость потока, вызванного ветром со скоростью 3, 5, \dots, n м/с ($3 \leq n \leq 17$) за периоды $B_{I3}, B_{II5}, \dots, B_{in}$.

При анализе биологических процессов в проточных водоемах в связи с трансформацией аллохтонных биогенных веществ важной является

продолжительность полного водообмена. Этот показатель дает представление о максимальной продолжительности присутствия биогенов в воде, обусловленной абиотическими факторами. Полный водообмен (T) вычисляли делением расстояния (равное длине залива l), которое должен пройти поток на его среднюю скорость

$$T = \frac{l}{\bar{v}_0 \cdot 86400}$$

T может принимать отрицательные значения в случае, если скорость встречного течения из моря больше скорости течения из залива.

Для оценки данных анализов качества вод в заливе необходимо рассчитать зону влияния морских вод (M) в период ветрового нагона воды. Это можно сделать через рассчитанное значение T :

$$M_i = \frac{B_i \cdot l}{T_i}$$

тогда среднемесячная ожидаемая зона влияния моря будет составлять

$$\bar{M} = \frac{M_I \cdot B_I + M_{II} \cdot B_{II} + \dots + M_i B_i}{t}$$

Основываясь на расчете параметров водообмена в заливе был рассчитан баланс минерального азота, содержание которого в водах залива зависит от его поступления водами рек (N_1P), от потребления организмами (N_2F) и от выноса в море (N_3S)

$$N_1P = N_2F + N_3S.$$

Для определения вноса и выноса веществ необходимы данные о содержании этих веществ в воде объединенного канала Казари и в устье залива на границе зоны влияния моря. В период с мая по сентябрь (1981 г.) такие измерения проведены В. Поргасаар и М. Вийк (Porgasaar, Viik, 1984). Эти данные использованы и в наших расчетах. Однако отсутствуют данные на период октябрь—апрель. Т. Эйпре и М. Пярн (Eipre, Pärn, 1982) приводят средние многолетних наблюдений качества вод для холодного периода (гидропост у моста р. Казари). За неимением других, нами использованы эти многолетние средние. По содержанию биогенов в устье залива данные отсутствуют, поэтому пришлось провести теоретическое определение содержания биогенов в устье залива в холодный период года с помощью нижеприведенного уравнения:

$$N_{3(i+1)} = \frac{N_{3i}V + N_{1(i+1)}P_{(i+1)}}{V_i + P_{(i+1)}}$$

где N_{3i} — концентрация азота в воде, вытекающей в море в i месяце, $N_{3(i+1)}$ — концентрация азота в воде, вытекающей в море в $i+1$ месяце, $N_{1(i+1)}$ — концентрация азота в речном стоке в $(i+1)$ месяце, $P_{(i+1)}$ — речной сток в $(i+1)$ месяце, V — объем воды в заливе.

Таблица 2

Содержание минерального азота в поступающих (N_1) и выносимых (N_3) из залива водах, г/м³

	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
N_1	2,5	2,5	2,5	2,0	0,9	0,6	0,6	0,5	0,8	0,8	0,8	0,8
N_3	1,1	1,6	1,8	1,9	0,3	0	0	0	0	0,4	0,4	0,4

Коэффициенты расчета водообмена

Коэффициенты	Значение	Источник
Площадь водного зеркала (s)	$86 \cdot 10^6 \text{ м}^2$	Картографический материал
Длина залива (l)	19000 м	„
Объем воды в заливе (V)	$135 \cdot 10^6 \text{ м}^3$	„
Разница высот уровня моря в восточной части залива и в Вьянамери ($h_1 - h_2$)	0,8 м	Ерге, Рәгп, 1982
Площадь сечения активного потока (A)	4500 м^2	Расчет по картографическому материалу
Коэффициенты обтекаемости		
μ_1	1	Допущение автора
μ_2	0,7	„

Следует подчеркнуть, что такой способ расчета N_3 приемлем только для холодного периода года, когда снижена активность фотосинтеза. Расчетная N_3 меньше фактической на величину $(N_4 - N_2) > 0$, где N_4 — азот, выделившийся при разложении органического вещества (табл. 2 и 3).

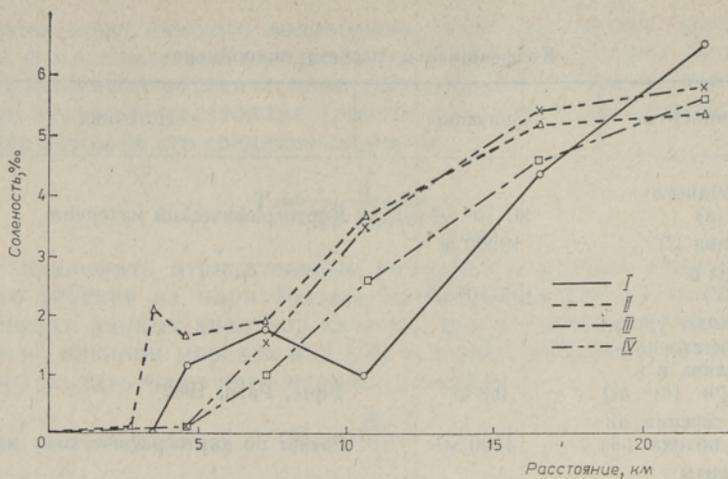
Результаты и обсуждение

Расчетный среднесуточный режим водообмена приведен в табл. 4. Положительные значения \bar{v}_0 и \bar{T} означают, что поток был направлен из залива в Вьянамери, а отрицательные — из Вьянамери в залив. Полу-

Таблица 4

Характеристика водообмена в заливе с учетом влияния ветра в 1981 г.

Месяц	B_i в декаду, сут	v_{0i} , м/с	T_i , сут	M_i , км	\bar{v}_0 , м/с	\bar{T} , сут	\bar{M} , км
Январь					0,004	55	0
Февраль					0,006	37	0
Март					0,002	110	0
Апрель	$B_I = 4$				0,027	8,5	0
Май	$B_I = 2$	-0,008	-27	1,3	0,01	22	0,1
Июнь	$B_I = 4$	-0,065	-3,3	23			
	$B_{II} = 4$	-0,054	-3,9	20	-0,013	-18	5,7
	$B_{III} = 2$	-0,014	-15,5	2,5			
Июль	$B_I = 3$	-0,098	-2,3	28			
	$B_{II} = 3$	-0,025	-9,3	6,1	-0,018	-12	6,2
	$B_{III} = 5$	-0,037	-6,2	16			
	$B_{IV} = 1$	-0,040	-5,4	3,5			
Август	$B_I = 3$	-0,028	-7	5,3			
	$B_{II} = 3$	-0,005	-44	1,2	-0,007	-32	5
	$B_{III} = 6$	-0,046	-5	23			
	$B_{IV} = 3$	-0,008	-27,5	2			
Сентябрь	$B_I = 6$	-0,014	-15,7	7,2	0,010	22	1,4
Октябрь	$B_I = 2$	-0,087	-2,3	17,0	0,006	36,7	1
	$B_{II} = 7$	0		0			
Ноябрь	$B_I = 4$	0,012	18,3	0	0,018	12	0
Декабрь					0,012	18,3	0



Изменение солёности воды в Матсалуском заливе в 1981 г. от устья реки Казари до Вьянамери (по данным Porgasaar, Viik, 1984). I — май, II — июнь, III — июль, IV — август.

Таблица 5

Зоны влияния вод Вьянамери

Продолжительность ветра (сут) со скоростью		Зона влияния (M) (расстояние от устья залива), км	Примечания
5 м/с	9 м/с		
2,9	1,0	≤ 5	Заливается пойма Казари
5,8	1,9	≤ 10	
8,7	2,7	≤ 15	
11	3,6	≤ 19	
> 11	> 3,6	> 19	

Таблица 6

Баланс минеральных форм азота в заливе

Месяц	Элемент баланса, т		
	Поступило с водами Казари	Ушло в море	Осталось в заливе
I	93,5	62,0	31,5
II	150,0	121,0	29,0
III	62,5	50,0	12,0
IV	510,0	670,0	-160,0
V	85,5	0,5	85,0
VI	33,0	0	33,0
VII	13,2	0	13,2
VIII	44,0	0	44,0
IX	124,0	9,0	115,0
X	104,0	32,0	72,0
XI	176,0	150,0	26,0
XII	104,5	118,0	-14,0
Итого, т	1420	1213	207
„ %	100	86	14

ченная картина водообмена качественно совпадает с иллюстрацией распространения соленых вод в заливе в 1981 г. (рисунок). Это же подтверждает расчет вероятной зоны распространения вод Вяйнамери в заливе в зависимости от скорости ветра (табл. 5). Ветер со скоростью 9 м/с продолжительностью 3—4 сут осуществляет нагон воды, приводящий к затоплению поймы р. Казари.

Баланс минеральных форм азота в заливе приведен в табл. 6. Для апреля и декабря такой элемент баланса, как остаток, получился отрицательным, так как в названные месяцы внос был меньше выноса. Следовательно, если в предыдущие месяцы произошло некоторое накопление биогенов в заливе, то в месяцы с отрицательным значением остатка накопленное вещество могло быть вынесено в море. Минеральный азот, поступивший в залив в вегетационный период растений практически весь остался в заливе. Такой же вывод вытекает из фактических данных, приведенных В. Поргасаар и М. Вийк (Porgasaar, Viik, 1984).

Элементы баланса азота в заливе сильно различаются посезонно. Это обусловлено биологическим потреблением азота в период вегетации водных растений (макрофитов и фитопланктона) и отсутствием этого процесса в холодное время года.

Выводы

1. По среднегодовым параметрам водообмена в Матсалуском заливе установлено, что скорость потока без учета ветрового нагона воды равна 0,007 м/с, а продолжительность водообмена 32 сут, с учетом ветрового нагона — 0,005 м/с и 43 сут соответственно.

2. Ежемесячный анализ мощности ветрового нагона воды из Вяйнамери в залив показывает, что при отсутствии ледового покрова в залив постоянно поступает вода из Вяйнамери. Зона влияния Вяйнамери в среднем распространяется на 1—5 км вглубь залива. Это явление необходимо учитывать при интерпретации фактических данных измерения качества вод в заливе.

3. Элементы баланса биогенных веществ значительно различаются по месяцам. Так в ноябре, декабре, феврале и апреле 1981 г. большую долю в балансе азота составлял азот, вынесенный с потоком в Вяйнамери (118—670 т), а в мае—октябре — оставшийся в заливе (13—85 т).

4. Большая часть поступивших за год в залив биогенных веществ выносится с потоком в море (более 80%).

5. Баланс, приведенный в данной работе, может служить как ориентировочный. Ввиду отсутствия достаточного объема фактического материала по содержанию биогенов на входе и выходе из залива, составить в настоящий момент более достоверный баланс не видится возможным.

6. Для усовершенствования методики расчета передвижения биогенов необходимо более точно определить зависимость скорости потока от скорости ветра, измерить глубину этого потока, точнее определить ширину потока в заливе и еще ряд других величин. Однако уже в представленном виде методику можно использовать для расчета протока воды и переноса растворенного вещества в заливе.

ЛИТЕРАТУРА

- Вильбасте С. Видовой состав и сезонная динамика микрофитобентоса Матсалуской бухты. — Изв. АН ЭССР. Биол., 1982, 31, № 3, 233—243.
- Гидрогеология СССР. XXX. М., 1966, 302.
- Орвику К. Морские берега Эстонии. Таллин, 1974, 112.
- Осадкообразование в Балтийском море. М., 1981, 247.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. 4. Вып. 1. Л., 1972, 554.

- Симм Х. Интеграция научных исследований в целях защиты внутренних вод. — Изв. АН ЭССР. Биол., 1985, 34, № 2, 85—93.
- Указание по расчету испарения с поверхности водоемов. Л., 1969.
- Хупфер П. Балтика — маленькое море, большие проблемы. Л., 1982.
- Черновская Е. Н., Пастухова Н. М., Буйневич А. Г., Кудряцева М. Э., Ауниньш Э. А. Гидрохимический режим Балтийского моря. Л., 1965.
- Ярвекюльг А. Донная фауна восточной части Балтийского моря. Таллин, 1979, 382.
- Eipre, T., Pärn, M. Matsalu Riiklik Looduskaitseala ja selle ümbruse kliima ning veerežiim. — Rmt.: Eesti NSV riiklike looduskaitsealade teaduslikud tööd. III. Tallinn, 1982, 4—42.
- Kaare, T., Kink, H., Lust, E. Hüdrokeoloogilistest tehistingimustest Matsalu märgala piirkonnas. — Rmt.: Loodusvaatlusi 1978. Tallinn, 1980, 161—165.
- Lutt, J., Kask, J. Matsalu lahe põhjasetted. — Rmt.: Loodusvaatlusi 1978, 1. Tallinn, 1980, 166—178.
- Mardiste, H. Väinameri. — Rmt.: Lääne-Eesti rannikualade loodus. Tallinn, 1970, 7—15.
- Porgasaar, V. Matsalu lahe vee füüsikalised ja keemilised omadused ning nende seos klorofüllüüli a sisaldusega. — ENSV TA Toim. Biol., 1985, 34, N 2, 119—130.
- Porgasaar, V., Viik, M. Biogeenide sisalduse sesoonne dünaamika Matsalu lahe vees 1981. a. vegetatsiooniperioodil. — Rmt.: Loodusvaatlusi 1981. Tallinn, 1984, 158—167.
- Järvekülg, A., Porgasaar, V. Biogeenide elementide summaarne stssevool Matsalu lahte jõgede kaudu valgalalt. — Põllumajanduslikust maakasutusest Matsalu märgala vesikonnas. Käsikiri. ENSV TA Zooloogia ja Botaanika Instituut. Tartu, 1983.

Управление охраны природы
Министерства лесного хозяйства и
охраны природы ЭССР

Поступила в редакцию
12/XII 1984

Переработанный вариант
27/VIII 1985

Galina FISTEIN, Aino MIILMETS, Mart HERMAN

MATSALU LAHE VEEVAHETUSE ARVUTUS JA MÕJU BIOGEENSETE AINETE BILANSILE

Käesolev töö annab Matsalu lahe veevahetuse ja biogeenide ainete edasilükkumise arvutuse meetodika. Käsitletakse võimalust arvestada tuulte mõju veevahetuse kestusele.

Lahe veevahetuse parameetrite arvutus on teostatud tuulte mõju silmas pidades. Matsalu lahte sattuvatest biogeenide ainete kogustest üle 80% kantakse edasi merre. Arvutus on tehtud mineraalse lämmastiku näitel.

Galina FISHTEIN, Aino MIILMETS, Mart HERMAN

A CALCULATION OF WATER EXCHANGE IN MATSALU BAY AND ITS ROLE IN A BIOGENIC SUBSTANCE BALANCE

A method of calculating water exchange and transfer of biogenic substance in Matsalu Bay is given in the paper. A possibility of calculating the influence of wind on duration of water exchange is considered.

The calculation of parameters of water exchange taking into account the influence of wind was performed. It appears that the average duration of water exchange is 43 days a year. It has been shown that more than 80% of the biogenic substance mass which was brought into the bay by rivers during a year was carried out into the sea.