

Беломорская биологическая станция МГУ  
Институт океанологии РАН

Комплексные исследования  
Бабьего моря,  
полуизолированной  
беломорской лагуны:  
геология, гидрология, биота —  
изменения на фоне  
трансгрессии берегов

(Труды Беломорской биостанции МГУ т. 12)

*Под общей редакцией  
В.О. Мокиевского, А.И. Исаченко,  
П.Ю. Дгебуадзе, А.Б. Цетлина*

Товарищество научных изданий КМК  
Москва ❖ 2016

# Предварительные соображения о темпах водообмена Бабьего моря

*А.Д. Наумов*

Беломорская биостанция Зоологического института РАН

## Preliminary consideration on the rate of water-exchange of the Babye More Lagoon

*A.D. Naumov*

Рассмотрен вопрос о возможных темпах водообмена Бабьего моря и механизмах формирования структуры его вод. Предположительное время полуобмена составляет около 3 лет.

The probable rate of water exchange in the Babye More Lagoon and forming of its water structure are discussed. Conjectural period of the exchange half-value was estimated equal of about 3 years.

Цель настоящей заметки состоит не в том, чтобы ответить на вопрос, анонсированный в заголовке, а поставить задачу и привлечь интерес к важнейшему процессу, определяющему гидрологические и гидробиологические особенности уникального водоема, аналогов которому на Белом море почти нет.

На современном уровне наших знаний рассмотреть вопрос об особенностях и темпах водообмена Бабьего моря можно только очень приблизительно, потому что в нашем распоряжении нет данных о вертикальном распределении температуры и солености в период ледостава, мы имеем очень ограниченные сведения о пресном стоке и можем только догадываться о его годовой динамике.

В любом полузамкнутом морском водоеме, соединенном с приливным морем, водообмен определяется энергией приливов и объемом пресного стока, который вызывает компенсационное противотечение, равное ему по объему. Таким образом, общий объем аллохтонных вод, втекающих в водоем за год равен двойному объему пресного стока. Эти поступающие в водоем воды смешиваются с уже в нем имеющимися, поэтому корректные способы расчетов должны учитывать процессы смешения. Обозначим объем водоема через  $V$ , а объем втекающих в него за год аллохтонных вод через  $V_{\text{ex}}$ . Принимая, что поступающая новая вода полностью смешивается со старой, и из водоема вытекают перемешанные воды, можно считать, что в единицу времени  $t$  водный бассейн будет терять определенную долю исходных вод, равную  $k_{\text{ex}} = V_{\text{ex}}/V$ , где  $k_{\text{ex}}$  — коэффициент. Тогда модель водообмена принимает вид:

$$\lambda = 1,56\tau^2 \tag{1}$$

Интегрируя, получаем:

$$\int \frac{dV}{V} = -k_{\text{ex}} \int dt. \quad (2)$$

Отсюда:

$$\ln V = C - k_{\text{ex}} t, \quad (3)$$

где  $C$  — константа интегрирования. Полагая  $C = \ln V_0$ , находим решение уравнения (1):

$$V = V_0 e^{-k_{\text{ex}} t}, \quad (4)$$

где  $V_0$  — объем бассейна,  $V$  — остаточный объем обменивающихся вод, а  $e$  — основание натуральных логарифмов.

Аналогичные модели используют довольно часто. Достаточно сказать, что так же рассчитывают темп распада радиоактивных элементов, выведение из организма фармакологических препаратов и ряд других процессов, в которых исходная характеристика за единицу времени изменяется пропорционально ее текущей величине.

Как следует из формулы (4), остаточный объем старой воды будет с течением времени экспоненциально уменьшаться. Поскольку экспоненциальный процесс не достигает нуля, а лишь асимптотически к нему приближается, время, за которое в водоеме совершенно не останется исходной воды, вычислено быть не может. Обычно для таких процессов стандартом принимается время, требующееся для того, чтобы исходная характеристика изменилась вдвое (на этом основаны, в частности, понятия времени полураспада радиоактивных изотопов, времени полувыведения лекарственных препаратов и т.п.). Следовательно, вопрос о полной смене воды морского водоема при условии смешения старых и новых вод нельзя считать поставленным корректно, однако его большая практическая значимость заставляет найти некое разумное приближение. В качестве такового условно примем, что при разведении старой воды в  $10^6$  раз процесс ее обновления завершается.

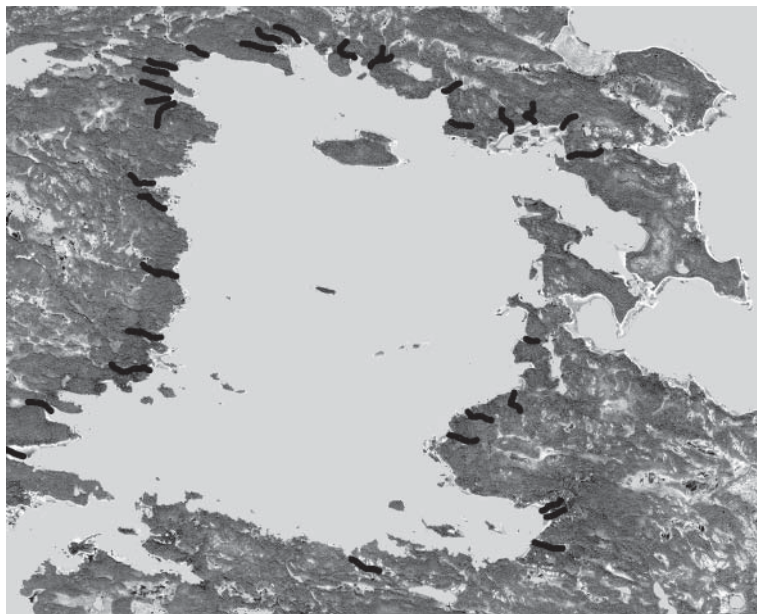
Поскольку с течением времени объем воды, находившейся в водоеме в начальный момент, уменьшается пропорционально  $1/e$ , то, умножая величину, обратную  $k_{\text{ex}}$ , на натуральный логарифм какого-либо числа, мы получим время, за которое во столько же раз в водоеме сократится объем воды, находившийся в нем до начала процесса водообмена. Нас будет интересовать время полуобмена и время разведения старой воды в миллион раз, которое мы условно приняли за срок полного обновления.

Объем и площадь Бабьего моря были измерены по навигационной карте «Южная часть Кандалакшского залива» и были приняты равными соответственно  $0,36 \text{ км}^3$  и  $40 \text{ км}^2$ .

Судя по карте Google, в Бабье море втекает около 30 ручьев\* (рис. 1), самый крупный из которых — Коржавин, впадающий в северо-западный угол водоема. По-видимому, с Коржавиным ручьем сравним еще один, устье которого расположено на юго-востоке в куту Белой губы (Соколова 1934). Кроме того, нельзя забывать, что существует еще трудно учитываемый сток почвенных вод.

Расход Коржавина ручья был измерен поплавковым методом в июле 2014 г. и оказался равным  $62210 \text{ м}^3/\text{сутки}$ . Во всех последующих расчетах я опираюсь на это

\* На зимних снимках видно, что часть из них не замерзает.



**Рис. 1.** Впадающие в Бабье море ручьи (выделены черной жирной линией). Картографическая основа — Google Maps.

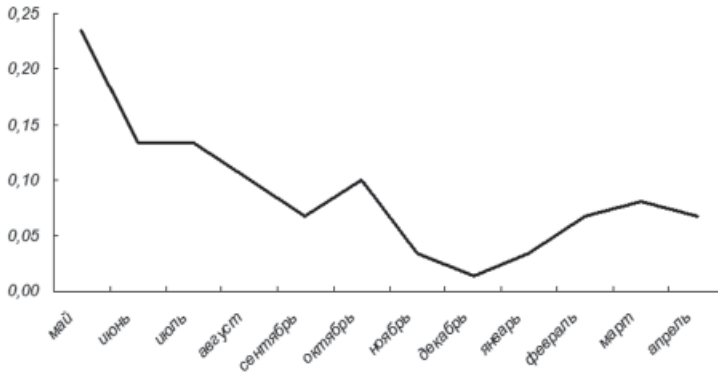
измерение, поскольку никаких других данных об объеме берегового стока в Бабье море не существует. Нет сведений и о его годовой динамике, однако можно сделать достаточно оправданное предположение, что эта последняя подчиняется общим для всего Белого моря закономерностям, которые рассмотрены рядом авторов, получивших весьма сходные результаты (см., напр., Елисов, 1997; Ivanov, Brizgalo, 2005).

Считая, что годовая динамика стока по всему Белому морю в относительных величинах одинакова, на основании данных В.В. Елисова (1997)\* (рис. 2) можно рассчитать годовой сток Коржавина ручья. Он оказывается равным  $0,023 \text{ км}^3/\text{год}$ . Поскольку все остальные ручьи, впадающие в Бабье море, заметно меньше Коржавина, можно в первом приближении считать, что он поставляет в водоем приблизительно половину общего стока, который, исходя из упомянутого измерения, оценим в  $0,046 \text{ км}^3$ . Это значит, всего в лагуну за год втекает  $0,092 \text{ км}^3$  аллохтонных вод, пресных, и поступающих в составе компенсационного противотечения. Теперь у нас есть все необходимые данные для предварительного расчета темпов водообмена Бабьего моря. Рассчитав значение коэффициента  $k_{\text{ex}}$ , получаем, что время полубообмена вод лагуны составляет около 3 лет, а срок полной смены (принятой как разведение исходных вод в миллион раз) — 55 лет.

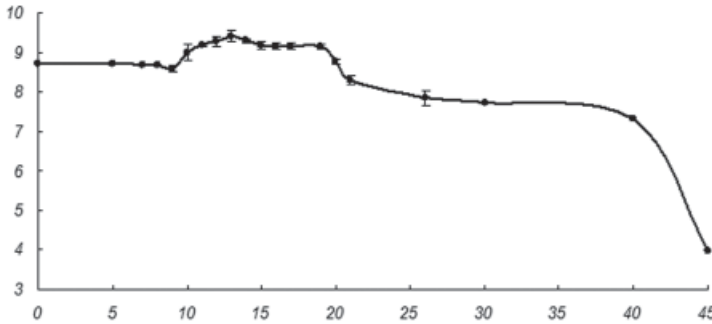
Полученные результаты следует считать минимальными сроками, так как проведенные расчеты не учитывают ни стратификации вод Бабьего моря, ни различий в летнем и зимнем водообменах. Между тем первое, безусловно, должно вызывать второе.

Вертикальное распределение термогалинных индексов в летние месяцы для Бабьего моря неплохо изучено (Соколова, 1934; Наумов, Мартынова, 2016; Пантюлин,

\* Эта работа была выбрана как содержащая наиболее полные сведения.



**Рис. 2.** Динамика годового стока в Белое море по данным В.В. Елисова (1997). По оси абсцисс — время, месяцы (за начало цикла динамики принят май как первый месяц безледного периода); по оси ординат — объем стока в долях единицы от годового.



**Рис. 3.** Содержание кислорода в водах Бабьего моря в июле 2014 г. Вертикальными отрезками показана статистическая ошибка (для некоторых точек, представленных единичными измерениями, ошибки нет). По оси абсцисс — глубина, м; по оси ординат — содержание кислорода (мг/л).

2016). Имеется верхний относительно распресненный и прогретый слой воды, подверженный ветровому перемешиванию, что определяет глубину залегания пикноклина. Она составляет около 10 м, в чем сходятся все названные выше авторы. Между тем, наши исследования и в июле 2014 г. показали, что статистически достоверный максимум содержания кислорода\* приходится на глубины от 10 до 20 м (рис. 3), то есть, глубже. Это может указывать на то, что воды Городецкого порога, высоко азрированные интенсивным турбулентным перемешиванием, возникающим в приливном течении из-за сложного рельефа дна, втекают в Бабье море ниже пикноклина. Не исключено, что они участвуют и в его формировании. К сожалению, данные о температуре и солености вод порога отсутствуют, и поэтому определить, на какой глубине залегают изопикничные им воды внутренней акватории Бабьего моря, невозможно. В любом случае можно почти с полной уверенностью утверждать, что в летнем водообмене участвуют только поверхностные слои воды изучаемой лагуны до глубины приблизительно 20 м.

\* Измерение содержания кислорода в воде производилось с помощью оксиметра «Марк 302Э».

Рассмотрим возможные зимние условия водообмена.

Принимая период ледостава с ноября по апрель включительно, объем зимнего стока тоже можно вычислить на основании тех же данных В.В. Елисова (1997). Этот объем равен  $0,007 \text{ км}^3$ . Это дает основания рассчитать, что только один Коржавин ручей за зиму поставляет такое количество пресной воды, что ее подледный слой без учета приливного перемешивания достигает 17 см в пересчете на всю акваторию. Это значит, что, даже с учетом перемешивания, подо льдом неминуемо образуется достаточно мощный опресненный поверхностный слой, который должен препятствовать зимней конвекции.

С другой стороны, зимой воды Ругозерской губы остывают, а соленость их за счет снижения берегового стока должна повышаться. В результате входящее в Бабье море компенсационное противотечение, скорее всего, стекает вниз по уклону дна и формирует глубинный холодный и осолоненный слой, который мы и наблюдаем в течение всего года (Соколова, 1934; Наумов, Мартынова, 2016; Пантюлин, 2016).

Таким образом, есть все основания считать, что зимний водообмен должен существенно отличаться от летнего, иначе воды Бабьего моря не будут столь отчетливо стратифицированы по солености и температуре, и на его глубинах летом не будет холодной и соленой воды. Из сказанного следует также, что обмен вод Бабьего моря в течение всего года и формирование их структуры надо предполагать результатом в основном адвективных процессов. Второе следствие заключается в том, что поскольку водоем расслоен, и водообмены верхнего и нижнего слоев по необходимости должны различаться и протекать в разное время года, полученная нами предварительная величина темпов общего водообмена заведомо занижена (или завышена, если реальный сток существенно больше предположительного). Гораздо корректнее было бы рассматривать темпы водообмена послойно, поскольку поверхностный и глубинный слои имеют разный объем, в них в течение года поступает разное количество аллохтонных вод (причем различных по происхождению), да и продолжительность летних и зимних процессов не совпадает. Для всего этого, к сожалению, катастрофически не хватает фактического материала, в особенности данных о зимней структуре вод и истинном объеме пресного стока.

Остается надеяться, что такой материал рано или поздно будет получен.

Я благодарен руководству Кандалакшского государственного природного заповедника за разрешение работать на акватории Бабьего моря, директору Беломорской биостанции МГУ профессору А.Б. Цетлину за теплый прием и предоставленную возможность воспользоваться судами ББС МГУ, к.б.н. Д.А. Воронову за неоценимую помощь в получении данных по вертикальным профилям содержания в воде кислорода, к.б.н. Е.Д. Красновой за математическую обработку этого материала, А.В. Макарову за обеспечение работ в Бабьем море летом 2014 г., а также О.Н. Савченко за помощь в измерении расхода Коржавина ручья и обработке картографического материала. Особая благодарность экипажу НИС «Студент» во главе с его капитаном А.С. Козловым.

## Литература

- Елисов В.В. 1997. Оценка водного, теплового и солевого балансов Белого моря // Метеорология и гидрология. № 9. С.83–93.
- Наумов А.Д., Мартынова Д.М. 2016. Летняя структура вод Бабьего моря и возможные пути ее формирования // Комплексные исследования Бабьего моря, полуизолированной бе-

- ломорской лагуны. Геология, гидрология, биота: изменения на фоне трансгрессии берегов. Тр. Беломорской биостанции МГУ. Т.12. М.: Т-во науч. изданий КМК. С.55–67.
- Соколова Е.В. 1934. Материалы к гидрологии Бабьего моря // Исслед. морей СССР. Т.20. Работы Беломорской методологической станции ГГИ. № 2. С.33–42.
- Пантюлин А.Н. 2016. Особенности структуры вод в Бабьем море и условия ее формирования // Комплексные исследования Бабьего моря, полуизолированной беломорской лагуны. Геология, гидрология, биота: изменения на фоне трансгрессии берегов. Тр. Беломорской биостанции МГУ. Т.12. М.: Т-во науч. изданий КМК. С.48–54.
- Ivanov V.V., Brizgalo V.A. 2005. Watershed hydrology // N.N. Filatov et al. (eds.). White Sea. Its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change. Chichester: Springer-Praxis Publ. P.15–47.

Карта

Южная часть Кандалакшского залива № 657. 1962 г. Масштаб по экватору 1:245170.

Ресурс Интернета Google Карты <https://www.google.ru/maps/@66.6032254,33.1893051,9731m/data=!3m1!1e3?hl=ru>