



УДК 550.46;556

В. Я. Чугаевич

ПОЛОЖЕНИЕ ГРАНИЦЫ ОТКРЫТОГО МОРЯ  
ПО ГИДРОХИМИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ  
ЛЕТОМ-ОСЕНЬЮ 2006 ГОДА

Как известно [1], изменчивость природных объектов океана, являясь их неотъемлемым свойством, сосредоточена в сравнительно узких зонах трансформации вещества и энергии, представляющих граничные участки. Эти активные поверхности, где происходит скачок в свойствах процессов, получили название барьерных зон, которые более или менее изучены для океана или открытых морей, но почти совсем не рассматривались для морей внутренних. Более того, само определение барьерных зон, будучи по структуре схоже с определением понятия «водная масса» в классической гидрологии, не всегда позволяет указывать на их существование и выделять количественные характеристики. В данной работе была предпринята попытка применить формальные методы районирования и соотнести полученные результаты с классическими определениями барьерных зон.

55

As it is known [1], the variability of ocean's natural objects is concentrated in relatively small boundary zones of transforming of matter and energy. These active surfaces, where the leap in process's features take place, are also known as barrier zones. These zones, which were thoroughly investigated for oceans and open seas, are not examined well enough for internal seas. More over, the very definition of the «barrier zones» which is close to the definition of «water mass» in classic hydrology doesn't always indicate their existence at all. This paper presents an attempt of applying formal methods for zoning and of comparing the results with classic barrier zone definitions.

**Ключевые слова:** прибрежные барьерные зоны, экспериментальные измерения, статистический анализ.

**Исходные данные.** Анализу были подвергнуты результаты проб поверхностного слоя морской воды с 23 станций а также 76 гидрологических станций (рис. 1), полученных на полигоне «Таран» прибрежной зоны Балтийского моря в ходе экспедиционных работ в рейсах яхт «Аквариус» (2-й рейс, 4–6 июля 2006 г.) и «Ласточка» (4-й рейс, 27–29 сентября 2006 г.).

Из них в летней экспедиции на яхте «Аквариус» на южном профиле выполнено 6 гидрохимических станций (Аq-60 – Аq-65) и на северном – 4 станции (Аq-72 – Аq-76), а также 50 гидрологических станций. В осенней экспедиции на яхте «Ласточка» на южном профиле взято 7 проб поверхностного соля (L-78 – L-74), на северном – 6 станций (L-66 – L-71), гидрологических станций было выполнено 25. Необходимо отметить, что южный и северный профили летом и осенью не совпадали между собой.

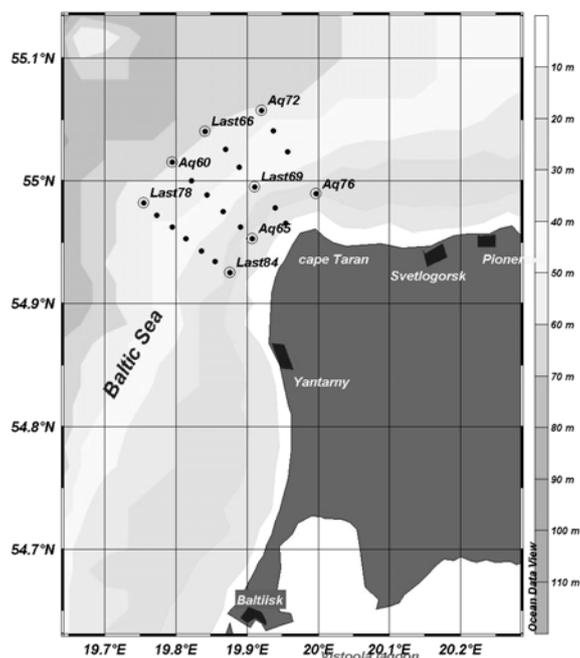


Рис. 1. Расположение станций на полигоне «Таран»

В отобранных пробах морской воды с полигона «Таран» проанализированы следующие показатели [2]: концентрация водной взвеси (фильтрационная взвесь, частицы менее  $<0,45$  мкм), концентрации форм фосфора (валовой, органический и минеральный), форм азота (нитриты, нитраты и органический азот) и общего кремния. Из тяжелых металлов (ТМ) определялись: Bi, Pb, Zn, Cu(II), Ni, Co, Fe(III), Mn(II), Cr(III), V. Как оказалось, результаты для тяжелых металлов, полученные по методике фирмы-изготовителя, являются завышенными для исследований морской воды. Поэтому в данной работе концентрация ТМ использовалась как трассер, безотносительно к ее абсолютным значениям.

**Методика.** Основным средством анализа стало разбиение по кластерам, которое производилось двумя способами: объединение (метод древовидной классификации) и метод К-средних. Для последнего метода число кластеров задавалось от двух до четырех. Это объясняется тем, что ранее в этом районе со спутниковых снимков наблюдались вихревые образования; таким образом, при планировании экспедиции предполагалось получить в полигоне два-четыре района, разделенных одной-тремя фронтальными зонами. Предполагалось, что границы кластеров могут приблизительно соответствовать положению фронтальных зон в поверхностном слое.

Для повышения достоверности анализа выполнялось разбиение на кластеры при различных группировках исходных данных. Анализ проводился как по всей совокупности данных для каждого полигона, так и для каждого рейса в отдельности разными способами. Результаты анализа накладывались на картосхему выполненных станций, затем производилось их сравнение. При качественном совпадении геометрии распределения результатов каждого элементарного анализа строилось результирующее распределение вод и фронтальных зон.



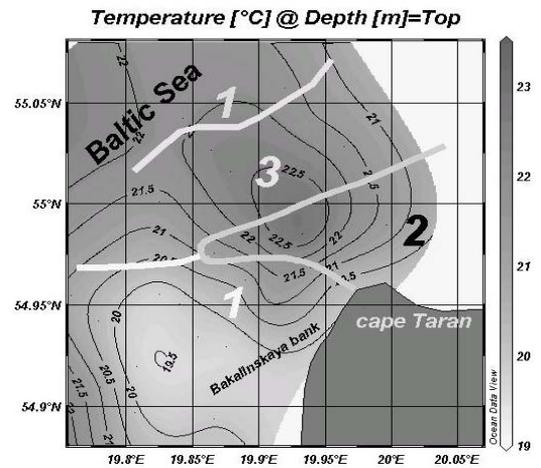
**Районирование по тяжелым металлам, органическому веществу и кремнию, взятыми вместе.** При рассмотрении объединенных данных по рейсам «Аквариус-2» и «Ласточка-4» для двух кластеров, полученных методами объединения и К-средних по ТМ и органическому веществу вместе, видно, что районирование является неустойчивым, границы кластеров не совпадают между собой; некоторые кластеры можно представить замкнутыми образованиями внутри другого кластера; границы районов не имеют вида, похожего на виды со спутника. Таким образом, можно предположить, что скорее всего в данном районе либо существует более сложная фронтальная структура, имеющая в своем составе более одной или двух границ раздела; либо, что более вероятно, существенное влияние оказывает изменчивость данного района. Последнее подтверждается анализом гидрологических разрезов, выполненных в этих же рейсах.

Для исключения влияния сезонности рассмотрим разбиение на кластеры внутри отдельных рейсов. При разбиении на кластеры данных, полученных в рейсе «Аквариус-2», выяснилось совпадение результатов, полученных разбиением на одинаковое число кластеров разными способами для любого количества кластеров из исследуемого диапазона, что было обусловлено длительным устойчивым состоянием погоды (слабый, 1–3 м/с, ветер; ясная, без осадков погода). Как и в сентябрьском рейсе, здесь можно увидеть зону, отделяемую линией, проходящей с запада-северо-запада в направлении восток-северо-восток на удалении примерно 6–7 миль к северо-западу от мыса Таран. Эта линия раздела является вспомогательной, появляющейся лишь при увеличении числа кластеров. Основная фронтальная зона, скорее всего, оконтуривает поток, срывающийся с мыса Таран в направлении юго-востока. Эта зона сохраняется во всех без исключения разбиениях. Остальные выделенные подрайоны являются неустойчивыми.

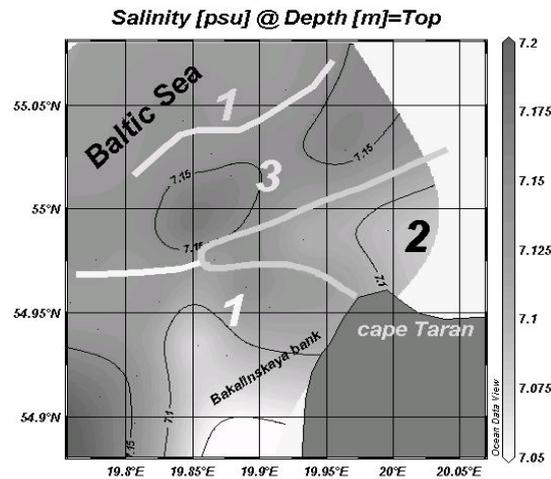
При наложении разбиения на кластеры для второго рейса яхты «Аквариус» на карты распределения ТПО (рис. 2, *а*) и поверхностной солености (рис. 2, *б*) четко видно, что распределение температуры и солености качественно достаточно хорошо совпадает с граничными линиями, проведенными гидрохимическом районировании на три района. При этом данное распределение ТПО и солености лучше совпадает с четырехкластерным районированием — за счет различия ТПО и солености в части открытого моря и в районе Бакалинской мели.

Таким образом, для рейса «Аквариуса» можно выделить основную фронтальную зону, которую возможно классифицировать как границу потока, стекающего с мыса Таран. Вторая граница, отделяющая открытое море, выражена слабее. Остальные фронтальные зоны не имеют по сравнению с указанными выше существенного значения. Границы всех зон совпадают с распределением поверхностных гидрологических показателей очень хорошо.

Для 4-го рейса «Ласточки» при любом разбиении на кластеры устойчиво сохраняется линия раздела, проходящая по направлению 250°-70° на расстоянии около 5–7 миль от берега (к северо-западу от мыса Таран). Вторая граница раздела, которая также существует почти при всех комбинациях с разным числом групп (кроме способа объединения при двух кластерах), лежит южнее, на траверзе Бакалинской мели. При этом граница раздела от берега до удаления в 5 миль от него лежит примерно перпендикулярно берегу и изобатам. Дальнейшее поведение границы раздела кластеров будет зависеть уже от способа разбиения на кластеры и от их



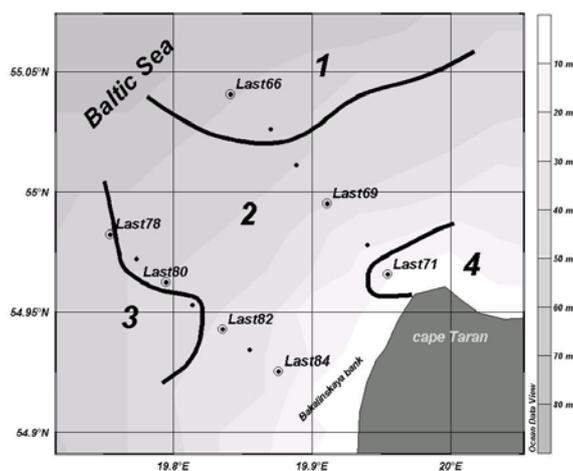
а



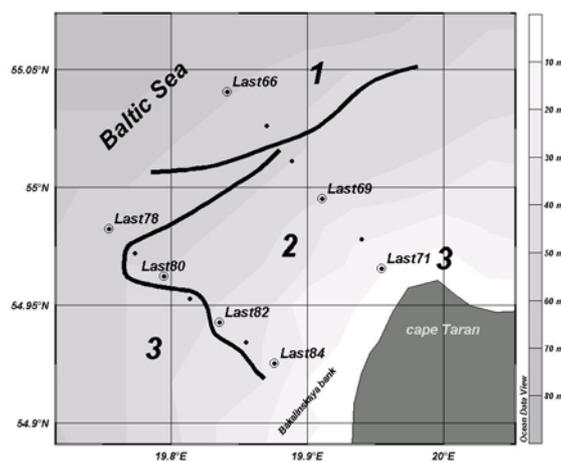
б

Рис. 2. Наложение гидрохимического районирования на:  
а — поле температуры; б — поле солёности. «Аквариус-2»

количества. При увеличении количества кластеров начинает проявляться прибрежная ячейка вблизи собственно мыса Таран (станция L-71) и чуть ниже его. Возможно, это проявление зоны гидродинамической тени при срыве потока с мыса Таран при западном-северо-западном ветре в день пробоотбора. Разбиение на четыре кластера как способом К-средних (рис. 3, а), так и способом объединения (рис. 3, б) дало совершенно одинаковое распределение станций по кластерам. При меньшем числе разбиений ситуация существенно меняется в зависимости от способа выполнения разбиения. Появляются дополнительные фронтальные зоны, параллельные основной и переламывающие свое направление. Скорее всего, это объясняется тем, что с 22 по 27 сентября преобладал ветер восточного и юго-восточного направления, слабый (1–5 м/с). А в день проводимых работ, 28 сентября, ветер был утром западный, северо-западный, днем и вечером — западный, 3–5 м/с. То есть гидрохимическая ситуация на западной стороне Самбийского полуострова, скорее всего, находилась в процессе перестройки.



а



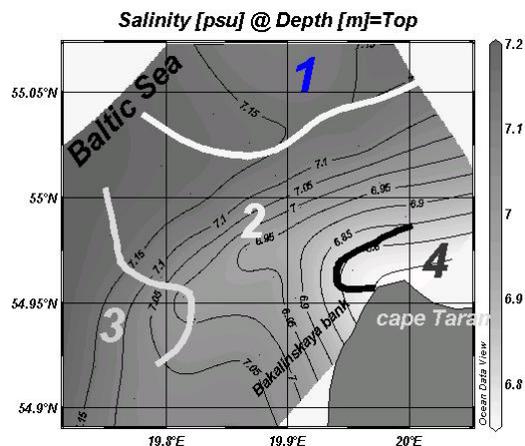
б

Рис. 3. Разбиение на: а – 4 класса методом К-средних; б – 3 класса методом объединения. «Ласточка-4»

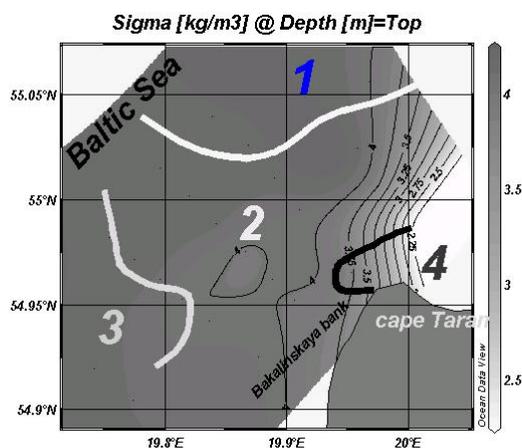
Наложение результатов кластерного анализа (рис. 4, а, б) на распределение поверхностных гидрологических характеристик не обнаруживает такого значительного сходства, как во втором рейсе «Аквариуса». Более или менее похожую картину дает сравнение с аномалией плотности и солености, при этом имеется несовпадение контуров прибрежной ячейки.

Таким образом, в рейсе на полигоне «Таран» можно выделить как минимум две основные зоны: граница открытого моря и граница сбегавшего с мыса Таран потока. Совпадение результатов для разбиения на четыре кластера разными способами указывает на наиболее вероятное число зон – четыре.

**Результаты анализа только по ТМ.** Во время второго рейса «Аквариуса» при разбиении на две группы результат полностью совпал с предшествующими двухкластерными разбиениями. При увеличении числа группировок разбиения начал меняться характер границы



а



б

Рис. 4. Наложение гидрохимического районирования на:  
а – поле солёности; б – на поле аномалии плотности. «Ласточка-4»

открытого моря. В ее южной части начинает появляться новый фронт, который вклинивается с юго-западного направления на северо-восток. В зависимости от метода разбиения и числа кластеров он меняет свою конфигурацию. При наложении на распределения гидрографических параметров степень совмещения контуров невелика. Практически везде, в отличие от предыдущих построений, контуры кластеров ложатся на распределения солёности, плотности со значительным смещением. Расположение контуров не удалось совместить с полем температур.

В четвертом рейсе «Ласточки» распределение по двум и по трем кластерам полностью совпало с предыдущими разбиениями. Различие с предыдущим анализом вышло при разбиении на четыре кластера: прибрежная ячейка «оторвалась» от мыса Таран и образовала замкнутый контур северо-западнее его. Совпадения при наложении схемы четырехкластерного районирования на распределения температуры, солёности и плотности отсутствуют.



**Обсуждение полученных результатов.** Для того чтобы прояснить причины полученных расхождений, воспользуемся так называемой двухходовой кластеризацией. Суть ее заключается в том, что в отличие от других видов анализа, где вопрос обычно выражается в терминах наблюдений или переменных, мы будем группировать данные как по наблюдениям, так и по переменным.

При анализе двухходовой диаграммы (рис. 5), когда анализ ведется как по станциям, так и по переменным, прекрасно видно, что все станции для всех рейсов, выполненные на полигоне «Таран», подчиняются общей закономерности. Для большинства тяжелых металлов, всех форм фосфора и растворенного азота станции лежат в многомерном пространстве измерений очень плотно. Серьезная изменчивость наблюдается лишь по двухвалентному железу, кремнию и валовой форме фосфора. Исключением из этого правила являются только две самые мористые станции: L-66 и L-67. Объяснением такому распределению служит разное время проведения работ. Необычная для полигона по своим масштабам июльская эвтрофикация привела к увеличению осенью поступления органического азота, который является продуктом распада растворенной в воде органики. Изменения по кремнию могут быть объяснены поступлением терригенной взвеси, поток которой неравномерен по побережью и в значительной степени зависит от интенсивности атмосферных осадков.



Рис. 5. Двухходовая диаграмма по всем станциям. Вторым параметром являются концентрации ТМ и гидрохимических показателей. Частота встречаемости указана яркостью заливки

Если отделить от диаграммы (рис. 5) правую часть с кремнием, органическим азотом и железом, оставшаяся левая часть будет представлять собой фактически однородный массив, неустойчивый к разбиению на кластеры. Эта неустойчивость проявляется в том, что при достаточно ма-



лом смещении от точки расположения в многомерном пространстве измерений мы получаем достаточно большое изменение числа кластеров, что особенно хорошо заметно на иерархической диаграмме при кластеризации только по тяжелым металлам.

Более точное приближение районов, выделенных с помощью кластерного анализа, к распределению гидрологических показателей осуществимо тогда, когда имеется набор не связанных между собой показателей, таких как ТМ, терригенный кремний и органический азот. Районирование по признакам одной группы (например, по ТМ) ведет к несовпадению с гидрологией.

Вторым следствием из двухходовой диаграммы являются разные временные масштабы гидрохимических процессов на полигоне. Практически не изменившийся состав групп и плотное их расположение при классификации по тяжелым металлам (на это указывает однородная заливка на двухходовой диаграмме и чрезвычайно малое многомерное расстояние между кластерами на соответствующей иерархической диаграмме) показывает, что районы группировки, выделенные по ТМ, неорганическому азоту и фосфору, изменяли свою концентрацию либо медленно, либо практически синхронно, в то время как процессы изменчивости, связанные с кремнием, органическим азотом и двухвалентным железом, имели другой, более быстрый темп. Глядя на двухходовую диаграмму (рис. 5) и диаграмму распределения средних значений (рис. 6), качественно можно расположить эти процессы в порядке возрастания характерных скоростей изменчивости так: ТМ + весь фосфор + неорганический азот; далее двухвалентное железо, затем кремний и, наконец, органический азот. Из одновременности изменений по большинству тяжелых металлов можно предположить, что они имеют один источник неясного генезиса. Причина высокой пространственной изменчивости по двухвалентному железу неясна.

62

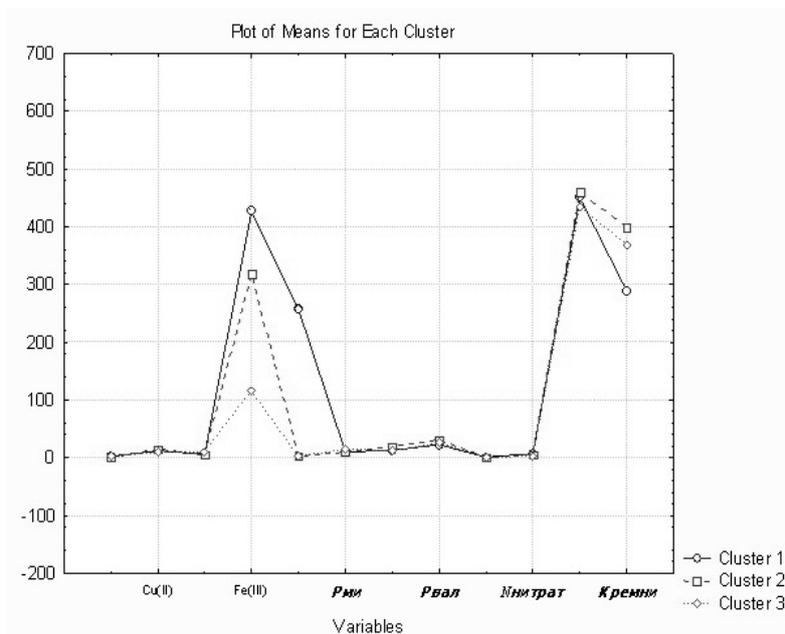


Рис. 6. Диаграмма распределений средних значений по кластерам. Метод К-средних, 3 кластера, «Ласточка-4». Отчётливо видны параметры с наибольшей изменчивостью



Таким образом, при устойчивой спокойной гидрометеорологической ситуации возможно выделение и классификация фронтов по степени их резкости методами кластерного анализа. Достаточно резкие фронты, с большим градиентом по обе стороны будут устойчиво проявляться и оставаться при последовательном наращении числа кластеров. Их стабильность и устойчивость обеспечивается большим межкластерным расстоянием по сравнению с другими кластерами. Более близко расположенные (в статистическом смысле) кластеры не будут существовать отдельно при малом числе разбиений и должны появляться и оставаться независимыми как отдельная группа при увеличении числа районов, вне зависимости от времени наблюдения.

При рассмотрении отдельных распределений видно, что гидрохимическая ситуация на полигоне «Таран» имеет выраженную сезонную изменчивость. Фронт, расположенный к северо-западу от м. Таран и отделяющий открытое море от прибрежной части, может менять свое положение и резкость в зависимости от гидрометеорологических условий. При этом прибрежные фронты сильно меняют свою интенсивность, местоположение, меняется и их количество.

Приведенные выше данные показывают, что действительно имеет место существование некоторой прибрежной зоны, которая в районе м. Таран отделена от основной части Балтийского моря. Отличие ее от морской проявляется в различных темпах изменения содержания кремния, органического азота и железа, что объясняется, скорее всего, влиянием берега и береговых процессов. Изменение положения границы при разной синоптической ситуации позволяет отнести наблюдаемую границу к так называемым механическим (гидродинамическим) барьерным зонам типа «река-море». Наблюдаемая сезонная изменчивость по кремнию, если предположить его терригенный характер, позволяет предположить, что выделенная граница есть проекция границы верхней и нижней динамической части шельфа (II и III зоны — в терминологии Е. М. Емельянова).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 06-05-64138, 06-05-10047.

#### Список литературы

1. Емельянов Е. М. Барьерные зоны в океане: осадко- и рудообразование, геоэкология. Калининград: Янтарный сказ, 1998г. 416 с.
2. Крайцов В. А., Чибисова Н. В., Чугаевич В. Я. [и др.]. Гидрохимическая ситуация вдоль побережья Самбийского полуострова (Балтийское море) летом-осенью 2006 г. // Геология морей и океанов: материалы XVII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. 2 / ИО РАН. М., 2007. С. 243–244.

#### Об авторе

В. Я. Чугаевич — ст. препод., РГУ им. И. Канта, ocean@albertina.ru