

*В.Ю. Чанцев, О.В. Хаймина*

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ  
МЕЛКОВОДНЫХ ПРИБРЕЖНЫХ СИСТЕМ**

*V.Yu. Chantsev, O.V. Khaimina*

**INVESTIGATION OF STABILITY  
OF SHALLOW WATER COASTAL SYSTEMS**

*Проведено исследование устойчивости и адаптации водных систем прибрежных мелководных районов морей разных климатических зон к кратковременным и долгопериодным колебаниям параметров среды. Анализ данных наблюдений, полученных при выполнении экспедиционных работ на Баренцевом, Белом и Черном морях в период с 1996 по 2007 г., осуществлялся с использованием методов многомерного анализа пространственно-временной изменчивости термодинамических, гидрохимических и гидробиологических характеристик.*

*Ключевые слова: устойчивость, адаптация, динамика вод, химические преобразования, водные массы.*

*Research of stability and adaptation of water systems of coastal shallow water regions of the different climatic zones seas to short-term and long-term fluctuations of environment parameters is spent. The analysis of the observational datas, received at expedition work period on Barents, White and Black seas in period from 1996 to 2007, was realized with use of multidimensional analysis methods of spatial-temporary variability of the thermodynamic, hydrochemical and hydrobiological characteristics.*

*Key words: stability, adaptation, dynamic of waters, chemical transformations, water masses.*

Совокупность морских прибрежных биоценозов определяется условиями среды обитания, сложившимися под действием природных, а в последнее время и под действием антропогенных факторов. Существование устойчивых морских экосистем обеспечивает необходимое качество жизни человека и возможность устойчивого развития береговых зон. Одно из основных свойств открытых биологических систем заключается в том, что при наличии внешнего возмущения данные системы способны сохранять структуру и основные показатели функционирования на определенном уровне. Устойчивость и адаптационные способности морских экосистем зависят от повторяемости и интенсивности влияющих факторов. Возрастающий антропогенный прессинг на фоне резких климатических изменений природных процессов формирует сильно меняющиеся во времени условия устойчивого состояния морских прибрежных экосистем.

Выявление общих механизмов восстановления и адаптации мелководных экосистем возможно при рассмотрении большого количества таких систем с различными условиями биотопа, разнообразным составом биоценозов и функционирующих в различных климатических и антропогенных условиях. Таким образом, имеет смысл для проведения исследований привлечь мелководные районы, расположенные в сильно различающихся климатических поясах, таких как субполярный и субтропический.

Одним из признаков негативного антропогенного воздействия на водную экосистему является изменение численности (биомассы) гидробионтов (например, сокращение ценных видов рыб, увеличение биомассы сине-зеленных водорослей). При исследовании изменчивости биологической компоненты экосистемы сложной задачей является выделение отклика биоценоза на антропогенные воздействия, так как естественная изменчивость абиотических характеристик среды обитания может способствовать возникновению адаптаций популяций гидробионтов, приводящих к значительным колебаниям численности (биомассы) видов. Примером этого может служить динамика численности различных видов гидробионтов для акваторий с выраженным годовым ходом температуры воды. Поэтому одной из задач данного исследования являлась оценка вкладов короткопериодной и долгопериодной составляющих в изменение абиотических характеристик среды обитания гидробионтов.

В качестве данных для исследования короткопериодных колебаний в данной работе были использованы результаты многосуточных наблюдений в губе Палкина Кандалакшского залива Белого моря за период 1996–2004 гг.

Так, применение факторного анализа к рядам данных, содержащих информацию об изменении температуры воды ( $T_w$ ), солёности ( $S$ ), содержания растворенного кислорода ( $O_2$ ), фосфатов ( $PO_4^{3-}$ ), кремния ( $Si$ ), значений общей щёлочности ( $Alk$ ) и водородного показателя ( $pH$ ) с дискретностью 2 ч (рис. 1), позволило выявить следующие закономерности, определяющие физико-химические процессы в толще вод губы Палкина в летний период.

1. Основной вклад в дисперсию исследуемых рядов вносил фактор, описывающий противофазные изменения температуры и солёности, а также синфазные колебания солёности и общей щёлочности. При этом в поверхностном слое период изменения данного фактора составляет 4–5 сут., что соответствует естественному синоптическому периоду и говорит об определяющей роли температуры воздуха, влажности воздуха и осадков, а также поля ветра в формировании режима верхних слоев воды. В то же время период данного фактора в придонном слое может увеличиваться до 7 сут., что вероятно связано со скоростью, направлением и продолжительностью действия ветра. Так, при продолжительных сгонных ветрах в придонных слоях может наблюдаться апвеллинг, а при не продолжительных, но сильных ветрах, или сильных ветрах переменных направлений может наблюдаться интенсивное динамическое перемешивание всей водной толщи.

2. Изменения содержания растворенного кислорода в воде, определяющиеся самостоятельным фактором, имея период 4–5 сут., могут быть как синхронными с первым фактором при сильных ветрах, так и запаздывающими при слабых ветрах и погодных условиях, благоприятных для бурного развития фитопланктона, поскольку данная характеристика является как показателем состояния среды, так и показателем состояния фитопланктонного сообщества.



Рис. 1. Результаты исследования короткопериодной изменчивости абиотических характеристик прибрежных вод в летний период.

Полученные результаты подтвердили значительную роль сгонно-нагонных явлений, а также влияния в целом погодных условий не только на состояние среды, но и на биологические процессы в ней. Однако факторный анализ рядов, содержащих данные с дискретностью 2 ч, не позволил выявить вклад более короткопериодных процессов, оказывающих влияние на изменчивость условий обитания в прибрежных водах Белого моря в летний период, а именно:

- суточный ход прогрева атмосферного воздуха (период ~24 ч);
- полусуточный прилив (период ~12 ч).

Более подробно анализ вклада короткопериодных составляющих в изменение характеристик среды был проведен на примере рядов ежечасных значений температуры воды ( $T_w$ ) и солёности ( $S$ ) по данным МСС 13–21 июля 2005 г. При статистической обработке использовались данные для горизонтов 1, 2, 3 и 4 м. Для выделения гармонических составляющих в исследуемых рядах был применен спектральный анализ (см. рис. 1). Вклад долгопериодной (40 ч и более) составляющей для рядов температуры воды составил до 90 %, а для рядов солёности – до 70 % от общей дисперсии рядов. Удаление низкочастотных колебаний

осуществлялось с помощью процедуры фильтрации, реализованной в программном комплексе «Призма» [Аверкиев, 1997].

Из анализа спектров для рядов температуры воды и солёности следует, что квазиполусуточный период присутствует практически во всех исследованных рядах. Квазисуточный период характерен только для изменения температуры воды, при этом в поверхностном слое максимум спектральной плотности приходится на период в 23 ч, а с увеличением глубины максимум спектральной плотности смещается к 32 ч. Кроме того, практически для всех проанализированных рядов было характерно наличие еще нескольких пиков спектральной плотности, приходящихся на периоды 8 и 5-6 ч, а для солёности прослеживается еще и 3-часовой период.

Таким образом, виды, обитающие в прибрежных водах, должны быть адаптированы к достаточно значительным колебаниям уровня и солёности как в течение суток, так и в пределах синоптического периода. Как следствие этого, для прибрежной зоны Белого моря характерно наличие литоральных сообществ, условия жизнедеятельности которых целиком зависят прежде всего от колебаний уровня моря. Однако населяющие ее виды должны иметь устойчивость к достаточно широкому диапазону изменчивости солёности в течение суток. Так, в губе Палкина доминирующие виды, обитающие на литорали, имеют две формы приспособления:

- обладают двойственным механизмом метаболизма, как литорины и фукусовые водоросли (они могут жить в условиях атмосферного воздуха);
- могут пережидать периоды осушения, используя защитный механизм, например плотное смыкание створок у мидий и усоногих рачков, или же прячутся среди камней в остающихся небольших заводях, как бокоплавы.

Следует отметить, что несмотря на незначительный, на первый взгляд, вклад короткопериодных колебаний (максимум около 30 %) в общую дисперсию, нарушение режима приливо-отливных явлений при антропогенном вмешательстве может приводить к катастрофическим последствиям для экосистемы. Примером этого являются изменения состояния экосистемы Кислой губы Баренцева моря в период 60–80-х годов XX в.

Наряду с короткопериодными изменениями условий среды обитания в последние десятилетия экосистемы, в том числе и морей Северо-Запада России, могут испытывать прессинг долгопериодных изменений, вызванных потеплением климата Земли.

Для анализа долгопериодной изменчивости абиотических компонент экосистемы наиболее целесообразно оценить динамику характеристик водных масс района исследований, так как водная масса (ВМ) – это сравнительно большой объем воды, длительное время сохраняющий относительную однородность основных физических, химических и биологических характеристик, сформированных в определенных географических районах океана [Гордеева, 2001].

В качестве исходных данных для выделения водных масс были использованы результаты наблюдений за температурой воды ( $T_w$ ) и соленостью ( $S$ ), собранные в летний период 1996–2005 гг. экспедицией РГГМУ-ПИНРО в кутовой части вершины Кандалакшского залива Белого моря. Наблюдения проводились на горизонтах 0, 3, 5, 10, 15, 20, 25 м и варьирующем горизонте «дно». Выделение водных масс было проведено с применением кластерного анализа (алгоритм Уорда).

По результатам кластерного анализа на акватории кутовой части вершины Кандалакшского залива Белого моря были выделены две основные водные массы – поверхностная (ПВМ) и придонная (ПрВМ), которые могут быть в свою очередь подразделены на 2 класса каждая. Однако по данным ряда лет выделяется дополнительная водная масса с аномальными характеристиками – «подземная». Структура вод с четырьмя классами наблюдалась в 1996–1999 и 2003 гг. «Подземная» ВМ обнаруживается в 2001–2002 и 2004–2005 гг. Наибольший контраст характеристик «подземной» водной массы был зафиксирован по данным STD-зондирования в 2004 г.

Поверхностная водная масса занимает верхний 5-метровый слой. Придонная водная масса занимает остальную часть толщи вод вплоть до максимальных глубин данной акватории (до 50 м). «Подземная» ВМ образует шлейф поднимающихся со дна вод, вытянутый от центральной части акватории в сторону г. Кандалакши. Придонная водная масса образуется в период осенне-зимней конвекции, поверхностная ВМ – в результате весенне-летнего прогрева, «подземная» ВМ, вероятней всего, формируется в результате выхода подземных вод через систему геологических разломов.

Для межгодовой изменчивости температуры воды (рис. 2) обеих основных водных масс наблюдается линейное увеличение значений (на  $\sim 2$  °C за 10 лет), что, вероятно, отражает климатические изменения. Схожий линейный тренд для солености (увеличение на  $\sim 2$  ‰ за 10 лет) характерен только для поверхностной водной массы, что вызвано отсутствием в летний период механизмов, обеспечивающих поступление пресных вод в придонные слои.

Значительные аномалии солености в придонных слоях, наблюдавшиеся в результате образования «подземной» водной массы в отдельные годы (например, 2004 г.), могут носить периодический характер, однако имеющихся данных наблюдений недостаточно, чтобы это подтвердить или опровергнуть. Столь значительные флуктуации солености (от нескольких ‰ до 10 ‰ и более) в придонном слое вод прибрежной зоны неизбежно должны оказывать существенное влияние на состояние прежде всего донных сообществ. Не исключено, что по масштабам и последствиям для экосистемы данного района воздействие этого явления может быть сопоставимо с локальной экологической катастрофой, вызванной антропогенным вмешательством.

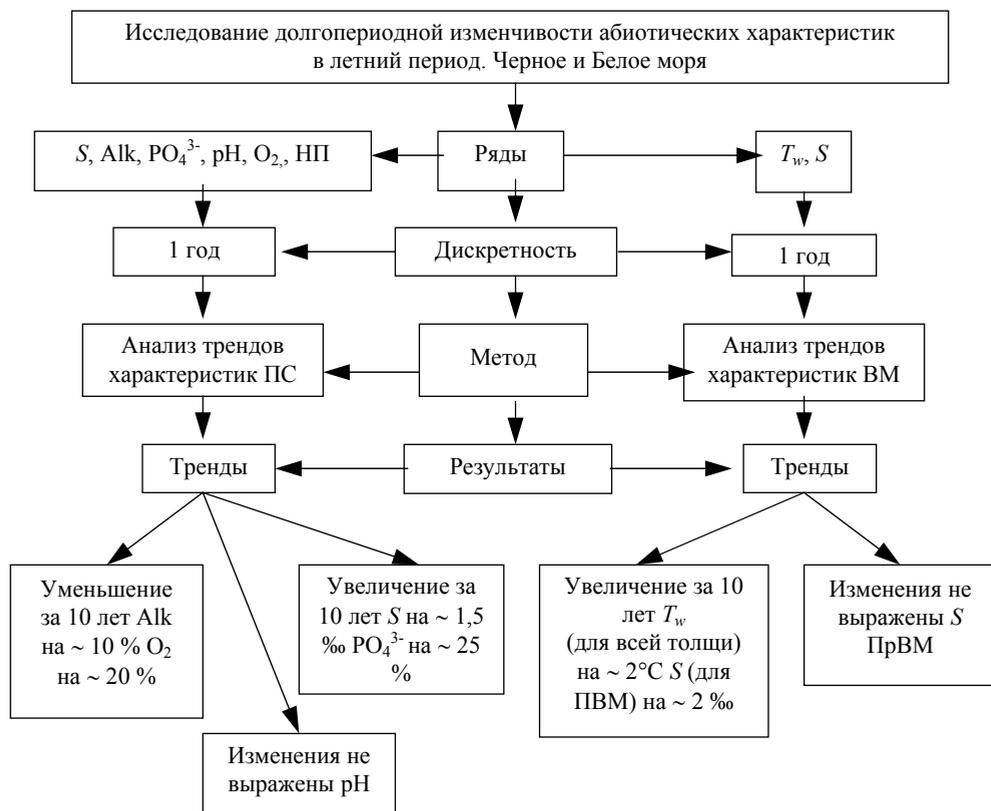


Рис. 2. Результаты исследования долгопериодной изменчивости абиотических характеристик прибрежных вод в летний период. Вершина Кандалакшского залива, Белое море и прибрежная зона г. Туапсе, Черное море.

Для оценки межгодовой изменчивости могут быть использованы также данные об изменении характеристик среды отдельного слоя вод для участков акватории, имеющих значительные ограничения по водообмену с сопредельными участками акватории. Примером таких акваторий могут быть акватории портов, изолированных защитными сооружениями. Так, анализ изменчивости абиотических характеристик поверхностного слоя вод порта г. Туапсе (см. рис. 2) в летний период также выявил тенденцию к увеличению солёности на 1,5 ‰ за десять лет (с 1996 по 2006 г.). Было получено синфазное увеличение солёности изменение содержания фосфатов (на 25 % за 10 лет) и противофазные изменения содержания растворенного кислорода (на 20 % за 10 лет) и общей щёлочности (на 10 % за 10 лет). Следует отметить, что при дальнейшем сохранении выявленных тенденций к увеличению температуры воды и осолощению прибрежной зоны можно ожидать изменения видового состава прибрежных биоценозов с сохранением эвритермных видов и увеличением доли тепло-

любивых видов морских организмов, более выраженное для поверхностных слоев в обоих морях.

Помимо существующих физических взаимосвязей и взаимодействий между физико-химическими параметрами, формируемых на микроуровне, периодически и локально возникают статистические взаимосвязи на макроуровнях. Такие устойчивые взаимосвязи связаны не только с существующими физическими закономерностями взаимных превращений и воздействий, но и с процессами пространственного и временного осреднения исследуемых параметров. Формируемые на макроуровнях взаимосвязи между отдельными параметрами являются результатом не только прямых физических взаимодействий, но и косвенных воздействий других физических процессов. Одним из возможных промежуточных этапов взаимосвязи между физико-химическими характеристиками служат биологические объекты, участвующие в биохимических превращениях под воздействием внешних физических и химических процессов.

Практический интерес представляет выявление статистических связей между вынуждающими физическими параметрами среды и биохимическими параметрами водной экосистемы. Одним из возможных методов выявления достоверных взаимосвязей является корреляционный анализ распределения пространственных аномалий физико-химических параметров водной экосистемы.

В качестве характеристик, определяющих пространственную изменчивость физико-химических параметров прибрежной экосистемы, рассматривались нормированные пространственные пульсации этих параметров:

$$G' = \frac{1}{N_X + N_Y + N_Z} \frac{\sum_{i=1}^{N_X} \sum_{j=1}^{N_Y} \sum_{k=1}^{N_Z} (G_{ijk} - \bar{G})}{\sigma_G}, \quad (1)$$

где  $i, j, k$  – индексы компонент  $G$  по  $X, Y, Z$ ;  $N_X, N_Y, N_Z$  – количество компонент по соответствующим осям.

Для прибрежной зоны г. Туапсе за период с 2000 по 2007 г. рассматривалась взаимосвязь таких компонент прибрежной экосистемы, как нормированные аномалии: температуры воды ( $\delta T/\sigma_T$ ), солёности ( $\delta S/\sigma_S$ ), растворенного кислорода ( $\delta O_2/\sigma_{O_2}$ ), водородного показателя ( $\delta pH/\sigma_{pH}$ ), щёлочности ( $\delta Alk/\sigma_{Alk}$ ), нитритов ( $\delta NO_2/\sigma_{NO_2}$ ), фосфатов ( $\delta PO_4/\sigma_{PO_4}$ ), суммарного железа ( $\delta Fe/\sigma_{Fe}$ ), биологического потребления кислорода ( $\delta БПК_5/\sigma_{БПК_5}$ ), перманганатной окисляемости ( $\delta OK/\sigma_{OK}$ ) и частоты Вэйсяля ( $\delta N/\sigma_N$ ).

Прямую линейную взаимосвязь между рассматриваемыми параметрами выявляли на основе анализа матрицы распределения коэффициентов взаимной корреляции. Максимальная взаимосвязь между динамической устойчивостью вод и физическими параметрами среды проявляется в корреляционной связи аномалии частоты Вэйсяля с аномалией солёности, когда коэффициент корреляции равен 0,80. При рассмотрении пространственной изменчивости колеба-

ний динамической устойчивости оказывается, что именно пространственные аномалии солености играют большую роль в формировании аномалий частоты Вайсяля. Наибольшие коэффициенты корреляции наблюдаются между:  $\delta\rho/\sigma_{\rho H}$  и  $\delta\text{Ок}/\sigma_{\text{Ок}}$ ;  $\delta\text{Алк}/\sigma_{\text{Алк}}$  и  $\delta\text{Ок}/\sigma_{\text{Ок}}$ ;  $\delta\text{P}\text{O}_4/\sigma_{\text{P}\text{O}}$  и  $\delta\text{N}\text{O}_2/\sigma_{\text{N}\text{O}}$ ;  $\delta\text{Fе}/\sigma_{\text{Fе}}$  и  $\delta\text{БПК}_5/\sigma_{\text{БПК}}$ .

Большинство выявленных взаимосвязей явно связаны с колебаниями интенсивности продукционно-деструкционных процессов. При отсутствии информации о количественных оценках биологических процессов статистическая связь между колебаниями пространственных аномалий биохимических параметров позволяет проводить анализ чувствительности этих характеристик по отношению к физическим воздействиям на водную экосистему. Особое внимание необходимо уделить гидрохимическим величинам, принимающим участие в биологических процессах или определяющих, хоть и косвенно, интенсивность этих биологических процессов. Проводимые исследования учитывают только биологические процессы первичной биологической продуктивности, что соответствует деятельности водных растений и в первую очередь фитопланктона. Биологические процессы высших трофических уровней могут базироваться на прямых исследованиях жизнедеятельности организмов или на основе косвенных данных связи жизнедеятельности организмов с биологическим потреблением кислорода и перманганатной окисляемостью, характеризующих дыхание, метаболизм и отмирание этих организмов.

Взаимные колебания нормированных аномалий физико-химических параметров водной экосистемы прибрежной зоны выступают показателем или оценкой чувствительности этих параметров относительно их взаимной изменчивости. Как уже отмечалось, имея представление о пространственных колебаниях отдельных параметров водной экосистемы, можно судить об относительной чувствительности других элементов этой системы к рассматриваемым колебаниям. Для анализа чувствительности основных характеристик прибрежной морской экосистемы проводился расчет отношения пространственных аномалий параметров экосистемы. Чем больше значение отношения, тем больше чувствительность параметра, находящегося в числителе, относительно изменчивости параметра, стоящего в знаменателе.

Пространственные колебания процессов перманганатной окисляемости находятся в достаточно тесной взаимосвязи с колебаниями щелочности и рН. Эта обратная взаимосвязь представлена в матрице парных коэффициентов корреляции. В то же время, если отношение аномалий перманганатной окисляемости к аномалиям рН близко к единице до глубины 35 м и достигает пятикратной величины на глубинах ниже 45-метровой изобаты, то отношение перманганатной окисляемости к аномалиям щелочности имеет несколько иное вертикальное распределение. Минимальная чувствительность перманганатной окисляемости на колебания щелочности возле морской поверхности составляет трехкратную величину, как видно из рис. 3.

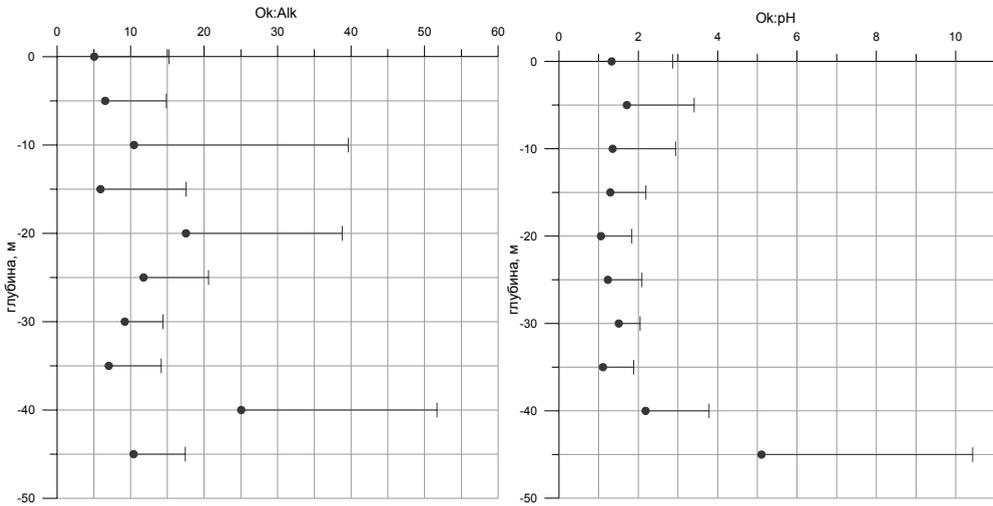


Рис. 3. Вертикальное распределение отношения аномалий перманганатной окисляемости к аномалиям щелочности и рН.

В отличие от реакции окисляемости на колебания рН реакция окисляемости на щелочность увеличивается до глубины 20 м и составляет 18-кратную величину. Второй максимум этого отношения наблюдается на 40-метровой глубине и равняется 25-кратной величине. Рассмотрев общую тенденцию вертикального распределения отклика перманганатной окисляемости на колебания аномалий щелочности и рН, можно проследить увеличение этих отношений от поверхности к придонному слою. Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее активным слоем является именно придонный слой.

Влияние колебаний аномалий щелочности на изменчивость аномалий биогенных веществ представлено на рис. 4. Здесь также наблюдается увеличение чувствительности аномалий биогенных веществ к колебаниям аномалий щелочности с увеличением глубины, достигая максимальных значений в придонных слоях.

В реакции изменчивости аномалий суммарного железа и перманганатной окисляемости на воздействие аномалий нитритов прослеживается появление максимума на глубине порядка 20 м. После достижения максимального значения, равного семикратному увеличению, на горизонте 20 м реакция на воздействие аномалий нитритов уменьшается до единицы на горизонте 40 м. И опять в придонном слое наблюдается скачок отклика колебаний суммарного железа и окисляемости на колебания аномалий нитритов, достигающий десятикратного размера.

В результате проделанной работы были выявлены некоторые особенности формирования биотопов прибрежных экосистем и получены оценки их изменчивости в результате внутренних и внешних взаимодействий. В качестве некоторых обобщений можно представить следующие результаты.

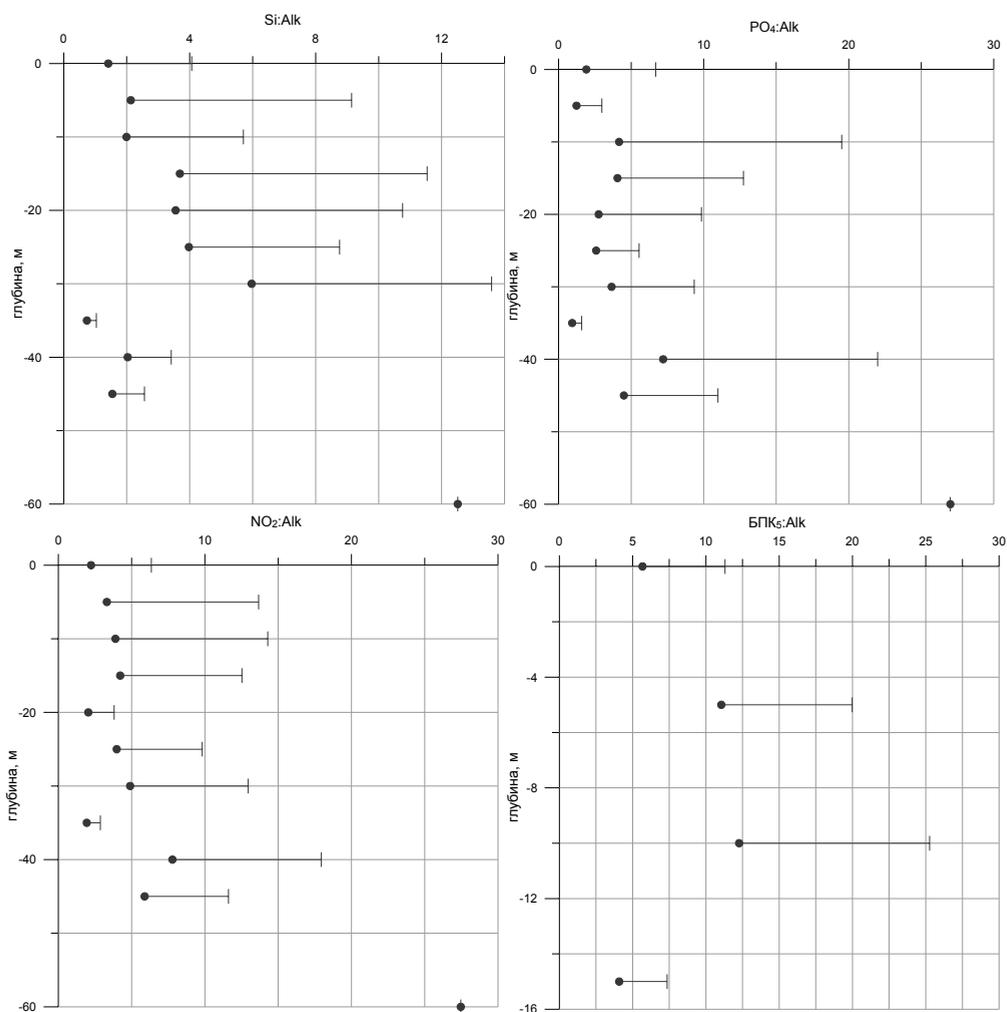


Рис. 4. Вертикальное распределение отношения аномалий Si, PO<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> и BPK<sub>5</sub> к аномалиям щелочности.

В прибрежных районах Черного моря установлено, что в вертикальной структуре вод зоны повышенной устойчивости, как правило, располагаются ниже 10-метровой изобаты. При исследовании гидрохимического режима большинство выявленных взаимосвязей явно связано с колебаниями интенсивности продукционно-деструкционных процессов. При отсутствии информации о количественных оценках биологических процессов статистическая связь между колебаниями пространственных аномалий биохимических параметров позволяет проводить анализ чувствительности этих характеристик по отношению к физическим воздействиям на водную экосистему. Особое внимание необходимо уделить гидрохимическим величинам, принимающим участие в биологи-

ческих процессах или определяющим, хоть и косвенно, интенсивность этих биологических процессов. Проводимые исследования учитывают только биологические процессы первичной биологической продуктивности, что соответствует деятельности водных растений и в первую очередь фитопланктона.

Анализ межгодовой и пространственной изменчивости характеристик обилия бентоса Кислой губы показал, что для его развития лимитирующими факторами являются: сильное распреснение поверхностного слоя воды; характер грунта; техногенно трансформированный прилив, в частности, такие его характеристики, как амплитуда колебаний уровня и продолжительность осушки. Исследование воздействия изменений параметров среды на гидробионты показало, что выявленная тенденция к повышению температуры воды прибрежных зон характерна как для Белого, так и для Баренцева моря. Поэтому при дальнейшем сохранении выявленных тенденций к увеличению температуры воды и осолонению прибрежной зоны можно ожидать изменение видового состава прибрежных биоценозов с сохранением эвритермных видов и увеличением доли теплолюбивых видов морских организмов, более выраженное для поверхностных слоев в обоих морях.

### ***Литература***

1. *Аверкиев А.С. и др.* Методические рекомендации по использованию метода сверхдолгосрочного прогнозирования гидрометеорологических элементов (МСПГЭ) и программного комплекса «Призма» [Текст] / Авт.: А.С. Аверкиев, В.М. Булаева, Д.В. Густоев, И.П. Карпова. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1997. – 40 с.
2. *Гордеева С.М.* Общая океанология. Ч. 1. Физические процессы. практикум. [Текст] / С.М. Гордеева, П.П. Провоторов. – СПб.: РГГМУ, 2001, с. 27–30.