

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Д-р физ.-мат. наук **В.Ф. Крапивин**

(Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино Московской обл.),

кандидат техн. наук **И.И. Потапов**

(Всероссийский институт научной и технической информации РАН, г. Москва
ipotapov37@mail.ru)

IDENTIFICATION METHODICS OF HEDROCHEMICAL SYSTEMS

V.F. Krapivin, I.I. Potapov

Ключевые слова: гидрохимическая система, индикатор, фазовое состояние, шкала, модель.

Key words: hydrochemical system, indicator, phase state, scale, model.

Обсуждены вопросы идентификации фазового состояния гидрохимической системы с помощью введения индикаторов, отражающих пятнистость и биологическую сложность. Показано, что с помощью этих индикаторов возможно надежно оценивать состояние гидрохимической системы. Отмечено, что особенностью дистанционных измерений является сбор информации, когда на вход обрабатывающей системы поступают данные по маршрутам полета летательного аппарата. В результате получается двумерный образ изучаемого объекта. Одной из моделей этого образа является статистическая модель «пятнистости» фоновых характеристик изучаемого пространства. Одним из распространенных способов построения такой модели является задание порога, превышение или не превышение которого является признаком пятна на поверхности воды. В этом случае в область пятна относится та часть пространства, на которой показатель среды по выбранному каналу превышает или, наоборот, не превышает значение порога. Понятие биологической сложности рассмотрено с позиций эcoinформатики, где формализуется взаимодействие различных элементов и процессов в гидрохимической системе с попыткой оценить и предсказать динамику этого взаимодействия путем введения шкалы биосложности. Приведен ряд примеров диагностики гидрохимических систем. Данная работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант РФФИ № 19-07-00443).

The identification questions of hydrochemical system state are discussed by means of indicators reflecting a spottiness and biocomplexity. It is shown that reliable assessment of hydrochemical system state can be realized by means of these indicators. It is marked that feature of remote sensing measurements consists in the data delivery by the flying routes. Two-dimensional image of the studied object is receives as a result of this data processing. One of the models of this image is statistical model of "spottiness" of background characteristics of studied space. Choice of the threshold is one of known tools for such model synthesis. Exceeding or not this threshold is the indicator of the water surface spot. In this case, the spot area includes the part that is characterized by exciding or not the specific characteristic of threshold. Biocomplexity indicator is considered by the ecoinformatics theory that forms the interaction between different elements and processes taking place in the hydrochemical system by means of the introduction of biocomplexity scale. Series of examples are given.

Введение

Одной из актуальных задач изучения сложных гидрофизических систем является поиск методик и алгоритмов оценки стабильности их состояния. Наиболее распространенный и широко используемый подход к решению этой задачи состоит в анализе устойчивости математической модели системы. Понятие стабильности гидрофизической системы обычно отождествляется с классическим определением устойчивости по Лагранжу, когда система возвращается в устойчивое состояние после возмущения по различным причинам. К сожалению, характеристики стабильности, как правило, определяются на основе аналитических решений линеаризованных уравнений, которые приблизительно описывают поведение системы при ее реакции на внешние воздействия. При рассмотрении сложной системы линейные аппроксимации оказываются неэффективными, так как выявляют не все ее устойчивые состояния. В частности, линейный подход к анализу стабильности гидрофизической системы не применим при рассмотрении ее реакций на большие возмущения.

Традиционный подход к изучению характеристик гидрофизических и гидрохимических систем базируется на взятии проб воды и грунта, составлении временных рядов эмпирических характеристик и построении математической модели, которая с определенной степенью достоверности описывает структурные и динамические изменения в изучаемой системе. При этом для получения высокой достоверности в оценке состояния системы необходимы большие затраты времени и финансовых средств. Поэтому многие авторы пытаются найти универсальные средства для изучения гидрофизических и гидрохимических систем, чтобы минимизировать эти затраты и снизить инструментальную нагрузку на мониторинговые системы. Одним из распространенных приемов является применение кластерного анализа для определения гидрохимических групп качества воды и с помощью различных алгоритмов определения расстояния в кластерном пространстве решать задачу идентификации водных объектов. Также широко используется такой индикатор фазового состояния изучаемой водной системы, как пятнистость ее поверхности. Через этот индикатор определяются многие гидрофизические и гидрохимические параметры системы [1-5].

В данной работе на различных примерах демонстрируются возможности использования нескольких индикаторов фазового состояния гидрофизических систем.

Пятнистость поверхности водоема как индикатор его экологического состояния

Современные методы мониторинга гидрофизических объектов включают прямые измерения их характеристик с помощью судовых или буйковых наблюдений и дистанционные средства сбора данных, включая спутниковые и беспилотные наземные инструменты [6-8]. В любом случае при мониторинге больших акваторий возникает задача планирования измерений, включая размещение стационарных заякоренных станций и распределение в пространстве трасс полета летающей лаборатории. И в том и другом случаях необходимо восстановить пространственный образ изучаемой системы на основе фрагментарных по пространству и эпизодических во времени измерений.

В работе [5] отмечено, что особенностью дистанционных измерений является сбор информации, когда на вход обрабатывающей системы поступают данные по маршрутам полета летательного аппарата. В результате получается двумерный

образ изучаемого объекта. Одной из моделей этого образа является статистическая модель «пятнистости» фоновых характеристик изучаемого пространства. Одним из распространенных способов построения такой модели является задание порога, превышение или не превышение которого является признаком пятна на поверхности воды. В этом случае в область пятна относится та часть пространства, на которой показатель среды по выбранному каналу превышает или, наоборот, не превышает значение порога.

Пусть характеристика поверхности воды $y=y(\varphi,\lambda)$ является функцией координат (φ,λ) точек изучаемой акватории Ω , где φ и λ являются широтой и долготой соответственно. Пятна могут иметь различную физико-химическую структуру, указывая на уровень неоднородности температуры, освещенности, волнения, концентрации биологических ресурсов, солености, бароклинной неустойчивости и загрязнения. Задание порога Y и последующего условия $y \geq Y$ позволяет описать пространственную изменчивость характеристики y в различных горизонтальных масштабах. Для сложной системы, состоящей из n элементов, такая процедура приводит к множеству пятен с характерными распределениями их средних диаметров $d_{yi}^+(Y_i)$ ($i = 1, \dots, n$) и $d_{yi}^-(Y_i)$ ($i = 1, \dots, n$) соответственно при превышении и не превышении i -ой характеристикой порога Y_i , определяемого условиями решаемой задачи. В частности, это может быть поиск акваторий с загрязнением, превышающим уровень допустимых концентраций химического элемента или выявление зон с низкой продуктивностью.

В качестве примера рассмотрим лагуну Dam Ньюк Нгот в центральной части вьетнамского побережья Южно-Китайского моря в провинции Tinh Binh Dinh на расстоянии 2 км от Hung Lac в координатах $14^{\circ}9'0''N$, $109^{\circ}10'59,99''E$. Эта мелководная лагуна находится в зоне происходящего и особенно ожидаемого интенсивного антропогенного воздействия. Необходимость оперативного мониторинга качества воды в лагуне диктуется хозяйственными потребностями и обеспечением безопасных концентраций химических элементов с поддержанием, например, солености в заданных пределах. Характеристики лагуны формируются поступлением или оттоком морских вод во время приливов и отливов, а также впадающими речками и за счет берегового стока. Лагуна соединена с морем узкой протокой, в которой установлена регулирующая приток и отток воды плотина. Динамичность характеристик лагуны регулируется также в зависимости от сезона года, которые в климатической зоне Вьетнама имеют бинарный режим: сухой и дождливый. Средние значения характеристик лагуны указаны в табл. 1.

Диагностика лагуны осуществляется путем измерений различных характеристик в десяти равномерно расположенных по акватории лагуны точках [4]. Восстановление полного пространственного распределения этих характеристик осуществляется с помощью модели, детально описанной в работе [7]. В результате получается пятнистая картина распределения характеристик лагуны, два примера которой представлены на рис. 1, соответствующих сухому и дождливому сезону года. Эти устойчивые распределения достигаются прямым регулированием потоков воды в устье лагуны с учетом динамических процессов внутри лагуны. Размытость пятен на рис. 1 характерно для солености. В случае других характеристик пятнистость становится более заметной за счет влияния донных отложений. Такие примеры представлены на рис. 2. К сожалению, в этом случае невозможно использовать статистику размеров пятен и их распределение для оценки состояния водной среды лагуны, но суммарная площадь пятен может служить таким индикатором.

Перечень характерных оценок параметров лагуны Ньюк Нгот.

Параметр	Оценка параметра	Параметр	Оценка параметра
Площадь, км ²	14,7		
Скорость ветра, м/с Средняя Максимальная	1,9 39,6	Температура верхнего слоя, °С Сухой сезон Дожливый сезон	26 29
Температура воздуха, °С Средняя Минимальная Максимальная	27,0 15,8 39,9	Относительная влажность, мб Средняя Минимальная Максимальная	27,9 20,0 32,7
Осадки, мм/год Средние Минимальные Максимальные	1692,9 778,0 2587,0	Соленость воды, ‰ Сухой сезон Дожливый сезон В устьях рек	33,0 23,5 2,5
Солнечная радиация, Ккал/см ²	144	Радиационный баланс, Ккал/см ²	92,5
Распределение глубин: Средняя глубина, м Максимальная глубина, м	1,6 9,8	Среднегодовой расход воды за счет речного стока, м ³ /с	5,6

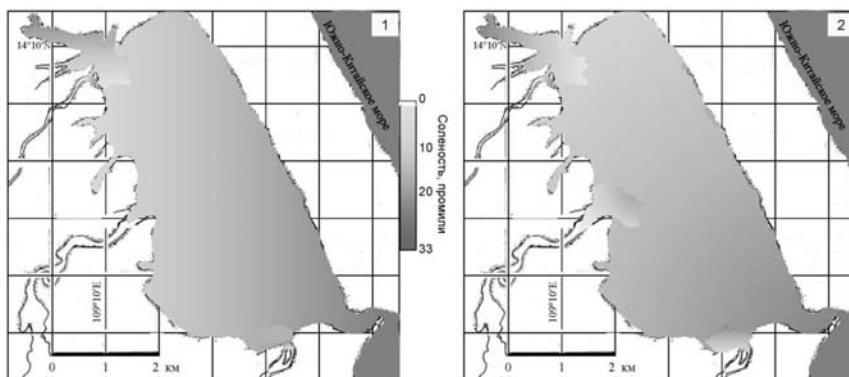


Рис. 1. Установившееся распределение солености воды в лагуне Ньюк Нгот во время дождливого (1) и сухого (2) сезонов.

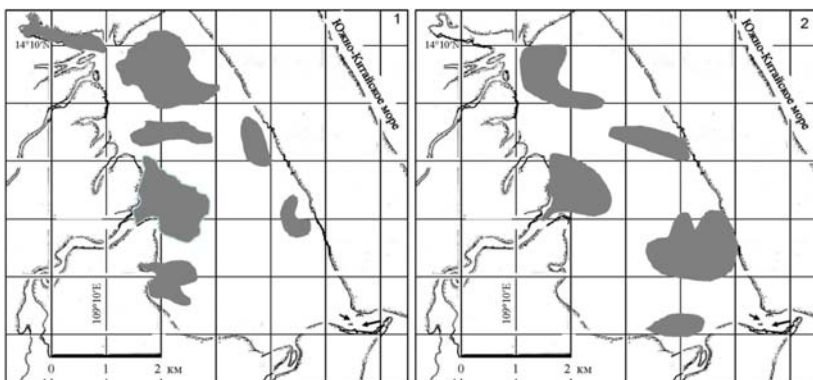


Рис.2. Установившееся распределение пятен нитратов и pH в лагуне Ньок Нгон во время сухого сезона. Обозначения: 1 – концентрация NO_3^- превышает $0,25 \text{ млн}^{-1}$; 2 - $\text{pH} \geq 9,0$.

В каждом конкретном случае пятнистость водоема может иметь различные механизмы образования. Это могут быть разливы нефтепродуктов или других загрязнителей, но пятна могут иметь естественное происхождение. В частности, при превышении концентрации различных солей в воде могут на поверхности образовываться пятна. Такой эффект наблюдается, например, в озере Клилук в Канаде на границе с США. Летом, в жаркие дни, растворенные соли сульфатов серебра, магния, калия, кальция, натрия и других минералов кристаллизуются и на поверхности озера образуют небольшие островки (пятна) различного цвета. Аналогичный естественный эффект наблюдается в рыбозаводных водоемах Южного Вьетнама, например, в провинции Ба Риа. Пятна нефтепродуктов образуются на поверхности воды из-за различия в плотности. В каждом конкретном случае статистика пятен дает информацию о состоянии водоема и последствиях для имеющейся экосистемы.

Пятнистость характерна для больших акваторий Мирового океана, вызываемая неоднородностью распределения апвеллинговых зон с повышенной продуктивностью, что порождает следующие уровни пятнистости, например, температуры верхнего слоя воды и потоков углекислого газа на границе океан-атмосфера [9-13]. Открытые акватории океанов, за исключением зон вдоль экватора, характеризуются концентрацией хлорофилла a в пределах до $0,1 \text{ мг/м}^3$. Прибрежные зоны и акватории северных и южных широт имеют концентрацию хлорофилла a около 1 мг/м^3 . И лишь незначительная часть территории Мирового океана обладает более высоким биологическим потенциалом. Знание этого распределения важно для многих сфер деятельности человека, включая рыболовство и оценку глобальных изменений климата. Поэтому создание формализованного подхода к анализу структуры пятнистости акваторий Мирового океана является актуальной задачей как для принятия эффективных решений в области экономического использования его ресурсов, так и для планирования систем мониторинга, включая запуск океанографических спутников и размещения стационарных закоренных метеорологических станций. Такой формализованный подход был сформулирован в ряде работ [10-12, 14-17]. Согласно этому подходу в зоне апвеллинга функционирование океанской экосистемы регулируется вертикальным подъемом биогенных элементов согласно схеме рис. 3, а динамика биопродуктивности описывается кривыми, представленными на рис. 4.

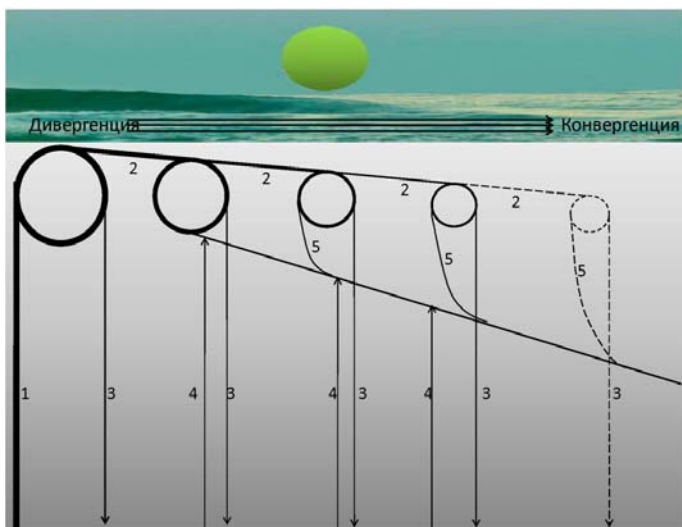


Рис. 3. Схема круговорота биогенных элементов и органического вещества в сукцессии экосистемы в зоне апвеллинга по [1-3]. Обозначения характерных зон развития экосистемы апвеллинга: 1- подъем биогенных элементов и растворенного органического вещества (РОВ) с водой из глубинных слоев в зоне апвеллинга; 2- их многократное использование в продукционно-деструкционных циклах сообщества поверхностных слоев; 3- потеря биогенных элементов с опускающимися органическими остатками и мигрирующими организмами; 4- турбулентный подъем биогенов и РОВ из глубинных слоев и задержка их в зоне нижнего максимума; 5- включение биогенов, поднявшихся из слоя нижнего максимума с мигрирующими организмами, в продукционные циклы поверхностного сообщества.

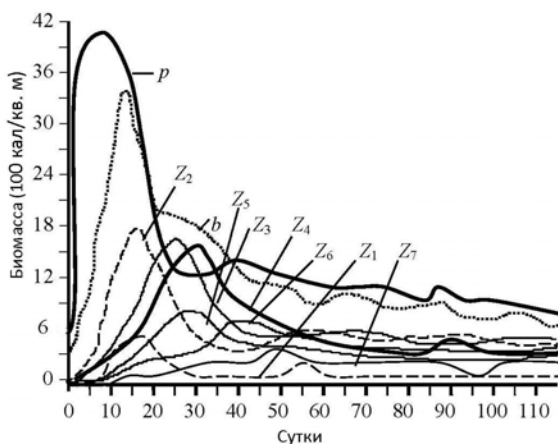


Рис. 4. Зависимость суммарной биомасс живых элементов экосистемы апвеллинговой зоны от времени в слое 0-200 м. Обозначения биомасс: *p* – фитопланктон, *b* – бактериопланктон, *Z*₁ – простейшие, *Z*₂ – микрозоопланктон, *Z*₃ – мелкие фильтраторы, *Z*₄ – крупные фильтраторы, *Z*₅ – мелкие хищники-циклопиды, *Z*₆ – хищники-каляноиды, *Z*₇ – крупные хищники хетогнаты и полихеты.

Биологическая сложность и фазовый портрет гидрохимической системы

Другим не менее информативным индикатором фазового состояния гидрохимической системы является биологическая сложность экосистемы, населяющей водный объект. Следуя [4] понятие биологической сложности рассмотрим с позиций экоинформатики, где формализуется взаимодействие различных элементов и процессов в гидрохимической системе с попыткой оценить и предсказать динамику этого взаимодействия путем введения шкалы биосложности. Биосложность является производной биологических, физических, химических, социальных и поведенческих взаимодействий подсистем окружающей среды, включая живые организмы и геофизические и геохимические факторы. По существу понятие биосложности в окружающем нас мире тесно связано с закономерностями функционирования биосферы как единства образующих ее экосистем и природно-хозяйственных систем различного масштаба, от локального до глобального. Поэтому для определения биосложности и ее оценки необходимо совместное формализованное описание биологических, геохимических, геофизических и антропогенных факторов и процессов, происходящих на данном уровне пространственно-временной иерархии шкал и масштабов.

Проявление биосложности является характерным признаком всех систем окружающей среды, связанных с жизнью. Элементы этого проявления изучаются в рамках теории устойчивости и живучести экосистем [4]. Здесь следует отметить, что формирование биосложности включает показатели степени взаимной модификации взаимодействующих систем, а это значит, что изучение биосложности необходимо вести с учетом как пространственных, так и биологических уровней организации. Трудность этой задачи определяется сложностью поведения объекта исследования, особенно, если учитывать человеческий фактор, из-за которого количество стрессовых ситуаций в окружающей среде постоянно возрастает.

Происходящие в окружающей среде процессы можно представить как совокупность взаимодействий между ее подсистемами. Поскольку человек является одним из ее элементов, однозначного расчленения окружающей среды, например, на биосферу и общество выполнить невозможно: все на Земле взаимосвязано. Вопрос состоит в том, чтобы найти такие механизмы описания подобных корреляций и взаимозависимостей, которые бы достоверно отображали динамику окружающей среды и давали ответы на следующие вопросы:

- 1) Каким образом сложность биологических, физических и социальных систем в окружающей среде возникает и изменяется?
- 2) Каковы механизмы спонтанного развития многих явлений в окружающей среде?
- 3) Каким образом системы окружающей среды с живыми компонентами, включая и те, которые созданы человеком, реагируют и приспосабливаются к стрессовым ситуациям?
- 4) Какими путями информация, энергия и вещество движутся внутри систем окружающей среды и через их уровни организации?
- 5) Возможно ли предсказать адаптируемость системы и прогностически оценить изменения в ней?
- 6) Как человечество влияет и реагирует на биосложность в природных системах?

К этому ряду можно добавить еще многие другие не менее важные и значимые вопросы. Например, до какого уровня сложности необходимо довести спутнико-

вые системы наблюдений за окружающей средой, чтобы поставляемой ими информации было достаточно для достоверной оценки состояния среды, хотя бы на момент получения информации? Не менее важен вопрос об оптимальности размещения средств геоинформационного мониторинга на различных уровнях уже сложившейся его организации.

Биосложность гидрохимической среды в определенной степени является индикатором взаимосвязанности ее систем. В этой связи, можно ввести шкалу Ξ биосложности, изменяющуюся от условий, когда в окружающей среде все взаимодействия прекращены (оборваны), до уровня, когда они соответствуют естественному процессу эволюции. Таким образом получаем интегральный показатель состояния окружающей среды в целом с учетом биологической способности (bioavailability), биологического разнообразия (biodiversity) и выживаемости (survivability). Подобный показатель характеризует все виды взаимодействия компонентов окружающей среды. Так, например, при биологическом взаимодействии, связанном с отношениями типа «хищник-жертва» или «конкуренция за энергетический ресурс», существует некоторый минимальный уровень наличия пищи, когда она становится практически недоступной и взаимодействие консумента с продуцентом прекращается. Химический и физический процессы взаимодействия элементов окружающей среды также зависят от наборов определенных критических параметров.

Все сказанное подчеркивает, что биосложность относится к категориям, которые трудно измерить и выразить количественно. Однако попытаемся перейти от чисто словесных рассуждений к формализованным количественным определениям. Для перехода к градациям шкалы Ξ с числовым масштабом постулируем, что между двумя значениями индикатора шкалы существуют отношения типа $\Xi_1 < \Xi_2$, $\Xi_1 > \Xi_2$ или $\Xi_1 \equiv \Xi_2$. Другими словами, всегда имеет место такое значение этой шкалы ρ , которое определяет уровень биосложности $\Xi \rightarrow \rho = f(\Xi)$, где f - некоторое преобразование понятия биосложности в число.

Попытаемся найти удовлетворительную модель, которая отобразит словесный портрет биосложности в область понятий и признаков, подчиняющихся формализованному описанию и преобразованию. С этой целью выделим в системе гидрохимической системе m элементов - подсистем низшего уровня, взаимодействие между которыми определим бинарной матричной функцией: $A = ||a_{ij}||$, где $a_{ij} = 0$, если элементы i и j не взаимодействуют; $a_{ij} > 0$, если элементы i и j находятся во взаимодействии. Тогда любая точка $\xi \in \Xi$ определяется как сумма

$$\xi = \sum_{i=1}^m \sum_{j>i}^m a_{ij}.$$

Ясно, что $\xi = \xi(\phi, \lambda, t)$, где ϕ и λ - географическая широта и долгота соответственно, t - текущее время. Для некоторой территории Ω индикатор биосложности определим как среднее значение

$$\xi_{\Omega}(t) = \frac{1}{\sigma} \int_{(\phi, \lambda) \in \Omega} \xi(\phi, \lambda, t) d\phi d\lambda,$$

где σ - площадь территории Ω .

Таким образом, индикатор $\xi_{\Omega}(t)$ выступает как интегральный показатель сложности гидрохимической системы, отражая индивидуальность ее структуры и поведения в каждый момент времени t в пространстве Ω . В соответствии с законами естественной эволюции уменьшение (увеличение) величины ξ_{Ω} будет отслеживать возрастание (сокращение) биоразнообразия и способности природно-антропогенных систем к выживанию. Так как уменьшение биоразнообразия нарушает замкнутость биогеохимических круговоротов и приводит к увеличению нагрузки на невозобновимые ресурсы, то бинарная структура матрицы A сдвигается в направлении усиления позиций ресурсоиспользующих технологий, и вектор энергетического обмена между элементами гидрохимической системы смещается в состояние, когда уровень ее выживаемости понижается.

Изменение фазового состояния любой экосистемы коррелирует со структурой ее трофической пирамиды и поэтому изменяется ее биологическая сложность. Рассмотрим этот процесс на примере экосистемы Охотского моря. Внимание к Охотскому морю, как уникальной экосистеме, обращено во многих исследованиях. Оно связано со стремлением понять происходящие здесь климатические и экологические процессы и установить их взаимосвязь с глобальными процессами, особенно в Арктическом бассейне. Для России и Японии это важно также и по экономическим причинам. Поэтому синтез модели экосистемы Охотского моря (МЭОМ), позволяющей давать прогнозную оценку состояния экосистемы в зависимости от глобальных и региональных изменений в окружающей среде, безусловно является актуальной задачей. Особенно с учетом нарастающего антропогенного воздействия как путем загрязнения, так и переексплуатации ее ресурсов.

Структура МЭОМ и схема энергетических потоков в экосистеме Охотского моря представлены на рис. 5 и 6 соответственно. Оценки некоторых параметров экосистемы даны в табл. 2-4. В табл. 4 принято $a_{ij} = \text{const} = 1$ для взаимодействующих элементов ЭОМ. Уравнения трофического графа записываются традиционным образом в виде балансовых соотношений [1-4], где принятые на рис. 5 и 6 обозначения используются при составлении соответствующих дифференциальных уравнений. В частности, изменение кислородного режима аппроксимируем решением уравнения:

$$\partial B_{O_2} / \partial t + V_{\varphi} \partial B_{O_2} / \partial \varphi + V_{\lambda} \partial B_{O_2} / \partial \lambda + V_z \partial B_{O_2} / \partial z = \xi_p R_p - \xi_z T_z - \xi_r T_r - \xi_D T_D - \xi_d R_d + O_A,$$

где O_A - функция, описывающая кислородный обмен на границе атмосфера-море, ξ_p - показатель продукции кислорода при фотосинтезе, ξ_i ($i=Z, r, D$) - коэффициент расходования кислорода при дыании i -го, гидробионта ξ_d - показатель расходования кислорода при разложении детрита.

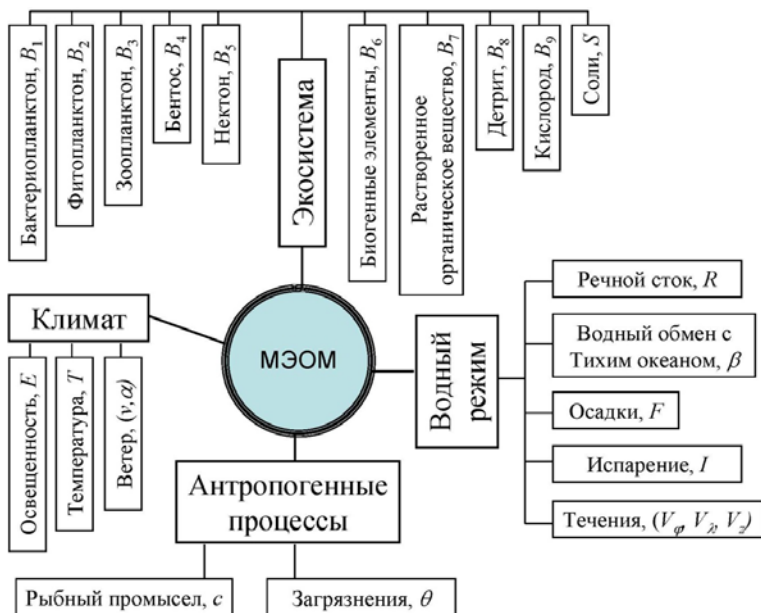


Рис.5. Структура модели экосистемы Охотского моря.

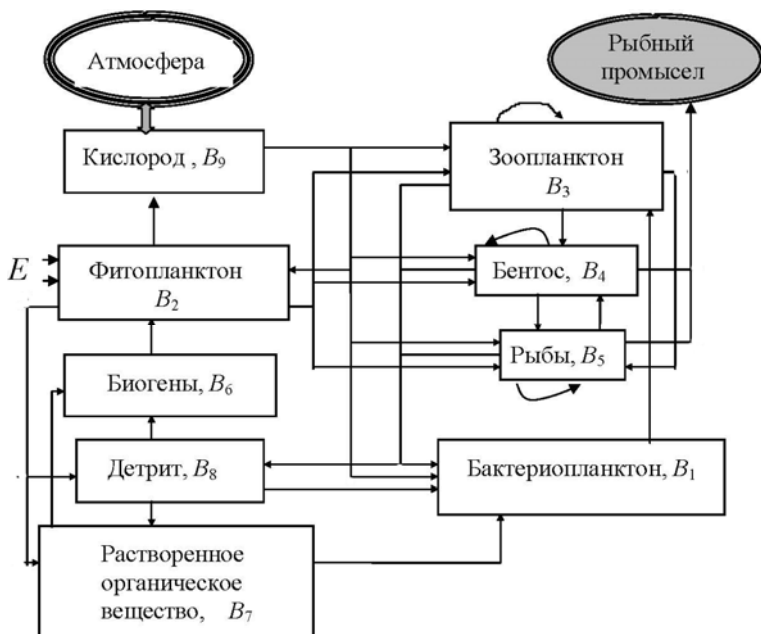


Рис. 6. Энергетические потоки в модели экосистемы Охотского моря.

Некоторые параметры экосистемы Охотского моря

Параметр	Оценка параметра
Площадь (тыс. км ²):	
без Курильских островов	1582.8
без всех островов	1579.9
без заливов	1385.1
Длина береговой линии (км)	10444
Объем моря (тыс. км ³)	1208.3-1227.7
Характерные глубины (м):	
максимальная	3379-3953
средняя	765-777
Средняя годовая температура атмосферы (°C):	
на севере	-7
на юге	+5.5
Годовой сток речных вод (км ³ /год):	585
ноябрь - апрель, %	10-15
май-октябрь, %	85-90
Материковый сток (мм / год)	370
Осадки на поверхность моря (мм / год)	500
Испарение с поверхности моря (мм / год)	300
Годовая амплитуда средней месячной температуры поверхностного слоя воды (°C)	10-15
Температура поверхностных вод (°C):	
зимой	- 1.8 ÷ +2
летом	+10 ÷ +18
Соленость (‰)	33-34

Таблица 3

Оценки параметров модели, использовавшиеся при численных расчетах решений уравнений МЭОМ, и вычисленное значение времени t^* (сут.) выхода популяции на минимальный уровень биомассы.

Элемент экосистемы	β_{12}	β_{21}	μ_2	t^* , сут
Простейшие	0,71	0,83	0,3	8,1
Фитофаги	0,41	2,0	0,25	23,2
Хищный зоопланктон	0,32	1,0	0,25	56,8
Зообентос	0,71	0,83	0,52	18,2
Мойва	0,35	0,83	0,23	33,3
Песчанка	0,13	0,68	0,07	74,7

Пространственную и сезонную динамику солености опишем балансовым соотношением:

$$V_i dS_i / dt = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left[\alpha_{ij} W_j S_j + \mu_{ij} (S_j - S_i) \right] + (1 - \beta_i) W_i S_i + f_i, \quad (i=1, \dots, N) \quad (2)$$

где N - число сегментов объема $V_i = \Delta\varphi\Delta\lambda\Delta z_i$, возникающих при разбиении водного тела Охотского моря в процессе дискретизации широты φ , долготы λ и глубины z ; μ_{ij} - объемный коэффициент диффузии, равный $\delta_{ij}\sigma_{ij}/L_i$ (L_i - средняя протяженность смежной границы i -го сегмента; σ_{ij} - площадь соприкосновения сегментов i и j ; δ_{ij} - коэффициент турбулентной диффузии); f_i - функция источника, описывающая внешнее поступление солей в i -ый сегмент (с осадками F , речным стоком R , из Тихого океана β , из донных отложений с подъемом воды); W_j - суммарный поток воды из j -го сегмента; α_{ij} - его доля, направленная в i -ый сегмент ($\alpha_{ij}=0$ для несмежных сегментов); β_i - доля потока W_i , направленная во внешнюю среду.

Таблица 4

Трофическая пирамида экосистемы Охотского моря, принимавшаяся во внимание при формировании индикатора биосложности.

Потребители энергии и вещества	Источники энергии и вещества																		
	B_1	B_2	M_1	M_2	X_1	B_4	K_1	R_1	P_1	B_{10}	B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{14}	B_{15}	B_{16}	B_{17}	B_6	B_8
Фитопланктон, B_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Бактериопланктон, B_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Простейшие, M_1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Фитофаги, M_2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Хищный зоопланктон, X_1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Зообентос, B_4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Камбала, K_1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Рогатковые, R_1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Песчанка, P_1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
Мойва, B_{10}	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Минтай, B_{11}	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Лосось, B_{12}	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0
Макрорусы, B_{13}	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Черный палтус, B_{14}	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Сельдь, B_{15}	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Крабы, B_{16}	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0
Лемонема, B_{17}	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Биогенные элементы, B_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Детрит, B_8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Население, B_{20}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Температурный режим вод Охотского моря будем представлять уравнением теплового баланса:

$$\rho c V_i dT_i / dt = \sum_j (W_{ij,A} + W_{ij,D}) - W_{i,S} + \Omega_{i,1} + \Omega_{i,2} \quad (3)$$

где T_i - средняя температура воды в i -м сегменте (°K); $W_{ij,A}$ - поступление тепла с потоком воды из j -го сегмента в i -ый; $W_{ij,D}$ - обмен теплом между i -м и j -м сегментами в результате турбулентного движения водных масс; $W_{i,S}$ - суммарный вынос тепла из j -го сегмента; $\Omega_{i,1}$ - поступление тепла с водными потоками через внешнюю границу; $\Omega_{i,2}$ - обмен теплом через внешние границы, не связанный с водными потоками; ρ - плотность морской воды (г/см^3); c - теплоемкость ($\text{кал}\cdot\text{г}^{-1}\cdot\text{град}^{-1}$).

Уравнения (2) и (3) описывают дискретный вариант имитационной модели. Такой полуэмпирический подход приемлем для климатической зоны Охотского моря и не требует проведения сложных вычислений. Обменные процессы водными массами между сегментами V_i ($i=1, \dots, N$) имитируются с учетом заложенных в базу данных сведений о направлениях и скоростях течений.

Функционирование экосистемы Охотского моря в значительной мере определяется суровыми климатическими условиями. Море в течение 6-7 месяцев в году по большей части своей акватории покрыто льдом 80-100 см толщиной. Поэтому в МЭОМ вертикальная структура Охотского моря представляется в виде разреза, показанного на рис. 7. С учетом этой схемы в зонах замерзания моря энергетические потоки рис. 6.36 усложняются за счет расчленения компонента *фитопланктон* по трем возможным средам. Схематически это отражено на рис. 8.

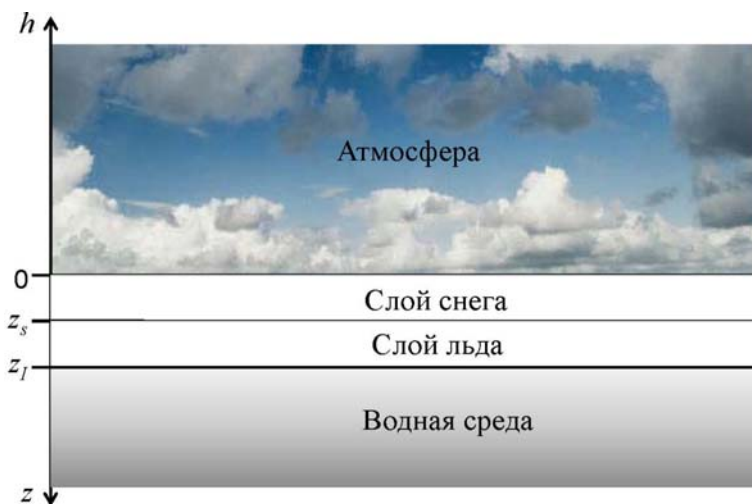


Рис. 7. Вертикальный разрез моделируемой среды произвольной акватории моря в условиях замерзания.

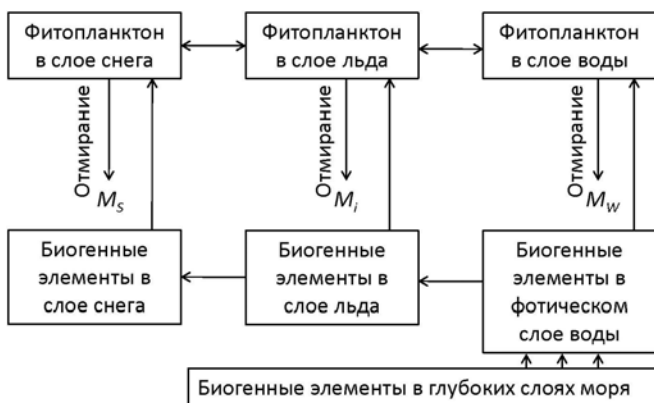


Рис. 8. Концептуальная структура блока модели, отвечающего за описание продукции фитопланктона в акваториях моря, покрытых льдом.

Наличие МЭОМ позволяет осуществить синтез системы мониторинга акватории Охотского моря и получать прогнозные оценки различных ее параметров. Принципиальная структура такой системы представлена на рис. 9. Такой режим пошагового мониторинга будет обеспечивать экономное использование технических средств рыбохозяйственного назначения. Примеры подобного использования МЭОМ приведены на рис. 10 и 11. Точность таких прогнозов зависит от полноты информационной базы. Серьезное внимание ее наполнению уделяется метеорологической службой Японии. С этой целью в г. Момбецу на северном побережье о. Хоккайдо создана система наблюдения за ледовой обстановкой Охотского моря, которая включает морскую стационарную станцию и наземный центр обработки спутниковой информации. На этой базе возможно эффективное внедрение ГИМС-технологии [4].

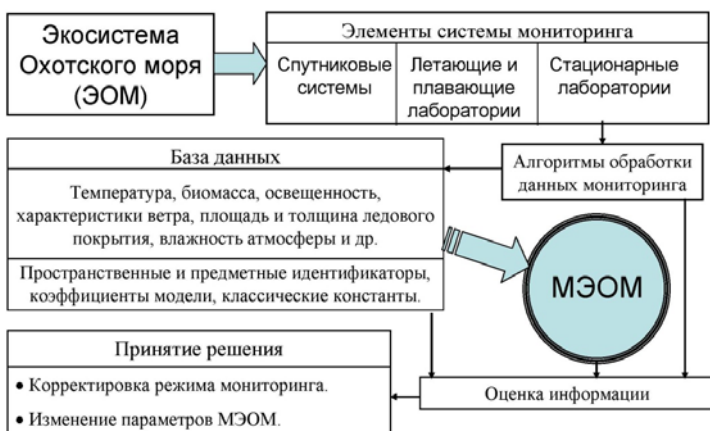


Рис. 9. Принципиальная схема реализации ГИМС-технологии в системе оценки выживания экосистемы охотского моря.

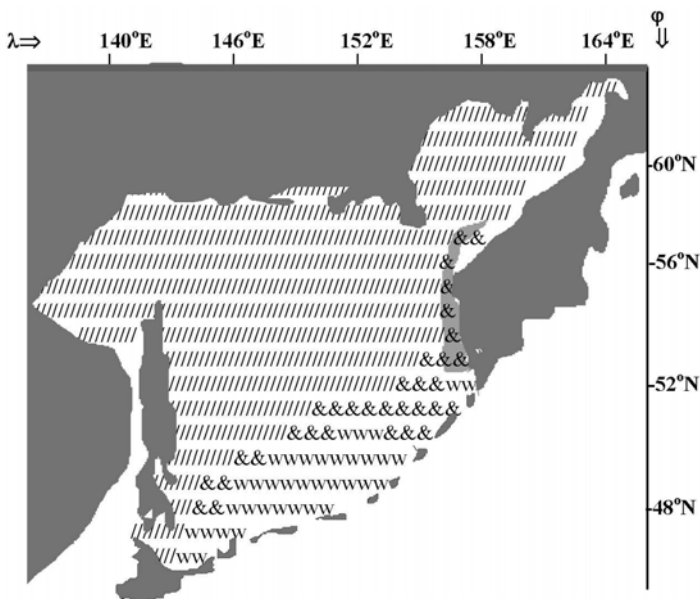


Рис. 10. Прогноз ледовой обстановки в Охотском море на февраль 2015 г. по начальным данным Японской метеорологической системы за ноябрь 2014 г. Расхождение прогноза с данными спутникового мониторинга отмечено выделенным шрифтом символов. Обозначения: / - устойчивый лед, & - неустойчивый лед, w – водная поверхность.

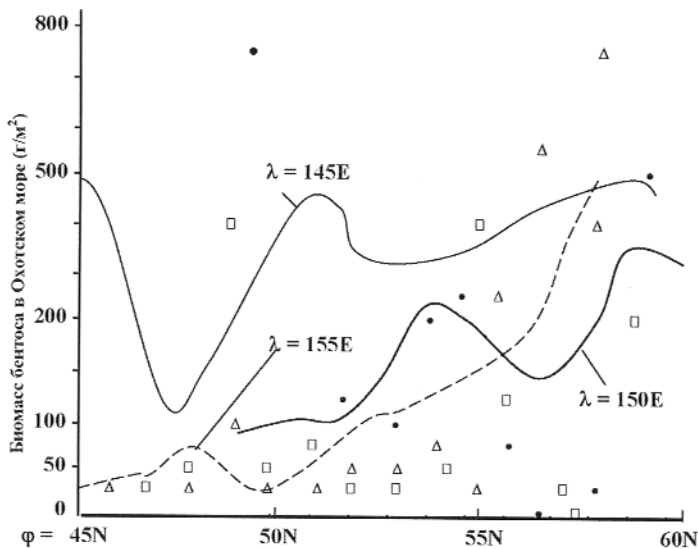


Рис. 11. Характеристика пространственного распределения биомассы бентоса в Охотском море. Символами отмечены оценки ряда авторов для различных координат.

Полезную информацию для промысловиков и специалистов по охране рыбных ресурсов Охотского моря дает индикатор биосложности. Примеры его расчета даются в на рис. 12 и в табл. 5. Такая методика расчета индикатора, вмонтированная в ГИМС, позволяет при минимальных затратах вполне комплексно оценивать запасы промысловых животных и прогнозировать последствия антропогенного воздействия на экосистему.

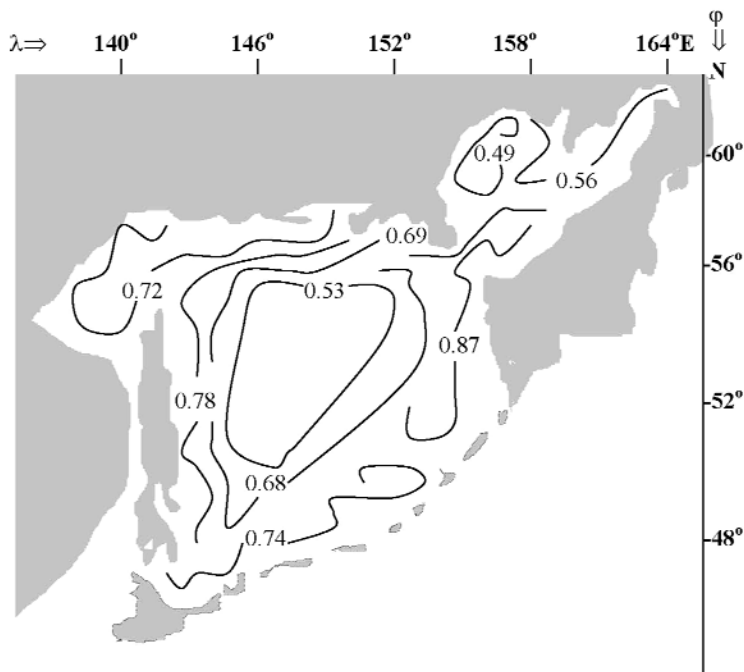


Рис. 12. Пространственное распределение индикатора биосложности $\xi^* = \xi/\xi_{\max}$ аквагеосистемы Охотского моря (табл. 2) в весенне-летний период.

Таблица 5

Оценка индикатора биосложности ξ^* аквагеосистемы Охотского моря для различных слоев по глубине и двух сезонов года. Обозначения:
1 – слой максимального фотосинтеза; 2 – $30 \leq z \leq 159$ м.;
3 – $150 < z \leq 750$ м; 4 – $750 < z \leq 1500$ м.; 5 – $z > 1500$ м.

Сезон года	Слой по глубине				
	1	2	3	4	5
Весенне-летний	0.89	0.93	0.62	0.34	0.21
Зима	0.31	0.49	0.71	0.39	0.22

Заключение

Наличие фазового портрета гидрохимического объекта облегчает принятие решения об оценке его состояния и проведения мероприятий по его охране. Понятие фазового портрета динамической системы в общепринятом смысле несколько отличается от рассмотренного здесь. Для получения фазовых траекторий необходимо иметь достаточно упрощенную модель системы. Безусловно, знание структуры фазового пространства с выделением особых точек, соответствующих состояниям равновесия системы или ее стационарным движениям, помогает выделить, например, опасные сочетания внешних воздействий. Возникающие здесь трудности в основном связаны с невозможностью аналитического решения соответствующих дифференциальных уравнений и соответствующего затруднения при восстановлении фазового пространства по результатам их численного решения. Поэтому для практических применений вводятся различные индикаторы и шкалы, которые позволяют идентифицировать фазовые состояния изучаемой системы на их основе.

Рассмотренные здесь индикаторы «пятнистость» и «биосложность» определяются в основном неоднородностью соответствующих физико-химических полей. Изменчивость различных процессов и явлений в гидрохимической системе, что можно охарактеризовать поведением этих индикаторов, охватывает широкий диапазон пространственных и временных масштабов. Этот широкий спектр изменчивости можно рассматривать как множество более узких спектральных диапазонов, в пределах каждого из которых выделяется некоторый доминантный фактор, влияющий на биологические и химические процессы. Отождествление шкал этих индикаторов с фазовыми состояниями гидрохимической системы позволяет упростить процедуру мониторинга и исключить лишние источники информации, оптимизировав структуру и расположение наблюдательных пунктов. Например, в случае лагуны Ньюк Нгот вместо десяти пунктов наблюдения достаточно использовать один пункт при сохранении уровня надежности при оценке состояния лагуны.

Список литературы (References)

1. Vinogradov M.E. Some problems of vertical distribution of meso- and microplankton in the ocean // In: J.H.S. Blaxter, A.J. Southward, A.V. Gebruk, E.C. Southward, P.A. Tyler (Eds.) *Advances in marine biology: The biogeography of the oceans*. New York: Academic Press, 1997. P. 2-93.
2. Krapivin V.F., Phillips G.W. A remote sensing-based expert system to study the Aral-Caspian aquageosystem water regime // *Remote Sensing of Environment*, 2001. V.75. P. 201-215.
3. Krapivin V.F. The estimation of the Peruvian current ecosystem by a mathematical model of biosphere. // *Ecological Modelling*, 1996. V.91. P. 1-14.
4. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Phillips G.W. *Global environmental change: Modelling and Monitoring*, Berlin: Springer, 2002. 319 pp.
5. Krapivin V.F., Mkrtchyan F.A. Spectroellipsometric tools for the water quality diagnostics in the Sea of Okhotsk // *Proceedings of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice*, 21-24 February 2016, Mombetsu, Hokaido, Japan. The Okhotsk Sea & Cold Ocean Research Association (OSCORA), Mombetsu, Hokkaido, Japan, 2016. P. 101-1104.

6. Krapivin V.F., Varotsos C.A., Soldatov V.Yu. Newecoinformatics tools in environmental science: Applications and Decision-making. London: Springer, 2015. 903 pp.
7. Krapivin V.F., Mkrtychyan F.A., Soldatov V.Yu. An expert system for the Okhotsk Sea investigation // Proceedings of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 21-24 February 2016, Mombetsu, Hokaido, Japan. The Okhotsk Sea & Cold Ocean Research Association (OSCORA), Mombetsu, Hokkaido, Japan, 2016. P. 304-307.
8. Krapivin V.F., Shutko A.M. Information technologies for remote monitoring of the environment. Chichester U.K.: Springer/Praxis, 2012. 498 pp.
9. Huston M.A., Wolverton S. The global distribution of net primary production: resolving the paradox. Ecological Monographs, 2009, V.79, No.3, pp. 343-377.
10. Killus K. Space heterogeneity of hydrophysical-hydrochemical fields in shallow overgrown lake. Limnological Review, 2005, No.5, pp. 117-122.
11. Lauenroth W.K., Skogerboe G.V., Flug H. (Eds.) Analysis of ecological systems: State-of-the-art in ecological modeling. Copenhagen, Denmark: Elsevier, 1983. 997 pp.
12. Parsekian A.D., Regnery J., Wing A.D., Knight R., Drewes J.E. Geophysical and hydrochemical identification of flow paths with implications for water quality at an ARR site. Groundwater Monitoring & Remediation, 2014, Vol.34, No.3, pp. 105-116.
13. Schlitzer R., Moufray P., Hoepffner N. Global ocean productivity and the fluxes of carbon and nutrients: combining observations and models. Baltimore USA: Joint Global Ocean Flux Study, 2002, Report No. 38, 69 pp.
14. Smagin A.V., Kol'tsov I.N., Pepelov I.L., Kirichenko A.V., Sadovnikova N.B., Kinzhaev R.R. The physical state of finely dispersed soil-like system with drilling sludge as an example. Eurasian Soil Science, 2011, Vol.44, No.2, pp. 163-172.
15. Suk H., Lee K.-K. Characterization of a ground water hydrochemical system through multivariate analysis: Clustering into ground water zones. Ground Water, 1999, Vol.37, No.3, pp. 358-366.
16. Yan D. Cluster analysis of geochemical data to study groundwater hydrochemical distribution characteristics in shallow aquifer on north of Ordos basin. Proceedings of the international Symposium on Water Resource and Environmental Protection (ISWREP), 20-22 May 2011, Xi'an, China. IEEE, 2011, Vol. 1, pp. 670-672.
17. Yidana S.M., Banoeng-Yakubo B., sankyi P.A. Identifying key processes in the hydrochemistry of a basin through the combined use of factor and regression models. J. Earth Syst. Sci., 2012, Vol.121, No.2, pp. 491-507.