

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТИЗА, АУДИТ И МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ В ЗАДАЧЕ МОНИТОРИНГА ГИДРОФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ ЛАГУНЫ НЬЮК НГОТ (ЮЖНЫЙ ВЬЕТНАМ)

*Канд. ф.-м. наук В.Ю. Солдатов, д.ф.-м.н., проф. В.Ф. Крапивин¹,
к.т.н. И.И. Потопов²*

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва.

² Всероссийский институт научной и технической информации РАН,
Москва (ipotapov37@mail.ru)

Рассмотрены вопросы оптимизации режима мониторинга гидрологических объектов на примере лагуны Ньюк Нгот, расположенной на побережье Южного Вьетнама. Предложена новая экономически эффективная технология организации измерений характеристик лагуны. Технология базируется на применении геоэкологической информационно-моделирующей системы, которая позволяет оптимизировать режим мониторинга гидрофизического объекта регионального масштаба за счет эффективного сочетания результатов наблюдения за объектом и моделирования его динамики. Сформирована многофункциональная информационно-моделирующая система, отражающая взаимодействие гидрологических и гидрохимических процессов в зоне влияния лагуны. Приведены оценки точности предложенной системы мониторинга лагуны. Показано, что новая технология обеспечивает сокращение ресурсов на реализацию достоверной оценки состояния лагуны в условиях наличия внешних воздействий. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (Грант № 16-01-00213).

Ключевые слова: мониторинг, лагуна, оптимизация, алгоритм, прогноз, модель.

DECISION MAKING ALGORITHM FOR THE HYDROPHYSICAL SYSTEM MONITORING TASK ON THE NYOK NGOT LAGOON CASE (SOUTH VIETNAM)

V.Yu. Soldatov, V.F.Krapivin, I.I.Potapov

The questions of the monitoring regime optimization for hydrological objects on the Nuoc Ngot Lagoon example are considered. Lagoon is located in coastal zone of South Vietnam. New economically efficient technology is proposed to be used for the organization of measurements of the lagoon characteristics. Technology is based on the application of utjtcolo-

gical information-modeling system that allows the optimization of regional hydrophysical object monitoring due to the effective combination of on-site measurements and modeling results. Multi-functional information-modeling system is synthesized that reflects interactions of hydrologic and hydrochemical processes in the lagoon zone. Assessments of the precisions of proposed monitoring system of the lagoon. It is shown that new technology provides significant reduction of resources for the realization of reliable evaluation of the lagoon state under the conditions when external anthropogenic impacts exist.

Key words: monitoring, lagoon, optimization, algorithm, prognosis, model.

Введение

Проблема оптимизации экологического мониторинга водных объектов хозяйственного назначения решается различными способами. Основная цель состоит в обеспечении долговременной экологической безопасности водного объекта в условиях антропогенного воздействия. Одним из эффективных способов достижения устойчивого режима функционирования экологической системы (ГИМС) является использование геоэкологической информационно-моделирующей системы, обеспечивающей контроль и прогнозирование эволюционных изменений в экосистеме на основе сбалансированного сочетания измерений и модельных расчетов ее характеристик [5]. Ряд разработок ГИМС показал, что поиск оптимальных сочетаний полевых наблюдений и результатов моделирования позволяет найти условия сбалансированного режима мониторинга [7,8,17, 18, 22].

Разработка ГИМС для водного объекта начинается с создания математической модели, основанной на имеющихся априорных данных об этом объекте. Базовыми элементами такой модели являются гидрологическая модель территории влияния водного объекта, наборы ГИС с информацией о почвенно-растительных формациях, структуре гидрологической сети и распределения антропогенных источников загрязнения. Последовательная процедура корректировки модели экосистемы водного объекта по результатам сравнения измерений и модельных оценок позволяет найти такой режим мониторинга, который обеспечивает экономное использование технических и финансовых средств с обеспечением заданного уровня надежности его результатов. В данной работе в качестве объекта применения ГИМС выбрана характерная для Вьетнамского побережья Южно-Китайского моря лагуна Нюк Нгот, имеющая рыбохозяйственное значение [1,2,20].

Общая характеристика лагуны Нюк Нгот

Лагуна Нюк Нгот (Nuok Ngot, северная широта $14^{\circ}9'0''$, восточная долгота $109^{\circ}10'59''$) расположена в центральной части побережья Южно-Китайского моря в провинции Бинь Динь [1,2,12,14]. В табл. 1 указаны основные характеристики лагуны. Лагуна находится в зоне происходящего и особенно ожидаемого интенсивного антропогенного воздействия, в основном связанного с функционированием сельскохозяйственных предприятий [14]. Хозяйственное значение лагуны определяется уровнем продуктивности ее экосистемы, выражаемое объемом вылавливаемой рыбы и креветок. Контроль состояния экосистемы лагуны осуществляется регулярно путем взятия

проб воды в десяти точках ее акватории с учетом деления тела лагуны на три слоя по вертикали: поверхностный, средний и придонный. При этом измеряются направление и скорость течений, соленость, мутность, биомасса фитопланктона, численность зоопланктона и биомасса зообентоса. Анализы химического состава проб воды проводятся в лаборатории гидрохимии Южного филиала НИИ нефтяных исследований Вьетнама (г. Хошимин). Метеорологические данные обеспечиваются метеостанцией Квин Нён.

Таблица 1

Перечень основных параметров лагуны Ньюк Нгот

Параметр	Оценка параметра
Площадь, км ²	14,7
Скорость ветра, м/с	
Средняя	1,9
Максимальная	39,6
Температура воздуха, °С	
Средняя	27,0
Минимальная	15,8
Максимальная	39,9
Относительная влажность атмосферы, мб	
Средняя	27,9
Минимальная	20,0
Максимальная	32,7
Солнечная радиация, Ккал/см ²	144
Радиационный баланс, Ккал/см ²	92,5
Осадки, мм/год	
Средние	1692,9
Минимальные	778,0
Максимальные	2587,0
Колебания уровня лагуны	-44см - +59 см
Температура верхнего слоя, °С	
Сухой сезон	26
Дождливый сезон	29
Распределение глубин:	
Средняя глубина, м	1,6
Максимальная глубина, м	9,8

Лагуна соединена с морем узкой протокой Де Ги и качество воды в ней зависит от режима приливов и отливов, а также от выпадающих в нее речек и берегового стока. Качество воды в лагуне определяется совокупностью приливо-отливного процесса и речным и береговым стоками. Для поддержания стабильного качества воды в лагуне осуществляется регулирование приливо-отливного процесса путем открытия или закрытия шлюза в протоке. Решение о режиме регулирования приливо-отливного процесса принимается с задержкой около суток после получения результатов анализа взятых накануне проб воды и донных осадков в десяти равномерно расположенных по акватории лагуны точках. При отсутствии регулирования, например, соленость воды может колебаться от 2,5 ‰ в устьях впадающих в лагуну речек до 23,5 ‰ и 33,0 ‰ в дождливый и сухой сезоны, соответственно, в центре лагуны.

В данной работе предлагается экономически целесообразный метод диагностики качества воды в лагуне, основанный на технологии синтеза геоэкологических информационно-моделирующих систем (ГИМС-технология) и методике спектрального спектроэллипсометрического распознавания водных растворов.

В работах [17,21] была предложена геоэкологическая информационно-моделирующая система (ГИМС), которая позволяет оптимизировать режим мониторинга гидрофизического объекта регионального масштаба за счет эффективного сочетания результатов наблюдения за объектом и моделирования его динамики. В данной работе методика ГИМС применяется к лагуне Ньюк Нгот. Состояние лагуны характеризуется большим разнообразием параметров, определяющих динамику ее функционирования с учетом взаимодействия с прилегающими территориями. Среди них, такие как характеризующие тип почвы и растительности, водный режим территории, солевой состав почво-грунтов, уровень залегания грунтовых вод, структура расположения антропогенных объектов и многие другие. Требуемая информация об указанных параметрах может быть получена с различной степенью достоверности и производительности из данных наземных наблюдений, дистанционных измерений и из банков данных географических информационных систем, где содержится априорная информация, накопленная в прошлые годы. ГИМС-технология позволяет принять решение об управлении гидрофизическим объектом с учетом анализа всей доступной информации и осуществить прогноз его эволюции.

Информационно-моделирующая система для лагуны Ньюк Нгот (ИМСЛНН)

Согласно общей технологии синтеза ГИМС необходимо создание имитационной модели контролируемого природного объекта с учетом априорной информации о нем и последующей регулярной оценке расхождений между результатами моделирования и наблюдений. В зависимости от уровня этих расхождений осуществляется корректировка модели или изменение режима измерений с учетом экономических и технических факторов. В результате формируется режим мониторинга, обеспечивающий прогнозирование состояния гидрофизического объекта с заданной точностью по эпизодическим во времени и фрагментарным по пространству данным измерений. Общая схема такой процедуры формирования режима мониторинга лагуны Ньюк Нгот представлена на рис. 1.

Блоки ИМСЛНН, реализующие формирование пространственной базы данных, моделирование топографической структуры, компьютерное картографирование и визуализацию, реализованы с помощью ГИС-технологии. Для любого уровня пространственного разрешения $\Delta\varphi \times \Delta\lambda$ в базе данных формируется информационный слой из наборов идентификаторов, отождествляющих элементы лагуны с географическими координатами (φ, λ) и контроль которых осуществляется управляющим блоком, и данные из которых воспринимаются соответствующими функциями-блоками ИМСЛНН.

Функционирование ИМСЛНН обеспечивается двухуровневой процедурой управления гидрохимическим экспериментом в соответствии с иерархической схемой выполнения промежуточных операций различными

ее блоками согласно схеме рис. 1. Основные функциональные возможности системы состоят в осуществлении следующих операций:

- запрос данных о любом идентификаторе (массиве) и произведение коррекции любого его фрагмента;
- запрос оценки всех или части параметров имитационных блоков и их корректировка;
- выделение набора параметров и идентификаторов для более оперативного доступа к ним в режиме анализа состояния лагуны и ее окрестностей;
- прогноз состояния лагуны на заданную глубину по времени или до выполнения заданного критерия качества водной среды (например, превышение ПДК, переход в критическое состояние).

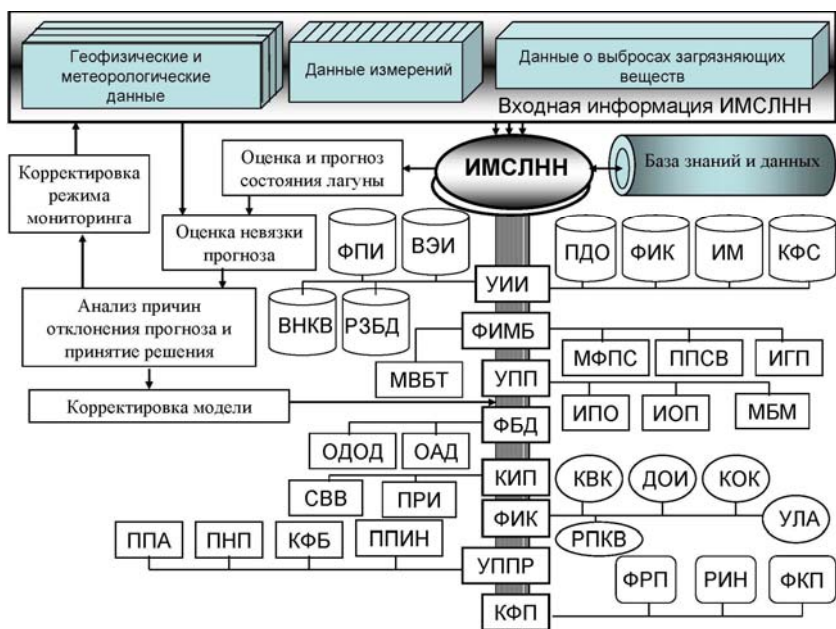


Рис. 1. Концепция геоэкологической информационно-моделирующей системы (ГИМС) для исследования гидрофизических, гидрологических и гидрохимических процессов в лагуне Ньюк Нгот. Принципиальная схема функционирования ГИМС в режиме адаптивного корректирования параметрического пространства модели геоэкологической системы зоны лагуны Ньюк Нгот и стратегии мониторинга. Блоки ИМСЛНН охарактеризованы в табл. 2 и 3.

ИМСЛНН обладает свойствами универсальности с возможностью предметной адаптации. Для реализации этой возможности вся акватория лагуны и прилегающей территории описывается множеством $\Omega = \{(\phi, \lambda) : \phi_1(\phi, \lambda) \leq \phi \leq \phi_2(\phi, \lambda), \lambda_1(\phi, \lambda) \leq \lambda \leq \lambda_2(\phi, \lambda)\}$, где ϕ - широта. λ - долгот

та. Водное тело лагуны образует пространство $\Xi = \{(\phi, \lambda, Z)\}$, где Z - глубина. Пространство Ξ делится на пиксели $\Xi_{ijk} = \{(\phi, \lambda, z): \phi_i \leq \phi \leq \phi_{i+1}; \lambda_j \leq \lambda \leq \lambda_{j+1}; Z_k \leq z \leq Z_{k+1}; i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m; k = 1, \dots, s\}$. Величины $\Delta\phi = \phi_{i+1} - \phi_i$, $\Delta\lambda_j = \lambda_{j+1} - \lambda_j$ и $\Delta Z_k = Z_{k+1} - Z_k$ являются свободными параметрами, выбор которых зависит от требуемой точности результатов диагностики экосистемы лагуны. Граница между лагуной и окружающим пространством делится на две части: граница с суши B и граница с морской средой G .

Таблица 2

Блоки первого уровня ИМСЛНН

Блок	Функции блока
УИИ	Универсальный информационный интерфейс
ФИМВ	Формирование имитационной модели влагооборота. Управление моделями и алгоритмами описания гидрофизических, гидрохимических и гидрологических процессов.
УПП	Управление параметризацией потоков энергии и вещества в лагуне. Реализация механизмов трансформации химических элементов в водной среде.
ФБД	Формирование базы данных и синтез сценариев антропогенных процессов в зоне функционирования лагуны.
КИП	Контроль информационных потоков между блоками системы.
ФИК	Формирование и использование критериев качества водной среды.
УППР	Управление процедурами принятия статистических решений.
КФП	Контроль фазовых переходов в лагуне.

Таблица 3

Блоки второго уровня ИМСЛНН

Блок	Функции блока
ФПИ	Формирование предметных идентификаторов для адаптации системы к конфигурации территории в зоне лагуны с учетом геофизической, экологической и социально-экономической структуры [2, 12].
ВЭИ	Восприятие экспериментальной информации, ее масштабирование и занесение в базу данных.
РЗБД	Реализация запросов к базе данных. Обслуживание регламентных запросов.
ПДО	Поддержка действий оператора при выборе и изменении формы информационного и пользовательского интерфейсов.
ФИК	Формирование информационных карт о качестве воды в лагуне и на прилегающей территории.
ИМ	Изменение масштабов представления картографической информации с выделением фрагментов территории лагуны.
КФС	Контроль функций системы, обеспечивающий согласование информационных потоков внутри системы, выявление дефектных запросов и сообщений, предупреждение о неправильных (или запрещенных) командах оператора, подсказка пользователю.

ВНКВ	Выявление нарушений качества воды и информирование оператора об этих нарушениях.
МВБТ	Модель водного баланса территории, занятой лагуной [5,6].
МФПС	Модель формирования сложного многофакторного процесса поверхностного стока с учетом топографии водосбора и почвенно-растительного покрова [3,11].
ППСВ	Параметризация потоков сточных вод в лагуны.
ИГП	Имитация гидрофизических процессов [21].
РПКВ	Расчет показателей качества воды [15,16,19].
МБМ	Моделирование механизмов трансформации химических элементов в воде [20].
ИОП	Имитация обменных процессов на границе лагуны с морем, включая приливно-отливные процессы, взаимодействие с атмосферой [1,4,5,9].
ИПО	Имитация процессов обмена химическими элементами между атмосферой и водной поверхностью [4].
ОАД	Обновляемый архив данных об объемах и составе загрязняющих веществ, выбрасываемых в окружающую среду предприятиями сельскохозяйственных, промышленных и муниципальных систем, расположенных в зоне функционирования лагуны.
ОДОД	Оценка достоверности официальных данных, заносимых в архив.
ПРИ	Приведение разнородной информации к единому стандарту.
СВВ	Согласование входов и выходов блоков и их связей с базой данных.
КВК	Контроль выполнения критериев качества воды [7,8,13].
ДОИ	Документирование оперативной информации о качестве водной среды.
УЛА	Учет лабораторных анализов качества водной среды [6,7,13].
КОК	Комплексная оценка качества водной среды.
ПНП	Процедура Неймана-Пирсона принятия статистических решений [21].
ППА	Процедура последовательного анализа принятия статистических решений [2,9].
КФБ	Контроль функционирования блоков информационно-моделирующей системы.
ППИН	Процедура преодоления информационной неопределенности [18, 21].
ФРП	Формирование рядов метеорологических и геофизических характеристик.
РИН	Расчет индикаторов неустойчивости и биологической сложности лагуны.
ФКП	Формирование кластерного пространства [21].

Базовыми блоками ИМСАНН являются блоки, имитирующие круговорот воды в лагуне и динамику ее химического состава. Существенной причиной изменения динамики качества водной среды лагуны является режим приливно-отливного процесса, имитируемого в блоке ИОП. Принимается, что процесс прилива или отлива подчиняется периодическому закону движения масс воды через границу Γ в двух противоположных направлениях, ортогональных Γ и чередующихся через интервал времени τ . На основе наблюдений величина τ задается в виде ступенчатой функции. Пусть в некоторый момент t_{\max} скорость движения воды v через Γ достигает величины v_{\max} . Тогда принимаем

$$v(\phi, \lambda, t) = v_{\Gamma}(t) = v_{\max} \left| \cos \left[\frac{\pi(t - t_{\max})}{\tau} \right] \right|, (\phi, \lambda) \in \Gamma; t \in \left[t_{\max} - \frac{\tau}{2}, t_{\max} + \frac{\tau}{2} \right].$$

Направление движения воды в лагуне меняется на противоположное при отливах и приливах. Эталонные направления течений в виде совокупности матриц $\left\{ \left\| \alpha_{ij}^k \right\| \right\}$, хранятся в базе данных с их привязкой к сетке $\Delta\phi \times \Delta\lambda$ на трех уровнях по глубине z ($k=1$ -поверхностный, $k=2$ - средний и $k=3$ - при-

донный). Алгоритм переключения течения прост: через каждый промежуток времени τ течения меняют направления с α_{ij}^k в Ξ_{ijk} на $\alpha_{ij}^k + \pi$ и наоборот. Максимальное изменение глубины в Ξ рассчитывается по формуле:

$$z_p(\phi, \lambda, t) = z_0(\phi, \lambda, t) + \sigma_r V_{\max} \frac{\tau}{2\pi},$$

где σ_r - интегральная оценка площади сечения входа в лагуну из открытого моря через границу Γ , z_0 - распределение глубин в Ξ в момент окончания отлива, σ - площадь лагуны. В этом случае изменение глубин в Ξ рассчитывается в блоке ИГП по формулам Чубаренко [10] и Семенова, Лулева [9].

Блок МВБГ описывает водный баланс непосредственно всего региона, влияющего на акваторию лагуны. В расчетах учитываются корреляции и оценки, усредняющиеся по локальным территориям, прилегающим к лагуне. Нестационарность климатической обстановки и изменчивость структуры земных покровов отражены в уравнениях водного баланса согласно [21].

Основной модели водного баланса региона лагуны является типовая модель регионального баланса влаги на ограниченной территории [5,21]. Каждый пиксель $\Delta\phi \times \Delta\lambda$ может иметь часть речной сети, лагуны и участков суши. Согласно ландшафтно-гидрологическому принципу в зоне функционирования лагуны выделены m фаций, отражающие элементы типизации флористического фона, конкретный вид которого обуславливается микрорельефом, типом и свойствами почвы, поверхностным увлажнением, глубиной залегания грунтовых вод и другими факторами. С учетом этого формируется замкнутая система балансовых уравнений, которая используется для вычислений объемов потоков воды между выделенными на схеме рис. 2 резервуарами. Система балансовых уравнений имеет вид:

$$dW / dt = V + E + L + T - R - B - U,$$

$$dC / dt = B + Y + Q - V - S,$$

$$d\Phi / dt = U - L - Q - T,$$

где все переменные в правой части уравнений рассчитываются с учетом выделения на прилегающей к лагуне территории суши m однородных фаций, каждая из которых может включать несколько пикселей Ω_{ij} характеристики которых близки. Этот шаг сокращает объем вычислительных операций. Зависимости потоков от геофизических параметров детально описаны в работах [4,11].

Функциональные представления для всех потоков схемы рис. 2 записаны на основе законов гидродинамики и с учетом имеющейся экспериментальной информации. Приток E и отток R влаги определяется по данным многолетних наблюдений с учетом динамики во времени. В промежутках между измерениями используется оперативная информация о скорости ветра с учетом атмосферной влаги на наветренной границе региона. Сведения об осадках и стоке входят в информационные каталоги вьетнамских гидрометеослужб и, в частности, метеостанции Квин Нён. На основе этих данных построены соответствующие блоки модели.

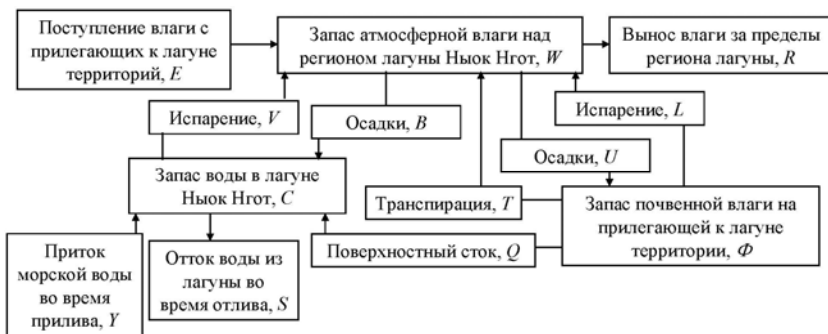


Рис. 2. Блок-схема модели водного баланса региона лагуны Ньюк Нгот.

Блок МФПС реализует модель поверхностного стока и обеспечивает формирование потока $F(\phi, \lambda, \xi, \eta, d, t)$ химического элемента типа ξ в состоянии η с параметром d в момент времени t . Считается, что поток F формируется только за счет стока осадков или воды, используемой для сельскохозяйственных полей (в основном рисовые плантации):

$$F(\phi, \lambda, \xi, \eta, d, t) = \theta(\phi, \lambda, \xi, \eta, d, t) \cdot Q(\phi, \lambda, t) \cdot k(\xi, \eta, d, t),$$

где коэффициент захвата k в данном случае является коэффициентом вымывания, θ - концентрация химического элемента в почве, Q - поверхностный сток.

Блок ИПО имитирует взаимодействие поверхности лагуны с атмосферой при предположении, что перенос химических элементов из лагуны в атмосферу происходит в процессах испарения и газового обмена. Эти процессы включают потоки $H(q, \xi, \eta, d)$, где параметр q описывает вид потока ($q=1$ - дождь; $q=2$ - сухое осаждение; $q=3$ - испарение; $q=4$ - брызги; $q=5$ - аэрация); ξ - тип загрязнителя; η - состояние загрязнителя ($\eta=1$ - растворенная фракция, $\eta=2$ - пыль); d - идентификатор физического состояния загрязнителя ($d=0$ для газа или растворенной фракции, $d>0$ отражает величину диаметра частиц пыли в микронах).

Оптимизация режима мониторинга лагуны Ньюк Нгот

Рассмотрим задачу оптимизации существующего режима мониторинга качества воды в лагуне Ньюк Нгот (рис. 3) с помощью ИМСЛНН. На основе использования ИМСЛНН были проведены имитационные эксперименты, которые обеспечивали реконструкцию пространственного распределения качества воды с прогнозом до месяца. Полученные результаты оценивались их сравнением с данными наблюдений.

Полученные результаты представлены на рис. 4, в табл. 4 и 5. Акватория лагуны Ньюк Нгот связана с открытым морем через четко определенную границу G , где установлен регулятор потока воды в лагуну из моря при при-

ливне и из лагуны при отливе. Как показали расчеты все гидрофизические и физико-химические характеристики лагуны однозначно зависят от процессов на этой границе и процессов на границе суша-лагуна. Последние включают речной и береговой стоки. Следовательно, если в базе данных и базе знаний ИМСЛАНН регулярно обновлять информацию об этих процессах, то проведение измерений на внутренней территории самой лагуны не требуется. Режим поступления данных определяется в зависимости от требуемой точности прогноза.

Из результатов табл. 4 и 5 следует, что пространственное распределение солёности в акватории лагуны можно восстановить с погрешностью не более 16% в течение двух недель. Наибольшее расхождение экспериментальных данных и результатов моделирования наблюдается в пунктах 3 и 7 при оценке PO_4^{3-} . Причина, по-видимому, заключается в том, что в блоке МБМ не учтены в достаточной мере процессы вымывания химических элементов из донных отложений. Это видно из того, что измерения содержания PO_4^{3-} в этих пунктах в донных отложениях показали аномальные выбросы. Следовательно, в соответствующих уравнениях блока МБМ и других блоках (ИГП, ИПО) необходимо дополнительно в текущем режиме корректировать соответствующие коэффициенты.

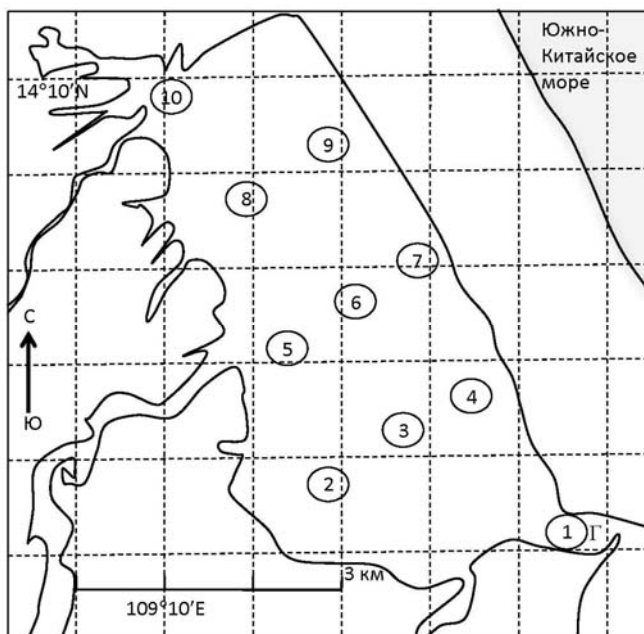


Рис. 3. Схема расположения зон взятия проб воды в лагуны Ньок Нгот в существующей системе мониторинга [1].

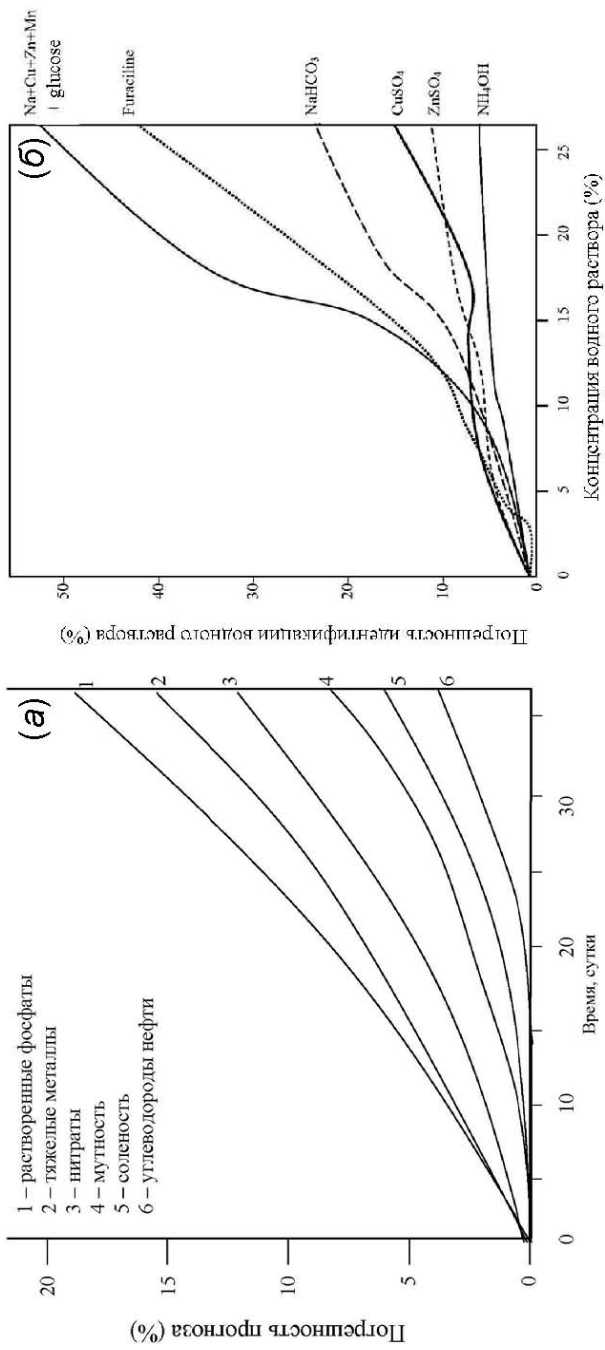


Рис. 4. Зависимость невязки прогноза (а) от его глубины во времени и ошибки идентификации (б) водного раствора от его концентрации для наиболее значимых характеристик качества воды в лагуне Ньюк Нгот, оцененная по данным мониторинга.

Таблица 4

Оценка эффективности ИМСЛНН при реконструкции пространственного распределения качества воды в лагуне Ньюк Нгот. Начальные значения показателей качества брались в устье лагуны (граница Г-контрольный пункт №1).
Обозначения: М – модельное значение, Э – экспериментально оцененное значение

Пункт измерения	Соленость, ‰		Мутность, мг/л		рН		PO ₄ ⁻³ , мг/л	
	М	Э	М	Э	М	Э	М	Э
1	30,15	33,5	12,40	10	7,04	7,82	0,033	0,03
2	23,14	26,0	24,78	21	7,71	7,79	0,034	0,03
3	26,48	29,1	29,70	27	7,66	7,58	0,068	0,45
4	27,37	32,2	26,88	24	8,01	7,78	0,023	0,02
5	28,53	31,7	45,59	47	7,29	7,84	0,042	0,04
6	28,40	26,3	29,97	27	7,22	7,52	0,082	0,10
7	27,50	25,7	23,94	21	7,45	7,30	0,067	0,35
8	26,16	25,4	34,58	38	7,21	7,75	0,023	0,02
9	26,54	30,5	48,45	51	7,09	7,71	0,023	0,02
10	20,95	26,5	60,48	63	7,63	7,00	0,039	0,05
Средняя ошибка, %	10,7		11,0		6,0		15,4	

Таблица 5

Оценка эффективности ИМСЛНН при прогнозировании уровня солености в лагуне Ньюк Нгот по данным измерений в контрольных пунктах

Контрольный пункт измерения солености воды в лагуне	Измеренное значение солености воды (‰) (начальные данные), t ₀	Прогноз и погрешность (%)				
		t ₀ + 7 суток	t ₀ + 14 суток	t ₀ + 21 сутки	t ₀ + 1 месяц	t ₀ + 1,5 месяца
1 (граница Г)	30,2	32,0(5)	32,8(9)	26,4(10)	29,3(12)	34,4(14)
2	33,6	32,8(2)	34,4(10)	27,6(15)	26,4(19)	25,7(23)
3	33,6	32,4(5)	33,7(12)	37,5(17)	25,9(19)	26,2(22)
4	33,7	33,4(4)	28,3(12)	37,8(17)	26,6(20)	25,6(24)
5	33,8	33,4(4)	28,8(11)	27,6(17)	25,2(20)	26,5(22)
6	33,8	31,0(8)	30,9(12)	27,8(17)	27,5(20)	25,3(25)
7	30,7	31,4(3)	34,9(13)	27,9(17)	30,2(9)	34,5(19)
8	32,4	34,7(7)	30,9(9)	34,9(16)	26,6(19)	25,2(22)
9	32,5	33,0(6)	29,4(10)	28,6(18)	28,3(20)	25,1(23)
10	30,4	31,9(9)	33,2(12)	34,5(17)	33,2(10)	27,8(24)

Тем не менее, результаты табл. 4 и 5 позволяют сделать вывод о том, что для надежного мониторинга тела лагуны достаточно проводить измерения только в устье лагуны с частотой, определяемой требуемой точностью. В частности, если требуемая точность не превышает 15%, то, как следует из рис. 4, измерения можно проводить один раз в месяц. Точность прогноза

качества воды будет определяться точностью метеорологического прогноза. Для климатических условий Вьетнама, характеризующихся высокой степенью бинарной устойчивости, влияние этого фактора на достоверность прогнозов качества воды в лагуне Ньюк Нгот незначительно.

На рис. 5 представлены результаты оценок максимальных ошибок прогноза на один месяц в среднем за год с выделением периодов сухого и влажного сезонов. Наблюдается устойчивое значение ошибок прогноза физико-химических характеристик лагуны в период сухого сезона и незначительная их неустойчивость в сезон дождей. Отсюда следует, что в сезон дождей интервал для прогноза необходимо сократить, чтобы обеспечить ошибку прогноза на уровне сухого сезона.

Таким образом, применение ИМСЛНН позволяет сократить в 10 раз количество пунктов взятия проб воды, но задержка принятия решения о режиме регулирования приливно-отливного процесса остается. Эта задержка может быть сокращена до нескольких минут путем использования многофункциональной адаптивной информационно-моделирующей системы (МФАИМС) для гидрохимических исследований, которая после адаптации к объекту мониторинга позволяет измерять характеристики качества воды в режиме реального времени. В этом случае оператор ИМСЛНН имеет возможность принять решение в течение нескольких минут открыть или закрыть доступ морской воды в лагуну. Оптическая компонента МФАИМС может устанавливаться стационарно непосредственно в воду, что открывает возможность полной автоматизации процесса регулирования приливно-отливных процессов [12,15,16,19]. Функциональные возможности МФАИМС базируются на спектрофотометрическом измерении характеристик ослабления света водным раствором в диапазоне 380-800 нм на двух поляризациях и алгоритме распознавания спектральных образов водного раствора [19,21].

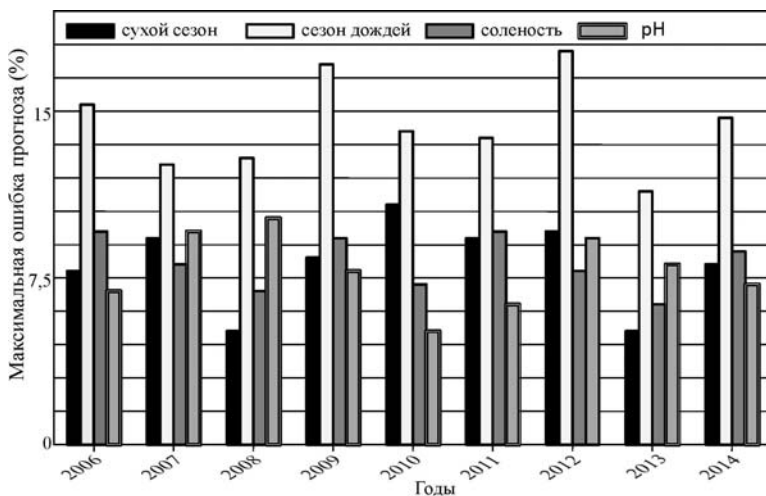


Рис. 5. Динамика максимальных ошибок прогноза физико-химических характеристик лагуны Ньюк Нгот, осуществленного ИМСЛНН по начальным данным на первое число каждого месяца, полученным на границе Г.

Выводы и заключение

Проведение измерений характеристик водного объекта требует больших экономических затрат. Поэтому задача оптимизации натуральных измерений является не только важной с научной точки зрения, но и с экономических позиций. Проведенные в данной работе расчеты по оценке предложенных алгоритмов и имитационной модели позволяют сделать вывод о том, что ИМСАНН с достаточной точностью обеспечивает восстановление пространственного распределения по акватории гидрофизического объекта его характеристик, основываясь на эпизодических измерениях *in-situ*.

Рассмотренная акватория лагуны Ньюк Нгот может служить типовым эталоном мезомасштабного гидрофизического объекта, связь которого с открытым морем обеспечивается через четко определенную границу. Как показали расчеты все гидрофизические и физико-химические характеристики лагуны однозначно зависят от процессов на этой границе и процессов на границе суша-лагуна. Последние включают речной и береговой стоки. Следовательно, если в базе данных и базе знаний ИМСАНН регулярно обновлять информацию об этих процессах, то проведение измерений на территории самой лагуны требуется проводить в режиме дискретного мониторинга только для оценки невязки между прогнозом и реальным состоянием экосистемы лагуны. Режим измерений и расположение мест взятия проб воды определяются в процессе проведения имитационных экспериментов согласно процедуре рис. 1.

Список литературы

1. Буй Куок Нгиа. Имитационная система для гидрофизического эксперимента в неоднородной среде. Диссертация кандидата физ.-мат. наук. 01.04.01. М. 2002. 151 с.
2. Буй Куок Нгиа, Амбросимов А.К. Модель антропогенного воздействия на экосистему лагун Вьетнама // Актуальные проблемы современной науки. 2001. № 3. С. 119-128.
3. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Академия. 2010. 304 с.
4. Гоголева А.Е. Совершенствование расчетного метода контроля выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух с открытых поверхностей испарения. Диссертация кандидата технических наук. 05.11.13. Омск. 2011. 124 с.
5. Каевцифер В.И., Солдатов В.Ю., Крапивин В.Ф., Потапов П.И. Экономически и функционально эффективная технология синтеза геоэкологических информационно-моделирующих систем (ГИМС-технология) // Экономика природопользования. 2013. №3. С. 130-147.
6. Крапивин В.Ф., Мкртчян Ф.А., Потапов П.И. Адаптивная система спектральной идентификации жидких растворов: технология // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2016. №6. С. 112-121.
7. Крапивин В.Ф., Потапов П.И., Солдатов В.Ю. Экономически эффективная технология диагностики систем окружающей среды // Экономика природопользования. 2016. №5. С. 77-103.
8. Крапивин В.Ф., Солдатов В.Ю., Потапов П.И. ГИМС-технология лесных экосистем, как инструмент исследования их роли в регулировании климата // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2012. №7. С. 26-51.

9. Семенов Е.В., Лулева М.В. О совместном эффекте прилива, стратификации и вертикального турбулентного перемешивания на формирование гидрофизических полей в Белом море // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1999. Т. 35. №3. С. 660-666.

10. Чубаренко Б.В., Чубаренко П.П. Моделирование поля течений в Куршском заливе при штормовых ветровых воздействиях // Метеорология и гидрология. 1995. №5. С. 83-89.

11. Bras R.L. Hydrology. Massachusetts: Addison-Wisley Publishing Company. 1990. 643 pp.

12. Cao Van Phuong, Панас А.П., Pham Minh Tien и др. Научно-техническое сотрудничество РАН и ВАНТ по развитию и применению технологий мониторинга водных объектов на территории Вьетнама // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2013. №6. С. 3-29.

13. Erikson E. Principles and applications of hydrochemistry. Amsterdam: Springer Netherlands. 1985. 187 pp.

14. Ha S.-R., Dung P.A., Lee B.-H. Impacts of agrochemical fertilizer on the aquatic environment of paddy fields in Vietnam // Water Sci. and Technology. 2001. V. 43. Nr. 5. P. 193-203.

15. Krapivin V.F., Mkrtychyan F.A. Multichannel Spectroellipsometric Technology for Aquatic Environment Diagnostic // Environment and Ecology Research. 2014. V.2. Nr. 2. P. 91-96.

16. Krapivin V.F., Mkrtychyan 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, Hokkaido, Japan. Mombetsu (Hokkaido, Japan): The Okhotsk Sea & Cold Ocean Research Association (OSCORA). 2016. P. 101-1104.

17. Krapivin V.F., Mkrtychyan F.A., Nazaryan N.A. Development of GIMS-technology for environmental monitoring of ocean ecosystems // Proceedings of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 21-24 February 2016, Mombetsu, Hokkaido, Japan. Mombetsu (Hokkaido, Japan): The Okhotsk Sea & Cold Ocean Research Association (OSCORA), 2016. P. 116-119.

18. Krapivin V.F., Varotsos C.A., Bui Quoc Nghia. A modeling system for monitoring water quality in lagoons. Water, Air & Soil Pollution, 2017. Vol. 228, No. 397, pp. 1-12,

19. Krapivin V.F., Varotsos C.A., Christodoulakis J. Mission to Mars: Adaptive identifier for the solution of inverse optical metrology tasks // An International Journal of Solar System Science: Earth, Moon, and Planets. 2016. V.4. P. 1-14.

20. Mai Trong Nhuan, Nguyen Thi Minh Ngoc, Nguyen Tai Tue et al. Characterization and mitigation of Vietnam coastal hazards for sustainable development // Annual Report of FY 2007. The Core University Program between Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) and Vietnamese Academy of Science and Technology (VAST). Osaka: Osaka University. 2008. P.139-150.

21. Nitu C., Krapivin V.F., Soldatov V.Yu. Information-modeling technology for environmental investigations. Bucharest: Matrix Rom, 2013. 621 pp.

22. Varotsos C.A. and Krapivin V.F. A new big data approach based on geoeological information-modeling system. Big Earth Data, 2017, 1: 1-2, 47-63.