

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЧНОЙ СИСТЕМЫ*

В. М. Белолипецкий, С. Н. Генова, К. Ю. Гуревич

Институт вычислительного моделирования СО РАН

Красноярск, Россия

e-mail: belolip@cc.krascience.rssi.ru

А. Г. Дегерменджи, Л. Г. Косолапова

Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

И. И. Дрюккер

Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

A structure of a computer system (CS) is described for the analysis of the state-of-the-environment information about water resources and carrying out the forecast calculations. CS consists of two blocks: database block and the block of calculation modules. Mathematical and numerical models are presented intended for studying hydrophysical and radioenvironmental processes and the examples of some calculations.

Введение

Развитие промышленности, сельского хозяйства, урбанизация привели к значительному загрязнению природных вод. Проблема сохранения качества воды приобрела глобальный характер. Загрязняющие вещества в водную среду попадают разными путями, их поступление в водоемы может происходить непрерывно (во времени) или в результате залпового сброса, в виде точечных или распределенных в пространстве источников. Для сохранения качества природных вод необходимо, кроме постоянного наблюдения за источниками загрязнения, проводить исследования по прогнозированию последствий сбросов загрязняющих веществ и разработку планов восстановительных мероприятий.

Актуальной проблемой является очистка р. Енисей от радиоактивного загрязнения в результате деятельности горно-химического комбината. После попадания радиоактивных веществ в воду происходит перераспределение радионуклидов по компонентам речной системы за счет разбавления их взвешенными в воде органическими и неорганическими

*Работа выполнена при поддержке Президиума СО РАН (интеграционные программы № 10–1999, № 75–2000), целевой программы СО РАН “ГИС-технологии и Интернет” и Министерства образования РФ и CRDF, грант № REC–002.

© В. М. Белолипецкий, С. Н. Генова, К. Ю. Гуревич, А. Г. Дегерменджи, Л. Г. Косолапова, В. В. Дрюккер, 2001.

частицами, седиментации и взмучивания, активного потребления их первичным звеном экосистемы и дальнейшей миграции по пищевым цепям. В настоящей работе описываются основные модели механизмов миграции радионуклидов в речной системе.

Экологическое состояние водных объектов зависит от разнообразных факторов и процессов: гидрофизических, гидробиологических, гидрохимических, метеорологических и антропогенных. Практический интерес представляет изучение механизмов переноса и превращения загрязняющих веществ и их влияние на самоочищение водоемов.

Для решения задач, связанных с анализом, использованием и накоплением большого количества информации об экологическом состоянии водных объектов, требуется создание специального инструмента — информационно-прогностической компьютерной системы.

1. Структура информационно-прогностической компьютерной системы

Информационно-прогностическая компьютерная система (ИПКС) состоит из двух блоков, каждый из которых выполняет определенный набор задач (рис. 1) [1].

Первый блок представляет собой систему управления базами данных (СУБД) и состоит из базы данных (БД) и средств, необходимых для просмотра и визуализации хранящихся в ней данных. Этот блок также устанавливает двухстороннюю связь (импорт и экспорт) между ИПКС и другими источниками данных.

Второй блок ИПКС, основанный на комплексе математических и численных моделей, отвечает за проведение прогнозных расчетов. Он обеспечивает формирование начальных данных, проведение расчетов по численным моделям и передачу полученных результатов в базу данных для их дальнейшей обработки.

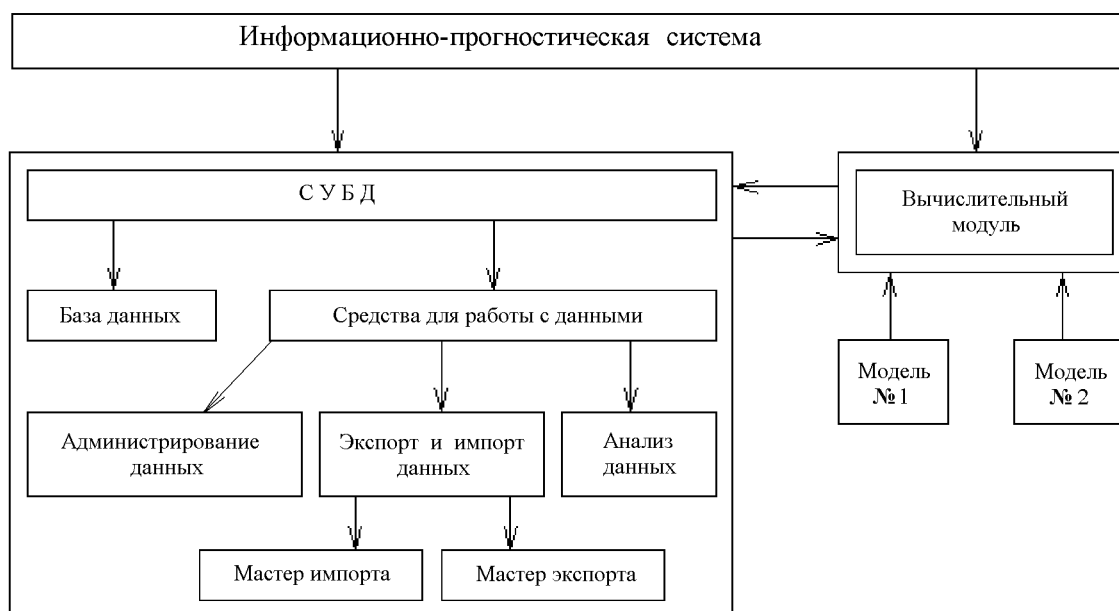


Рис. 1. Структура информационно-прогностической компьютерной системы.

2. Система управления базами данных

СУБД состоит из базы данных, предназначенной для накопления и хранения всей необходимой информации об экологическом состоянии водных объектов, средств обработки данных и обмена информацией (рис. 1). Все данные, хранящиеся в БД, подразделяются на четыре группы: морфометрические, метеорологические, данные об экологическом состоянии водных объектов и данные, содержащие информацию дополнительного характера.

Морфометрические данные. Чтобы иметь подробное представление о структуре русла реки, на всем ее протяжении выбираются поперечные сечения русла (створы). Для каждого створа в базе данных хранится характеризующая его информация: глубина, ширина, уклон дна, шероховатость. Поскольку вычисления могут проводиться как по одномерным, так и по двумерным математическим моделям, данные хранятся в виде, пригодном для использования одно- и двумерными моделями.

Метеорологические данные приводятся для конкретных метеостанций и включают следующие параметры: дату, географические координаты станции, температуру воздуха, облачность, атмосферное давление, влажность воздуха, направление и скорость ветра.

Данные об экологическом состоянии водных объектов. Для каждого створа хранится информация о содержании загрязняющих веществ в воде, иле и рыбе, концентрациях фито- и зоопланктона, содержании загрязняющих веществ в выпусках промышленных вод с предприятий.

Данные, содержащие информацию дополнительного характера, — сведения о предприятиях и их выпусках (расход воды, характеристики рабочей части водовыпуска), список загрязняющих веществ с информацией о них (предельно допустимые концентрации, химическая формула и т. д.).

В настоящее время в БД внесены данные о содержании радионуклидов в воде, донных отложениях и рыбе на участке р. Енисей от Красноярска до поселка Бор из работы [2]. В ней имеется также информация Лимнологического института СО РАН о содержании планктонных и бентоносных организмов в створах р. Енисей на участке от Дивногорска до поселка Прибрежное (88 км ниже устья Ангары) за период 1972–1977 гг. Например, на рис. 2 приводятся данные для створа “Базаиха”.

Средства обработки данных. БД имеет в своем составе два инструмента для работы с хранящимися в ней данными. Первый из них представляет собой набор форм для отображения данных в виде таблиц, которые в основном предназначены для редактирования и ввода информации. Через них осуществляется установка связи с другими источниками данных. Второй инструмент предназначен для визуального отображения данных в виде графиков (рис. 3).

Описанные выше инструменты применяются для обработки как натуральных данных, так и результатов прогнозных расчетов.

Средства обмена информацией. За установку связи с внешними источниками данных отвечает специальный инструментарий — “Мастер импорта” и “Мастер экспорта”, работа которых принципиально друг от друга не отличается, однако один предназначен для установления потока данных из внешнего источника в БД, а другой — из базы во внешний источник.

Принцип работы “мастера” основан на последовательных действиях, устанавливающих связь между полями таблицы источника (столбцами или строками текстового файла) и полями таблицы приемника.

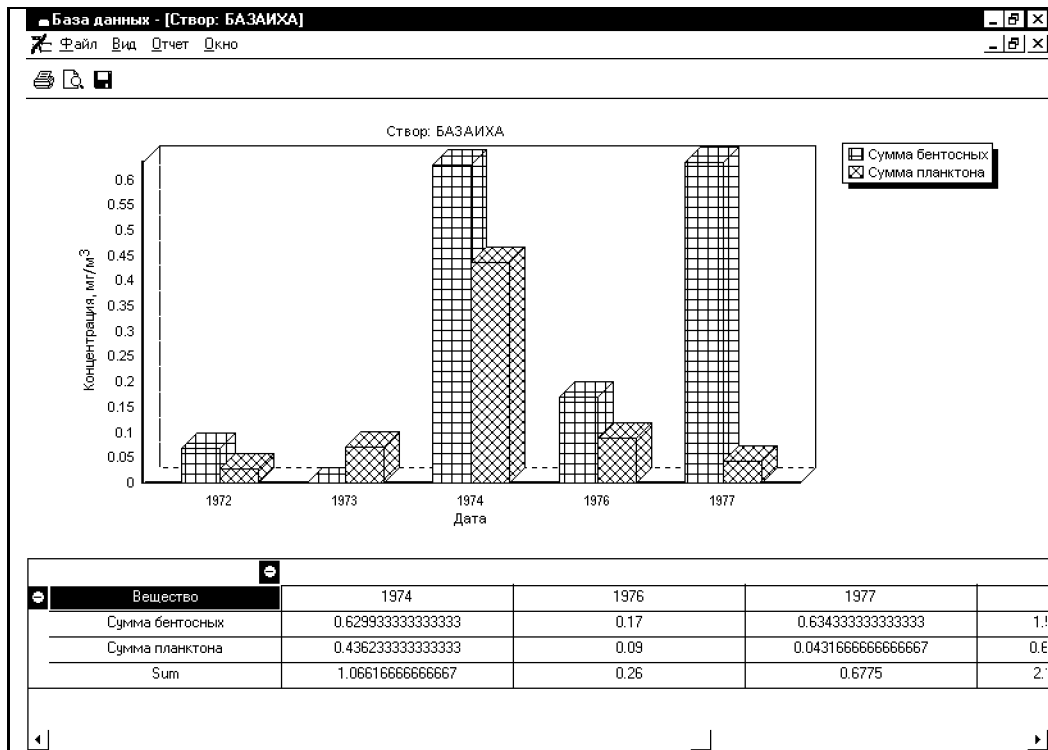


Рис. 2. Натурные данные по створу “Базаиха”.

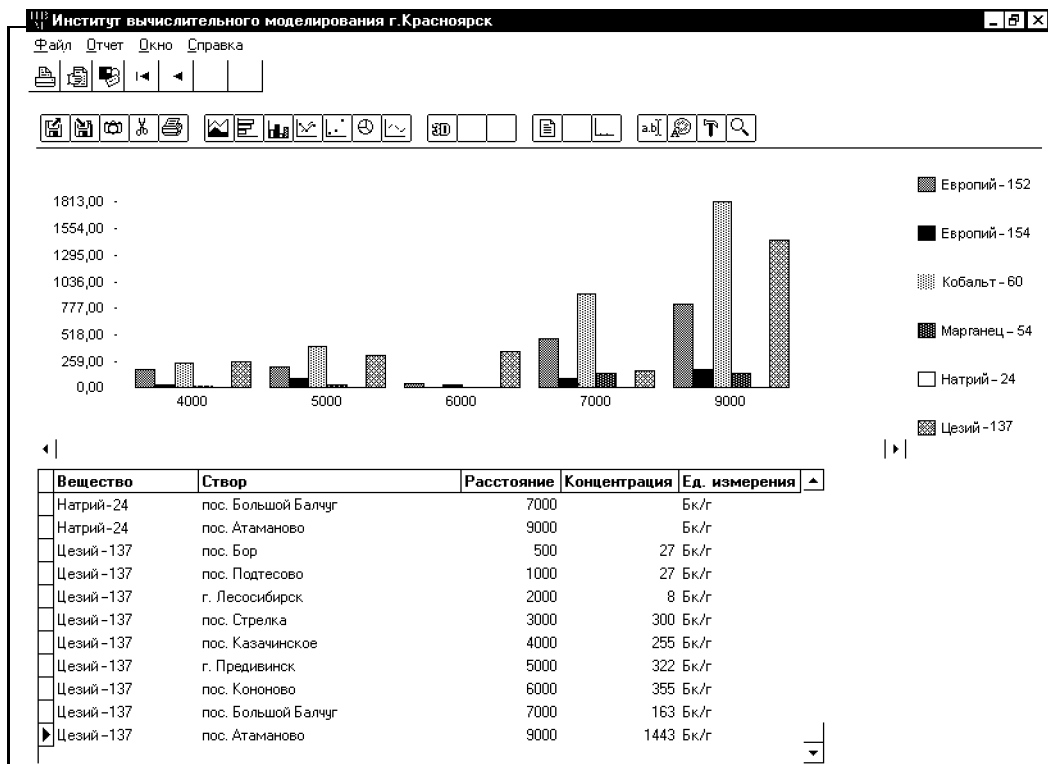


Рис. 3. Пример формы для построения графиков.

3. Вычислительный модуль

Второй блок информационно-прогностической системы предназначен для проведения расчетов по математическим моделям. В этом блоке формируются начальные данные, проводятся расчеты, затем полученные результаты передаются в БД.

Для проведения вычислений по математическим моделям необходимо выполнить ряд последовательных шагов. Вначале определяют модель, по которой будет проводиться расчет, затем для каждой модели устанавливают формат начальных данных. Описание форматов содержится в отдельных файлах. Для каждой математической модели существуют файлы с их описанием, содержащие имена файлов с необходимыми форматами, поэтому подключение формата происходит автоматически. На следующем шаге определяются начальные данные, затем — полные имена файлов, в которых будут сохранены результаты. После этого происходит запуск модели.

Математическая модель для определения гидротермического режима реки. На первом этапе для исследования неустановившихся течений в открытых руслах ограничимся одномерной постановкой. Математическая модель основана на использовании классических уравнений Сен-Венана [3, 4].

Для расчета температуры воды применяется упрощенное уравнение переноса

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{q(T_q - T)}{\omega} + F.$$

Здесь T — температура воды; u — продольная скорость течения воды; q — распределенный приток воды; T_q — температура воды, поступающей с притоком; $F = (F_n B) / c \rho \omega$, B — ширина свободной поверхности потока, ω — площадь поперечного сечения русла, F_n — полный поток тепла через свободную поверхность, c — удельная теплоемкость воды, ρ — плотность воды; K_y — коэффициент диффузии в поперечном направлении. B, u, ω определяются из решения задачи для уравнений Сен-Венана.

Уравнение для температуры без учета диффузии решается при помощи схемы бегущего счета первого порядка.

В стационарном случае построено аналитическое решение на расчетном участке $x_j \leq x \leq x_{j+1}$ для $K_y = \text{const}$:

$$T = T_1(x) + T_2(x, y),$$

$$T_1(x) = T_{10} + \frac{F}{u'_j} \ln \left[1 + \frac{u'_j}{u_j} (x - x_j) \right],$$

$$T_2(x, y) = \sum b_n \left[1 + \frac{u'_j}{u_j} (x - x_j) \right]^{-\mu_n / u'_j} \cos \frac{n\pi y}{B_j},$$

где $u = u_j + u'_j(x - x_j)$, $\mu_n = K_y [(n\pi) / B_j]^2$; T_{10} — температура воды в створе $x = x_j$. Коэффициенты b_n определяются из граничного условия при $x = x_j$. Коэффициент поперечной диффузии K_y находится по эмпирической формуле $K_y = 0.23 h u_*$ ($u_* = u \sqrt{g} / C$ — динамическая скорость, g — ускорение свободного падения, C — коэффициент Шези).

Построенное решение позволяет определить зону влияния “теплового” сброса. На рис. 4 показан расчет тепловой струи в окрестности места выброса.

Одномерное приближение в задаче транспорта наносов и примесей в реках. Для описания переноса и превращения примесей в турбулентном потоке несжимаемой жид-

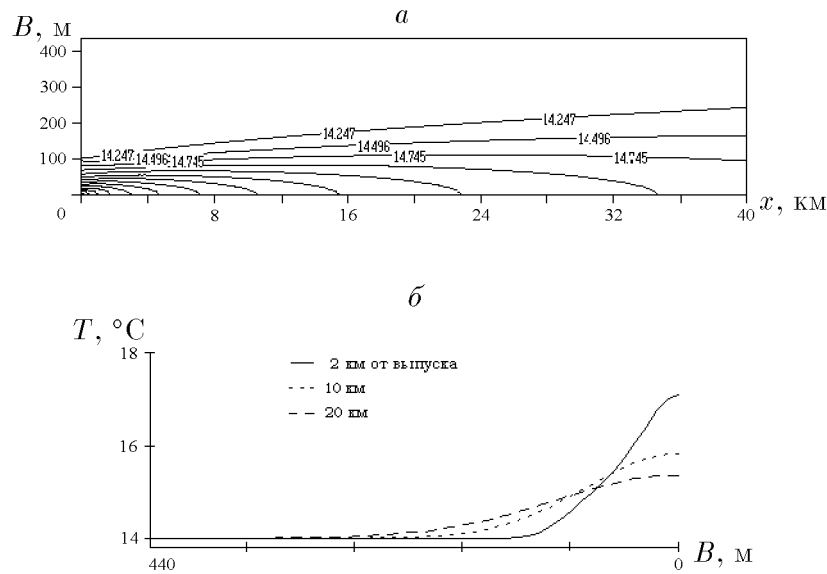


Рис. 4. Распространение тепловой струи в окрестности теплового сброса: *a* — картина изотерм в горизонтальной плоскости; *б* — распределение температуры воды в фиксированных сечениях.

кости применим упрощенное уравнение [6]:

$$\frac{\partial \omega S_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Q S_i) = B q_{S_i} - \sigma \omega S_i + q S_{iq}.$$

Здесь S_i , S_{iq} — концентрации i -й фракции и ее примеси, поступающей с путевым притоком q ; σ_i — коэффициент неконсервативности i -й фракции; q_{S_i} — расход взмыва-осаждения примеси i -й фракции.

Расход взмыва-осаждения для i -й фракции примеси определяется по формулам [5, 6]:

$$S_{i \text{ tr}} = \begin{cases} \frac{0.2u^3}{qh w_{S_i}}, & w_{S_i} < w_*, \\ 0, & w_{S_i} \geq w_*, \end{cases}$$

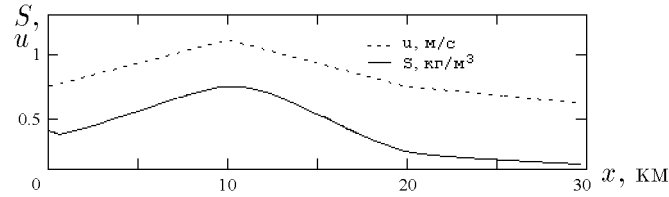
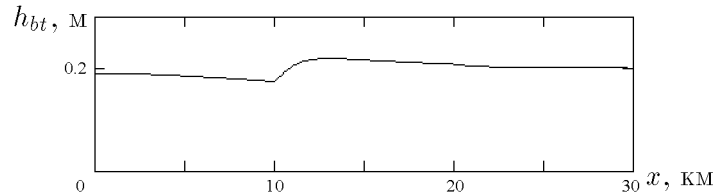
$$q_{S_i} = (S_{i \text{ tr}} - S_i) w_{S_i}, \quad w_* \approx 0.3u_* - 0.5u_*,$$

$$w_{S_i} = \begin{cases} \frac{\rho_{S_i} - \rho}{\rho} \frac{g}{18\nu} d_i^2, & d_i \leq 0.034, \\ 33.1 \sqrt{\frac{\rho_{S_i} - \rho}{\rho} d_i}, & d_i > 0.034, \end{cases}$$

где $S_{i \text{ tr}}$ — транспортирующая способность потока; w_{S_i} , ρ_{S_i} , d_i — гидравлическая крупность, плотность, характерный размер i -й фракции соответственно; ν — коэффициент кинематической вязкости.

При $S_{i \text{ tr}} > S_i$ происходит поступление наносов в поток (размыв), а при $S_{i \text{ tr}} < S_i$ — заиление русла.

Изменение концентраций примесей вдоль потока обусловлено как изменением глубины и средней скорости течения, так и взаимодействием водного потока с донными отложениями. Предполагаем, что состав донных наносов изменяется в основном за счет взмучивания

Рис. 5. Рассчитанное распределение концентрации примеси в воде ($d = 0.1$ мм).Рис. 6. Рассчитанная толщина донных отложений ($d = 0.1$ мм).

и седиментации. В этом случае деформация русла описывается уравнением

$$\frac{\partial h_{bt}}{\partial t} = \frac{\sum_i q_{s_i}}{\rho_{otl}},$$

где h_{bt} , ρ_{otl} — толщина активного слоя и плотность донных отложений. Численный алгоритм решения уравнения для концентрации примеси в воде основан на схеме бегущего счета, а уравнение относительно h_{bt} решается по явной схеме.

Рассмотренная одномерная модель позволяет исследовать динамику примесей в речной системе с учетом морфометрических и гидравлических характеристик потока, седиментации и взмучивания. На рис. 5 приведен пример модельного расчета распределения примеси по длине русла реки, на рис. 6 — пример изменения толщины донных отложений. Аналогично, как и для температуры, построено аналитическое решение стационарного уравнения переноса и диффузии примесей, позволяющее оценить изменение концентрации примесей по длине реки с учетом поперечной диффузии в окрестностях источников загрязнений.

Плановые модели течений и переноса примесей. При изучении гидротермических процессов в реках, более сложных по сравнению с одномерными, применяется плановая (двумерная в горизонтальной плоскости) модель гидродинамики и теплопереноса, т. е. рассматриваются характеристики, осредненные по глубине водоема.

Конвективно-диффузионный перенос и превращения примесей в турбулентном потоке несжимаемой жидкости описываются уравнением

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{q_S}{h}.$$

Уравнение переноса примесей, удовлетворяющее соответствующим начальным и граничным условиям, решается с использованием метода расщепления по физическим процессам и неявных разностных схем.

Математическая модель речной экосистемы. Для исследования проблемы миграции и распределения радионуклидов, тяжелых металлов, органических токсикантов

в компонентах природных экосистем методом математического моделирования требуется достаточно адекватная модель экосистемы. Водные организмы, потребляя различного рода органические и неорганические соединения, с одной стороны, способствуют самоочищению речной воды, с другой, накопление какого-либо токсиканта в одном из звеньев пищевой цепи может представлять опасность для консумента высшего порядка — человека. В рассматриваемой нами модели речной экосистемы представлены все основные группы гидробионтов, обитающих в воде (бактерио-, фито-, зоопланктон) и на дне (фитобентос и зообентос).

Основой для моделирования экологических систем служат уравнения роста, а ключевым понятием в этих уравнениях является удельная скорость роста. Удельная скорость роста популяции U описывается функцией Моно

$$U = M \frac{S}{K + S},$$

где M — максимальная скорость роста; K — константа полунасыщения; S — субстрат. Влияние температуры на скорость роста популяции описывается формулой

$$TK = \exp \left[\left(\frac{T - T_{\text{opt}}}{TD} \right)^2 \right],$$

где TK — температурная поправка для скорости роста соответствующей группы организмов; T_{opt} — температурный оптимум группы организмов; TD — температурная дисперсия для данной группы видов; T — текущая температура. Влияние температуры на смертность описывается аналогичной формулой. Влияние освещенности, которая зависит от глубины реки, концентрации взвешенного вещества и биомассы планктона, на скорость роста фитопланктона и фитобентоса пока не учитывается, так как на рассматриваемом участке реки этот фактор не является существенным. Общая система уравнений экосистемы реки выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial POB}{\partial t} + v \frac{\partial POB}{\partial x} = -RBPOB \cdot B + k1 \cdot Sv \cdot D,$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = (UP \cdot TP - EP \cdot ETP) \cdot P - RZP \cdot Z,$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + v \frac{\partial Z}{\partial x} = (UZ \cdot TZ - EZ \cdot ETZ) \cdot Z,$$

$$\frac{\partial PB}{\partial t} + kv \frac{\partial PB}{\partial x} = (UPB \cdot TPB - EPB \cdot ETPB) \cdot PB - RZBPB \cdot ZB,$$

$$\frac{\partial ZB}{\partial t} + kv \frac{\partial ZB}{\partial x} = (UZB \cdot TZB - EZB \cdot ETZB) \cdot ZB,$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} + kv \frac{\partial D}{\partial x} = vs(EP \cdot ETP \cdot P + EB \cdot ETB \cdot B + EZ \cdot ETZ \cdot Z +$$

$$+ EPB \cdot ETPB \cdot PB + EZB \cdot ETZB \cdot ZB + DB + DZ + DZB) - RZBD \cdot ZB - KZ \cdot D,$$

где t — время, x — расстояние вдоль реки, v — скорость течения реки, kv — придонная скорость течения; POB — растворенное органическое вещество, P — фитопланктон, B — бактериопланктон, Z — зоопланктон, PB — фитобентос, ZB — зообентос, D —

детрит (мертвое органическое вещество); UP, UB, UZ, UPB, UZB — скорости роста водных групп организмов — фито-, бактерио-, зоопланктона и донных групп организмов (фитобентоса, зообентоса); EP, EB, EZ, EPB, EZB — коэффициенты естественной смертности фито-, бактерио-, зоопланктона, фитобентоса, зообентоса соответственно; TP, TB, TZ, TPB, TZB и $ETP, ETB, ETZ, ETPB, ETZB$ — температурные поправки для скоростей роста и смертности фито-, бактерио-, зоопланктона, фитобентоса, зообентоса соответственно; $RBPOB$ — рацион питания бактерий на POB , RZP — рацион питания зоопланктона на фитопланктоне, RZB — рацион питания зоопланктона на бактериях, $RZBPB$ — рацион питания зообентоса на фитобентосе, $RZBD$ — рацион питания зообентоса на детрите; DB, DZ, DZB — доля неусвоенного рациона бактерий, зоопланктона и зообентоса; sv, vs — коэффициенты перехода от поверхностной концентрации к объемной и наоборот, $k1$ — скорость выхода POB из детрита, KZ — коэффициент замыкания экосистемы.

Система уравнений решалась при помощи схемы бегущего счета первого порядка, которая является монотонной и консервативной. Начальное распределение всех компонент системы считалось равномерным. Расчет производился для участка р. Енисей Красноярская ГЭС — р. Ангара. Для верификации модели выбран август 1984 г. Вводились среднемесячные внешние параметры: расход воды в створе Красноярской ГЭС, расход основных притоков, поступление растворенного органического вещества, температура воды. Начальные значения компонент взяты из базы данных Лимнологического института СО РАН, который на протяжении ряда лет проводил продукционно-биологические исследования на Енисее. Расчетные кривые сравнивались с натурными данными Лимнологического института. К сожалению, данных по пространственному распределению бентосных форм не имеется, есть только отрывочные сведения, по которым можно судить о порядке этих величин.

Как видно из рис. 7, для бактерий совпадение расчетной кривой и натуральных данных удовлетворительное. Параметры скорости роста бактерий рассчитывались по данным Дрюккера [7]. Для микрозоопланктона совпадение очень хорошее. Параметры роста микрозоопланктона определялись в лабораторных экспериментах на енисейских видах [8]. Экосистема р. Енисей на данном участке сильно обеднена из-за разрушающего действия турбин Красноярской ГЭС и низкой температуры воды. Процесс самоочищения воды на этом наиболее загрязненном участке реки ослаблен. Зоопланктон в процессе деструкции вещества играет ничтожную роль. Бактериальная масса, которая здесь накапливается, подвергается интенсивной деструкции только ниже впадения Ангары.

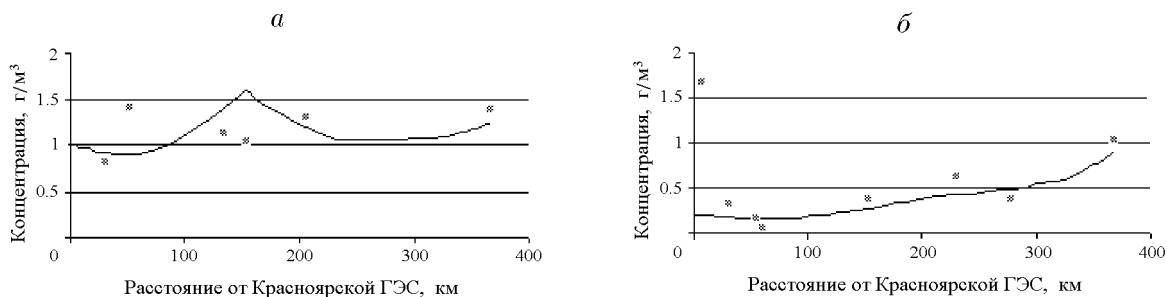


Рис. 7. Результаты расчетов по одномерной модели речной экосистемы Института биофизики СО РАН (кривые) и натурные данные Лимнологического института СО РАН (точки): *а* — бактерии, *б* — микрозоопланктон.

Математическая модель миграции радионуклидов в речной экосистеме. На первом этапе математического моделирования миграции радионуклидов ограничиваемся цепочкой вода — фитопланктон — зоопланктон — донные отложения. В воде необходимо рассчитывать концентрацию элемента, лимитирующего рост фитопланктона (чаще всего таковым является фосфор), концентрацию радионуклида, который активно потребляется фитопланктоном (например, цезия) и концентрацию стабильного аналога (калия). Эти элементы потребляются фитопланктоном, в результате чего растет его биомасса. Часть фитопланктона потребляется зоопланктоном, а часть отмирает и поступает в донные отложения. Радионуклиды поступают на дно вместе с отмершей биомассой фитозоопланктона. Часть осевших на дно радионуклидов и биогенных элементов, подвергшихся биохимическим превращениям, снова поступает в воду, т. е. включается в круговорот. Система уравнений, реализующая эту схему, и результаты модельных расчетов подробно описываются в работе [4], где, в частности, отмечается, что распределение компонентов экосистемы по длине реки существенно зависит от того, лимитирована система биогенными элементами или нет. При лимитировании биогенным элементом все компоненты системы в стационарном состоянии выходят на некоторый постоянный уровень; в отсутствие лимита кривые пространственного распределения компонентов экосистемы носят волновой характер.

Заключение

Разработан первый уровень информационно-прогностической компьютерной системы, предназначенной для исследования механизмов миграции радионуклидов в речной экосистеме. Реализованный вариант ИПКС позволяет накапливать разнообразную информацию о водной системе, выполнять численные эксперименты по исследованию гидрофизических и гидробиологических процессов.

Список литературы

- [1] Белолипецкий В. М., Генова С. Н., Гуревич К. Ю. и др. Наблюдения за экологическим состоянием бассейна р. Енисей при помощи новых информационных технологий // ГИС для оптимизации природопользования в целях устойчивого развития территорий: Мат. Междунар. конф. Барнаул: Изд-во Алтайского госуниверситета, 1998. С. 490–498.
- [2] Носов А. В., Ашанин М. В., Иванов А. Б., Мартынова А. М. Радиоактивное загрязнение р. Енисей, обусловленное сбросами Красноярского горно-химического комбината // Атомная энергия. 1993. Т. 74, вып. 2. С. 144–150.
- [3] Численное моделирование задач гидроледотермики водотоков / В. М. Белолипецкий, С. Н. Генова, В. Б. Туговиков, Ю. И. Шокин. Новосибирск: ИВТ, ВЦ, 1994.
- [4] Дегерменджи А. Г., Косолапова Л. Г., Белолипецкий В. М. Математическое моделирование динамики радиоэкологических и гидрофизических характеристик речных систем (р. Енисей) // Сиб. эколог. журн. 1996. № 5. С. 473–483.

- [5] Абальянц С. Х. Устойчивые и переходные режимы в искусственных руслах. Л.: Гидрометеоздат, 1978.
- [6] Адесман А. В. Основные уравнения диффузионной модели общих русловых деформаций // Динамика и термика рек, водохранилищ, внутренних и окраинных морей: Тез. докл. четвертой конф. М., 1994. С. 171–173.
- [7] Дрюккер В. В., Петрова В. И. Бактериопланктон реки Енисей. Новосибирск: Наука, 1988. 96 с.
- [8] Спицкая Н. И., Темерова Т. А. и др. Исследования роста культуры простейших *Strombidium viride* при разных пищевых условиях // Экология морских и пресноводных простейших: Тез. докл. конф. Борок, 12–15 сент., 1989. С. 66.

*Поступила в редакцию 25 февраля 1999 г.
в переработанном виде — 10 августа 2000 г.*