

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ВОДОТОКОВ В РАЙОНАХ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Д. Н. Вахов, Е. В. Власов

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия

Рассмотрена задача контроля загрязненности территорий вследствие прямых и косвенных сбросов в водотоки и на рельеф. Предложенная математическая модель учитывает влияние объема разливов, структуры рельефа, расстояния от места аварии до водного объекта, особенности массообмена загрязнителя в средах „берег—водоток—дно“. Проанализированы вопросы теории конструирования модели миграции загрязнителей.

Водосбор, массообмен, миграция загрязнителя, поверхностный сток

MATHEMATICAL MODELS AND SUPERVISION SYSTEMS FOR MONITORING WATER STREAM POLLUTION LEVEL IN AREAS OF PETROLEUM DEPOSITS

D. N. Vakhov, E. V. Vlasov

Earth Cryosphere Institute SB RAS, 625000, Tyumen, 1230, Russia

The problem of territories pollution owing to direct and indirect dumps in water course and on a relief is considered. The offered mathematical model takes into account of the influence of flood volume, structure of a relief, distance from a place of failure to water object, features of mass pollutant exchange within the environments „coast—water stream—bed“. The problems of the theory of designing pollutant migration model are analyzed.

Columbine, exchange of mass, migration of dirty, superficial drain

ВВЕДЕНИЕ

Практика слежения за состоянием загрязненности нефтяных месторождений осложнена рядом обстоятельств и в том числе:

- интенсивной техногенной нагруженностью производственных площадей;
- значительными размерами и сильной рассредоточенностью нефтяных объектов;
- техногенные объекты, как правило, располагаются в труднодоступных для наблюдения и обслуживания местах.

Ко всему следует добавить, что [Долингер, 1997]:

— в силу старения оборудования на промыслах Среднего Приобья высокий уровень аварийности;

— порывы носят скрытый характер и их трудно обнаружить даже визуально при облете территории;

— реально работающая сеть нефтепромысловых коллекторов и водоводов в силу многочисленных ремонтов не соответствует проектам обустройства, а потому быстрое обнаружение, а то и реакция на аварийное событие не всегда достигается;

— число подконтрольных линейных объектов велико и постоянно увеличивается, в то время как количество инспекторов Госназдора и мощности служб экологического контроля почти не возрастают.

В силу названных обстоятельств задача контроля, предупреждения и ликвидации последствий аварий на нефтепромыслах носит проблемный характер. Решение поставленной задачи следует искать на основе перехода к новым высокоинформативным автоматизированным технологиям слежения за состоянием загрязненности территорий месторождений с использованием современных средств компьютерной картографии [Давыдчук и др., 1988; Трофимов, Панасюк, 1984].

Настоящая работа посвящена теоретическим вопросам построения наблюдателей состояния качества воды в реках, приуроченных к территориям нефтяных месторождений.

ЗАДАЧИ АНАЛИЗА

Водотоки, как аккумуляторы поверхностной влаги, реализуют функцию очищения прилегающих поверхностей от загрязнений, с последу-

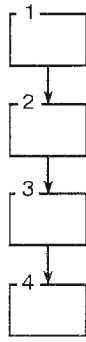


Рис. 1. Этапы создания геоинформационных инструментальных средств.

ющим выносом части загрязняющих веществ за пределы рассматриваемой территории. Отсюда по концентрации примесей в воде можно судить об уровне загрязнения территорий. Причем под контроль попадают как объявленные, так и априорно необнаруженные аварии.

Суть нижеизложенного связана с обоснованием метода построения математической модели миграции загрязнителей в водотоках [Артюшок и др., 1993]. Структура уравнений изучаемых процессов и принятые допущения предопределяют точность анализа. Попытка построения высокоточных моделей преследует чаще научные цели. На практике имеющаяся в контрольных органах информация и регламент обследований не позволяют строить такие модели. Кроме того, численные схемы расчетов по точным моделям и сценарии анализа столь сложны, что системы подобного типа могут эффективно функционировать лишь в среде специалистов-изобретателей данных технологий. Эксплуатационно-пригодные модели опираются главным образом на доступную по регламенту информацию и поддерживают сложившуюся методику обследований.

Всякая модель сложного природного образования — есть частный „срез“ реальной действительности в интересующих нас аспектах. Карта или карта-схема, как способ описания территории также является визуальной моделью окружающей среды. Карты удобно использовать для анализа качественных квазистатических ситуаций. Однако реальный регламент платного природопользования предъявляет жесткие требования к количественным оценкам состояния окружающей среды, которые постоянно изменяются. Современные геоинформационные системы позволяют воспроизводить динамически меняющиеся образы карт-схем с привязанной к изображаемым объектам строго определенной числовой информации. Технология создания подобного типа инструментальных средств иллюстрируется на рис. 1.

Первый этап — создание картографической модели территории с типовым районированием и типовыми образами эколого-географических объектов.

Второй этап — вторичное районирование, адаптированное под схемы численного динамического анализа.

Суть построения: в переходе от пространственно распределенных образов к схеме конечных элементов, характеризующих осредненные свойства объектов анализа; в разгрузке (освобождении) исходной картографической информации от объектов, не участвующих в схеме численного моделирования.

Третий этап — математическое описание анализируемых динамических процессов, разработка численной схемы анализа и собственно реализация численного счета.

Четвертый этап — картографическая визуализация результатов численного счета.

ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ

Задача территориального районирования заключается в назначении названных участков и выделении прилегающих к нему площадей в пределах зон эффективного водосбора (рис. 2). Именно на данной стадии закладываются показатели потенциально достижимой точности анализа. Так, если участков много и размеры их велики, то модель воспроизводит более точную картину текущего состояния загрязненности во-

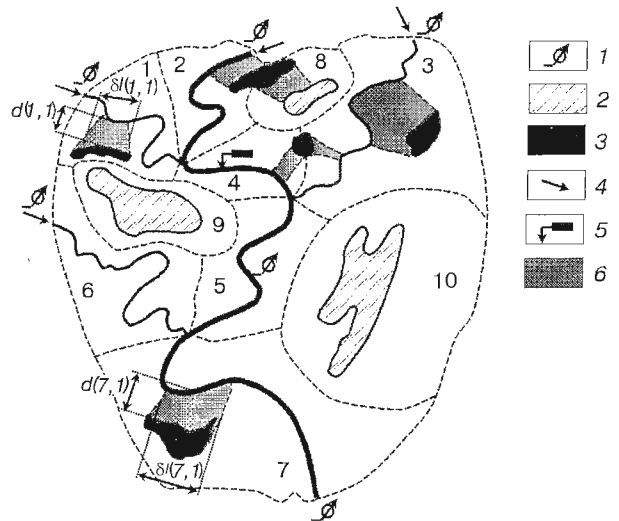


Рис. 2. Вариант районирования территории месторождения, приуроченный к системе водных объектов.

1 — позиции контрольных створов, 2 — озерно-болотные комплексы, 3 — участки аварийных разливов загрязнителей, 4 — направления водных потоков, 5 — источники сбросов в водотоки, 6 — зоны вторичных загрязнений вследствие поверхности стока.

дотока. Укрупнение камер порождает более „сглаженную динамику“ осредненных состояний.

В дальнейшем мы будем придерживаться схематизации водотока вдоль русла с последующей дискретизацией пространственной переменной на участки-камеры [Гурман, 1982]. Попытка повысить точность анализа за счет сокращения длин камер несостоятельна по двум причинам. Первая — если длина участка оказывается соизмерима с шириной, то нарушается исходная концепция одномерности анализа. В таких условиях необходимо переходить к пространственным трехмерным схемам анализа. Второе — увеличение количества участков, в равной степени как и переход к пространственным моделям, существенно увеличивает потребный объем исходных данных, что на практике не может быть обеспечено [Ворович, 1981].

При районировании следует учитывать реальную топологию водотока, притоков и других водных объектов, расположенных в пределах зон эффективного водосбора; позиции реальных и потенциальных аварийных участков, а также источников сбросов, входящих в зону водосбора анализируемого объекта; позиции постов и контрольных створов на водотоке; потребную точность анализа (с учетом ранее оговоренных ограничений).

На рис. 2 изображен вариант районирования территории месторождения, приуроченный к системе водных объектов. Основной водоток имеет три притока. В зоне водосбора расположены три склоновых озеро-болотных комплекса. На схеме изображены пять загрязненных участков, выделены пути поверхностной миграции грязи, указаны шесть контрольных постов — четыре входных, один на выходе (главный индикатор) и один на территории месторождения. В соответствии с естественной топологией водных объектов территория месторождения разделена на десять участков, три из которых замыкают озера (8, 9, 10), другие три (1, 3, 6) приурочены к притокам. На основном водотоке выделены четыре камеры (2, 4, 5, 7). Картографическая информация многократно используется для параметрической настройки искомой модели.

МОДЕЛЬ МИГРАЦИИ ЗАГРЯЗНИТЕЛЯ

Результаты решения задачи территориального районирования удобно оформлять в виде структурно-топологической схемы синтезируемой модели (рис. 3). Названная схема несет информацию о количестве осредненных объектов наблюдений, связях между собой, внешних воздействиях и контролируемых состояниях системы.

Структурно-топологическая модель удобна при обосновании программ обследований, при решении обратных задач динамики, когда по

состоянию выхода мы пытаемся оценить уровни входных воздействий. Топология однозначно устанавливает причинно-следственные связи наблюдаемых явлений, исключая несостоятельный вывод при поиске и обосновании новых, ранее необнаруженных аварий.

Современная методика контроля уровня замасленности пойменных участков водотоков связана с оценками объемов размещаемых нефтепродуктов в трех зонах: $M_1(i, t)$ — масса нефтепродуктов в водной среде i -й камеры, $MB(i, t)$ — масса нефтей, сорбируемых береговой полосой вдоль i -й камеры, $MD(i, t)$ — масса нефтей в донных отложениях.

Причем, массы сорбируемых (осевших) нефтей делятся на две части: $MB(i, t) = MB_1(i, t) + MB_2(i, t)$, $MD(i, t) = MD_1(i, t) + MD_2(i, t)$, где $MB_1(i, t)$, $MD_1(i, t)$ — массы „подвижных нефтей“, способных мигрировать и участвовать в процессах вторичного загрязнения (когда донные и береговые отложения загрязняют чистую проточную воду), $MB_2(i, t)$, $MD_2(i, t)$ — масса загрязнителя жестко связанного со скелетом почвогрунтов и не участвующая во вторичных загрязнениях.

Специфика задачи контроля загрязненности территории вследствие прямых и косвенных сбросов в водотоки — в случайном и импульсном характере действия аварийных событий. В зависимости от объемов разливов структуры рельефа, расстояния от места аварии до водного объекта, динамика стока может иметь как затяжные, так и импульсные проявления. Корректное

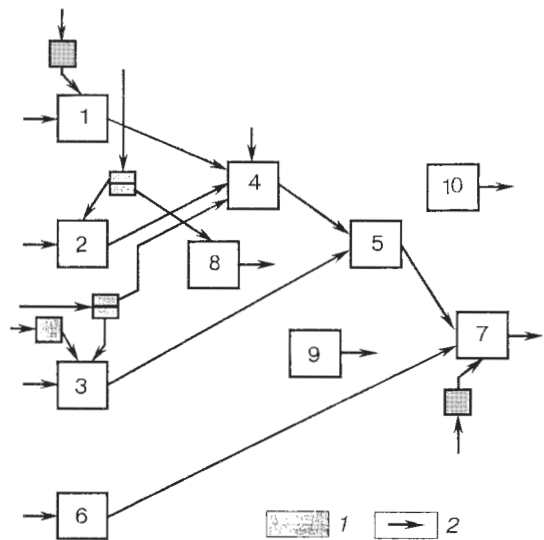


Рис. 3. Структурно-топологическая схема синтезируемой модели.

1 — площадные источники загрязнений, 2 — направление связи между выделенными участками водных объектов.

моделирование данных явлений требует введения в общую схему анализа переменной, характеризующей остаточное содержание загрязнителя в местах аварий: $MЗ(i, j, t)$, где j — номер загрязненного участка, приходящегося на i -ю территорию. Искомая система уравнений динамики массообмена в выделенных средах i -го сегмента имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dM_1(i,t)}{dt} = -\alpha_1(\Theta, M_1(i,t)) + m(i, t - \tau(i)) + \dots \\ \dots + m(i_n, t - \tau(i)) - m(i, t) - mБ(i, t) - \\ - mД(i, t) + mp_1(i, t) + mu_1(i, t), \\ \frac{dMB_1(i,t)}{dt} = -\alpha_{B_1}(\Theta, MB_1(i,t)) + mБ(i, t) - \\ - mp_1(i, t) + mp_2(o, 1, t) + \dots \\ \dots + mp_2(i, k(i), t) - mБ_2(i, t) + mu_2(i, t), \\ \frac{dMB_2(i,t)}{dt} = -\alpha_{B_2}(\Theta, MB_2(i,t)) + mБ_2(i, t) - mp_3(i, t), \\ \frac{dMD_1(i,t)}{dt} = -\alpha_{D_1}(\Theta, MD_1(i,t)) + mД(i, t) - mД_2(i, t), \\ \frac{dMD_2(i,t)}{dt} = -\alpha_{D_2}(\Theta, MD_2(i,t)) + mД_2(i, t) + mp_3(i, t), \\ \frac{dMЗ(i, 1, t)}{dt} = -\alpha_3(\Theta, MЗ(i, 1, t)) - \\ - mp_2(i, 1, t) + UЗ(i, 1, t), \\ \dots \\ \frac{dMЗ(i, k(i), t)}{dt} = -\alpha_3(\Theta, MЗ(i, k(i), t)) - \\ - mp_2(i, k(i), t) + UЗ(i, k(i), t). \end{cases} \quad (1)$$

Схема массообменных процессов показана на рис. 4.

Перейдем к описанию слагаемых правой части системы. Здесь t — параметр времени (единственная независимая переменная), Θ — значение температуры среды.

Внешние воздействия (входы) i -го сегмента образуются прямыми сбросами в водоем (прибрежную пойменную часть):

$$mu(i, t) = mu_1(i, t) + mu_2(i, t),$$

и на рельеф (чаще вследствие аварий):

$$UЗ(i, 1, t), \dots, UЗ(i, k(i), t),$$

где $k(i)$ — количество источников сбросов на рельеф i -го сегмента.

Загрязнитель поступает в i -ю камеру с входными потоками воды — $Q_1(i_1, t), \dots, Q_1(i_n, t)$ от сопряженных с i -участком входных камер:

$$m(i_1, t - \tau(i)) = Q_1(i_1, t - \tau(i))C_1(i_1, t - \tau(i)),$$

$$\dots$$

$$m(i_n, t - \tau(i)) = Q_1(i_n, t - \tau(i))C_1(i_n, t - \tau(i)),$$

здесь $I(i) = \{i_1, \dots, i_n\}$ — индексное множество номеров входных потоков (камер) для i -го сегмента (согласно рис. 3 имеем: $I(4) = \{1, 2\}$, $I(5) = \{4, 3\}$, $I(7) = \{5, 6\}$, $\tau(i)$ — время транс-

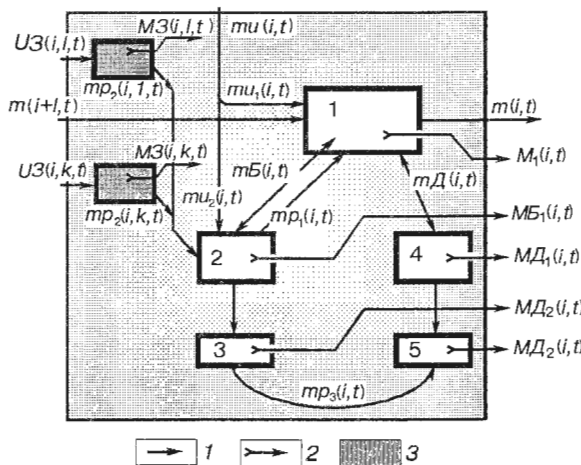


Рис. 4. Схема массообменных процессов в секторе, приуроченная к i -й камере.

1 — направления массообменных процессов, 2 — указатели текущего состояния анализируемых сред, 3 — участки аварийных разливов загрязнителей.

портного запаздывания миграции загрязнителя в i -ячейке камеры, $C_1(i, t)$ — концентрация загрязнителя в i -й камере:

$$C_1(i, t) = M_1(i, t) / V_1(i, t), \quad (2)$$

где $V_1(i, t)$ — объем воды в i -камере.

В силу введенных обозначений выходной расход загрязнителя с основными потоками воды определяется следующим образом:

$$m(i, t) = Q_1(i, t) C_1(i, t). \quad (3)$$

Первые члены суммы правой части системы уравнений отражают скорость биохимического распада (трансформации) загрязняющего вещества.

Для первого уравнения имеем:

$$\begin{aligned} \alpha_1(\Theta, M_1(i, t)) &= \\ &= \alpha_1(\Theta) V_1(i, t) \text{sat}(1, C_{1+}, C_1(i, t)), \end{aligned} \quad (4)$$

здесь функция насыщения по концентрации до значения C_{1+} имеет вид (рис. 5):

$$\text{sat}(a, b, c) = \begin{cases} -b, & \text{если } c \leq -b/a, \\ ac, & \text{если } c \in]-b/a, b/a[, \\ b, & \text{если } c \geq b/a. \end{cases}$$

Аналогичные выражения записываются для оставшихся уравнений:

$$\begin{cases} \alpha_{B_1}(\Theta, MB_1(i, t)) = \alpha_{B_1}(\Theta) SB(i) \\ \text{sat}(1, CB_{+}, CB_1(i, t)), \\ \alpha_{D_1}(\Theta, MD_1(i, t)) = \alpha_{D_1}(\Theta) SD(i) \\ \text{sat}(1, CD_{+}, CD_1(i, t)), \\ \alpha_3(\Theta, MЗ(i, j, t)) = \alpha_3(\Theta) SЗ(i, j) \\ \text{sat}(1, CЗ_{+}, CЗ(i, j, t)), \end{cases} \quad (5)$$

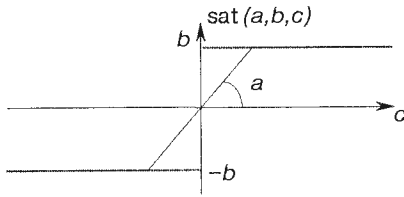


Рис. 5. График функции $\text{sat}(a, b, c)$.

где $SB(i)$ — площадь береговой полосы i -го сегмента, $SD(i)$ — площадь горизонтальной проекции дна, $SZ(i, t)$ — площадь загрязненного j -го участка в i -м секторе, $CB(i, t) = MB(i, t)/SB(i)$, $CD(i, t) = MD(i, t)/SD(i)$, $CZ(i, j, t) = MZ(i, j, t)/SZ(i, j)$ — поверхностные (площадные) концентрации загрязнителя и их уровни насыщения: CB_+ , CD_+ , CZ_+ . ($\langle \cdot \rangle = \{1, 2\}$).

Интенсивность массообмена загрязняющего вещества между водной средой русла и береговой полосой определяется кривыми равновесных состояний и зависит от уровня воды в русле $h_1(i, t)$. По схеме выделенных зон (рис. 6) процесс массообмена начинается от уровня $h_-(i)$ и нарастает до уровня $h_+(i)$, после чего динамика определяется лишь разностью концентраций в зонах:

$$mB(i, t) = \nu B(\Theta) l(i) (C_1(i, t) - \chi B(i) CB_1(i, t) \text{sat} \left(1, 1, \left(\frac{h_1(i, t) - h_-(i)}{h_+(i) - h_-(i)} \right)_+ \right)), \quad (6)$$

где принято:

$$(\chi)_+ = \begin{cases} \chi, & \text{если } \chi \geq 0, \\ 0, & \text{если } \chi < 0. \end{cases}$$

$\chi B(i)$ — коэффициент равновесности концентраций, $\nu B(\Theta)$ — настраиваемый коэффициент, пропорциональный скорости массообмена.

В случае, когда уровень воды в русле $h_1(i, t) \leq h_-(i)$ меньше контрольного значения $h_-(i)$, то поступление „грязи“ в водоем с берега возможно лишь вследствие смыва потоками поверхностной влаги $Q_{21}(i, t)$ (снеготаяния, дождевого стока):

$$mp_1(i, t) = \nu p_1(i) Q_{21}(i, t) CB(i, t) \times \left(1 - \text{sat} \left(1, 1, \left(\frac{h_1(i, t) - h_-(i)}{h_+(i) - h_-(i)} \right)_+ \right) \right). \quad (7)$$

Уровень и динамика загрязнения береговой полосы вследствие аварийных разливов $mp_2(i, j, t)$ определяется многими факторами, в

том числе: $d(i, j)$ — расстояние от j -го загрязненного участка до берега по линиям стока, $\gamma(i)$ — средний уклон линий стока i -го сегмента, $\delta d(i)$ — дренированность территории.

$$mp_2(i, j, t) = \nu p_2(i, j) (\nu_{21}(i, j, \Theta) + Q_{21}(i, t)) (CZ(i, j, t) - CZ_-(i, j))_+, \quad (8)$$

где

$$\nu p_2(i, j) = (a_1 \gamma(i) + a_2 \delta d(i) + a_3 (1/d(i, j))) \frac{\delta l(i, j)}{l(i)},$$

$$CZ_-(i, j) = CZ_0(i, j) + a_4 d(i, j).$$

В приведенном выражении отражены влияния следующих факторов: $\delta l(i, j)/l(i)$ — доля питающего фронта (см. рис. 2), $CZ_-(i, j)$ — объемом немигрирующей части загрязнителя, что связано с емкостью j -го загрязненного участка $CZ_0(i, j)$ и потерями на транспортировку, которые пропорциональны расстоянию добегаания $d(i, j)$.

Механизм миграции учитывает две составляющие: $\nu_{21}(i, j, \Theta)$ — под действием силы тяжести по уклону, $Q_{21}(i, t)$ — с потоками поверхностной влаги.

Динамика массообмена с донными отложениями соответствует схеме (6), но не зависит от уровня воды в русле:

$$mD(i, t) = \nu D(\Theta) SD(i) (C_1(i, t) - \chi D(i) CD_1(i, t)). \quad (9)$$

Динамика трансформации сорбируемого загрязнителя в условно неподвижную фракцию (для нефтей — битумизация) задается моделью линейного приближения вида:

$$mB_2(i, t) = \alpha B_2(\Theta) MB_1(i, t), \quad (10)$$

$$mD_2(i, t) = \alpha D_2(\Theta) MD_1(i, t).$$

В то же время механизмы самоочистения береговой полосы должны предусматривать смыл взвешенных и гранулированных частиц поверхностным стоком, что учтено составляющей маспереноса вида:

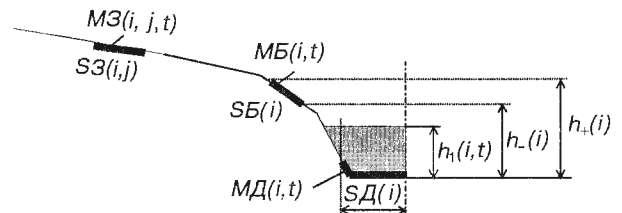


Рис. 6. Схема зон массообмена при фиксированном значении уровня воды в русле.

$$mp_3(i, t) = vp_3(i) Q_{21}(i, t) CB_2(i, t). \quad (11)$$

Соотношение (1)—(11) представляет собой искомымую модель, описывающую процесс миграции загрязнителя в пределах i -го сегмента образованного камерой водотока и примыкающей водосборной поверхностью.

НАСТРОЙКА МОДЕЛИ

Для численного интегрирования приведенной системы уравнений (заметим, что общий порядок системы уравнений для рассматриваемого участка равен: $7 \times 5 + 5 = 40$, где 7 — число камер, 5 — число кумулятивных сред сегмента, 5 — число загрязненных участков) необходимо определить (назначить) введенные параметры и функции, т. е. привести описания исходных данных.

Все множество исходных данных делится на три группы.

Первая группа — данные гидродинамики. Это прежде всего графики: $Q_1(i, t)$, $V_1(i, t)$, $h_1(i, t)$, $Q_{21}(i, t)$. Вторая группа — данные о рельефе, включая параметры русла, т. е. данные, восстанавливаемые по картографической информации. Третья группа — настроечные коэффициенты, характеризующие скорости массообменных процессов.

Содержание второй и третьей группы данных вынесено в таблицу. Типовой график зависимости параметров кинематики от температуры Θ иллюстрируется рис. 7.

Наиболее емкой является первая группа данных, корректное восстановление которых требует разработки адекватных моделей слежения [Власов, Шмелева, 1998]. Непрерывное наблюдение за динамикой многочисленных водотоков в районах нефтедобычи практически неосуществимо.

Настроечные параметры модели

| Наименование | Обозначение |
|--|--|
| <i>Данные картографического характера</i> | |
| Площадь береговой полосы | $SB(i)$ |
| Площадь горизонтальной проекции дна | $SD(i)$ |
| Площадь загрязненных участков $j = 1, 2, \dots, k(i)$, питающих i -ю камеру | $SZ(i, j)$ |
| Длина камеры | $l(i)$ |
| Контрольные уровни воды в камере | $h_-(i), h_+(i)$ |
| Среднее расстояние от j -го загрязненного участка до берега по линии стока | $d(i, j)$ |
| Средний уклон по линии стока i -го сегмента | $\gamma(i)$ |
| Дренарованность территории | $\delta d(i)$ |
| Ширина питающего фронта | $\delta l(j, i)$ |
| <i>Картографические характеристики гидродинамики</i> | |
| Площадь эффективного водосбора, приуроченная к выходу камеры | $S(i)$ |
| Средняя площадь зеркала воды в i -й камере | $SV(i)$ |
| Уклон вдоль русла | $J(i)$ |
| Графики сечения и смачиваемого периметра в зависимости от уровня воды в русле | $\omega(i, h_1), \xi(i, h_1)$ |
| <i>Настроечные параметры кинематики</i> | |
| Скорость биохимического распада: | |
| — в водной среде | $\alpha_1(\Theta)$ |
| — на береговой полосе | $\alpha B_1(\Theta), \alpha B_2(\Theta)$ |
| — в донных отложениях | $\alpha D_1(\Theta), \alpha D_2(\Theta)$ |
| — на загрязненном участке | $\alpha Z(\Theta)$ |
| Скорость массопередачи: | |
| — берег—водоток | $\nu B(\Theta)$ |
| — водоток—дно | $\nu D(\Theta)$ |
| — берег—вода со стоком | $\nu p_1(\Theta)$ |
| — загрязненный участок—берег | $\nu p_2(i, j), \nu_{21}(i, j, \Theta), [a_1, a_2, a_3]$ |
| — берег—дно | $\nu p_3(\Theta)$ |
| Уровень аккумуляций на загрязненном участке | $CZ_0(i, j)$ |
| Потери на добегание | a_4 |
| Параметры равновесности концентраций: | |
| — берег—вода | $\chi B(i)$ |
| — вода—дно | $\chi D(i)$ |
| Уровни насыщения поверхностных (площадных) концентраций загрязнителя для сред „берег“, „дно“, „загрязненный участок“ | CB_+, CD_+, CZ_+ |
| Уровень насыщения концентрации (объемной) для среды „водоток“ | C_{1+} |
| Коэффициент Шези | $c(i)$ |

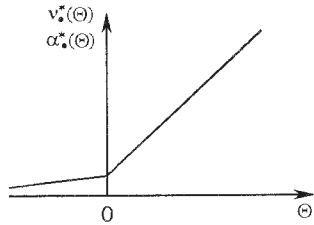


Рис. 7. Зависимости параметров кинематики от температуры Θ .

Рассмотрим вычислительную технологию приближенного восстановления ранее обозначенных графиков, сводящуюся к выбору малого числа настроечных параметров.

Пусть $Q_1(l, t)$ — график типового гидрографа, приуроченный к координате створа l (l — расстояние от устья водотока до контрольного створа), а $S(l)$ — площадь эффективного водосбора, приуроченная к данному створу.

Пусть $Q_1(i, t)$ — расход воды на выходе i -й камеры, $S(i)$ — площадь эффективного водосбора, приуроченная к выходу i -й камеры.

Первое предположение базируется на следующем очевидном утверждении.

Расходные характеристики створа пропорциональны площади водосбора:

$$Q_1(i, t) = \frac{S(i)}{S(l)} Q_1(l, t), \quad i \in I, \quad (12)$$

где I — индексное множество (номера) камер рассматриваемой гидросети.

Рассмотрим уравнение осредненной гидродинамики для i -й камеры. В соответствии с первым уравнением системы (1) можно записать:

$$\frac{dV_1(i, t)}{dt} = -Q_1(i, t) + \sum_{j \in I(i)} Q_1(j, t) + Q_{21}(i, t) + Q_{31}(i, t) + E(t) SV(i) e_1^{\uparrow \downarrow}(t), \quad (13)$$

где $I(i)$ — индексное множество входов в i -камеру, $Q_{31}(i, t)$ — водообмены с грунтами, $SV(i)$ — средняя площадь зеркала воды камеры, $e_1^{\uparrow \downarrow}(t)$ — баланс осадков и испарений с водной поверхности, $E(t)$ — индикаторная функция сезонного оттаивания и замерзания влаги ($E(t) \in [0, 1]$).

В прикладной гидродинамике поверхностных водотоков широко используются эмпирические соотношения [Штеренлихт, 1984], устанавливающие для данного створа взаимоднозначную связь между уровнями воды — $h_1(l, t)$, средней скоростью течения — $v(l, h_1)$ и площадью створа — $\omega(l, h_1)$

$$v(l, h_1) = c(l) \sqrt{J(l) \frac{\omega(l, h_1)}{\xi(l, h_1)}},$$

где $c(l)$ — коэффициент Шези, $J(l)$ — уклон вдоль русла, $\xi(l, h_1)$ — смачиваемый периметр.

Средний расход воды через створ вычисляется по выражению:

$$Q_1(l, h_1) = v(l, h_1) \omega(l, h_1).$$

Второе предположение базируется на подобного типа зависимостях, выписанных для осредненных камерных величин. Причем искомые функциональные связи удобнее задавать в графическом виде с последующей аппроксимацией графика рядом по упрощенной системе функций.

Итак, пусть априорно известны графики функций:

$$\begin{cases} h_1(i, \cdot) = h(i, Q(i, \cdot)), \\ V_1(i, \cdot) = V(i, Q(i, \cdot)), \\ \tau_1(i, \cdot) = \tau(i, Q(i, \cdot)), \end{cases} \quad (14)$$

где $V_1(i, \cdot) = \omega(i, h_1) l(i)$, $l(i)$ — длина камеры, $\tau_1(i, \cdot)$ — время полной смены воды в камере, $\tau_1(i, \cdot) = l(i)/v(i, \cdot)$ — транспортное запаздывание в модели миграции (1).

Приведенные модели миграции позволяют по типовому гидрографу восстановить почти все гидрографические характеристики камер. Для оценки динамики поверхностного водосбора $Q_{21}(i, t)$ обратимся к уравнению (13), из которого следует:

$$Q_{12}(i, t) = Q_{21}(i, t) + Q_{31}(i, t) = \frac{dV_1(i, t)}{dt} + \delta Q_1(i, t) - E(t) SV(i) e_1^{\uparrow \downarrow}(t), \quad (15)$$

где $\delta Q_1(i, t) = Q_1(i, t) - \sum_{j \in I(i)} Q_1(j, t)$, в соответствии (12), вычисляется по выражению:

$$\delta Q_1(i, t) = \frac{S(i) - \sum_{j \in I(i)} S(j)}{S(l)} Q_1(l, t).$$

Согласно (14), производная по времени от $V_1(i, t)$ — вычисляемая функция. Если учесть тот факт, что график балансов $e_1^{\uparrow \downarrow}(t)$ между осадками и испарениями также относится к типовым гидростатическим данным территории, то можно заключить, что правая часть выражения (15) восстанавливается в виде графика.

Рисунок 8,1 иллюстрирует соответствующие построения. На рис. 8,2 дан пример разделения суммарного графика (15) на две составляющие $Q_{21}(i, t)$ и $Q_{31}(i, t)$. Суть построений обусловлена двумя предпосылками: поверхностный сток существует в период от снеготаяния до замерзания, когда $E(t) > 0$; грунтовое питание камер осуществляется главным образом в зимнее время, когда $E(t) = 0$, в то время как в летнее время идет обратное пополнение грунтового „ре-

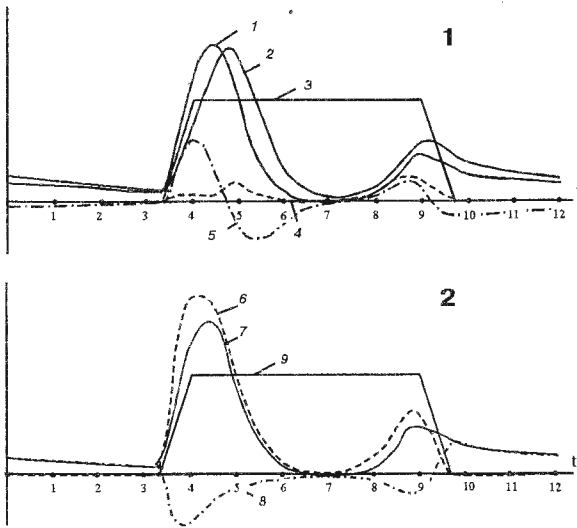


Рис. 8. Графики гидробалансов i -го участка поверхностного водосбора.

1 — $Q_{1\Sigma}(i, t)$; 2 — $\delta Q_1(i, t)$; 3 — $E(t)$; 4 — $E(t)SV(i)e_1^\dagger(t)$; 5 — $\frac{dV_1(i, t)}{dt}$; 6 — $Q_{21}(i, t)$; 7 — $Q_{21}(i, t)Q_{31}(i, t)$; 8 — $Q_{31}(i, t)$; 9 — $E(t)$.

зервуара“ русловой $Q_{31}(i, t)$ и поверхностной $Q_{23}(i, t)$ (не показано) влагой.

Учитывая подобие главных свойств графиков $Q_{21}(i, t)$ и $Q_{1\Sigma}(i, t)$ и специфику их образования, введем приближенное выражение (третье предположение) для вычисления $Q_{21}(i, t)$:

$$Q_{21}(i, t) \cong \alpha_q (Q_{21}(i, t) - \delta_q Q_{1\Sigma}^+) + E(t),$$

где $Q_{1\Sigma}^+ = \max Q_{1\Sigma}(i, t)$, а α_q и δ_q — настроечные параметры. В первом приближении можно рекомендовать: $\alpha_q = 1,26$; $\delta_q = 0,05$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные вопросы теории конструирования модели миграции загрязнителей в водотоках образуют основу для реального построения систем наблюдения за загрязненностью территорий нефтяных месторождений. Технологический регламент контроля с использованием

моделей слежения будет зависеть от многих обстоятельств, главные из которых:

1. Задача регламента: индикация аварийного события; оценка объемов новых загрязнений, либо оценка количества сброшенных загрязнителей за контрольный период; оценка места аварий и объемов загрязнителей.

2. Местоположение и количество контрольных створов, частота и регулярность замеров.

Предложенная конструкция модели (1) — (15) во многом сориентирована на типовые данные Росгидромета и типовую картографию. Однако множество свободных кинематических параметров требует разработки адекватных алгоритмов их идентификации по данным реальных наблюдений.

Литература

- Артюшок В. П., Соловьев И. Г., Шмелева Т. А. Оценка и прогнозирование экологического состояния водной среды при антропогенной нагрузке нефтегазового комплекса // Проблемы освоения нефтегазовых месторождений Западной Сибири. М., 1992, с. 14.
- Власов Е. В., Шмелева Т. А. Информационные технологии слежения и прогнозирования гидрологических режимов рек в задачах экологии // Криосфера Земли, 1998, т. II, № 3, с. 44—47.
- Ворович И. И. Рациональное использование водных ресурсов бассейна Азовского моря. М., Наука, 1981, 359 с.
- Гурман В. И. Моделирование процессов в природно-экономических системах. Новосибирск, Наука, 1982, 160 с.
- Давыдчук В. С., Линик В. Г., Чепурной Н. Д. Организация геоинформационных систем для моделирования антропогенных нарушений природной среды // Глобальные проблемы современности: региональные аспекты. М., ВНИИСИ АН СССР, 1988, вып. 5, с. 163—167.
- Долингер В. А. Об экологической ситуации в округе, обусловленной нефтяными загрязнениями // Матер. окружного совещ. по теме „Создание комплексной системы предупреждения и ликвидации нефтяных загрязнений и механизма ее финансирования на территории Ханты-Мансийского автономного округа“. Ханты-Мансийск, 1997, 74 с.
- Трофимов А. М., Панасюк М. В. Геоинформационные системы и проблемы управления окружающей средой. Казань, Изд-во Казанского ун-та, 1984, 142 с.
- Штеренлихт Д. В. Гидравлика. М., Энергоатомиздат, 1984, 640 с.

Поступила в редакцию
6 февраля 1998 г.