

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ ЗАГРЯЗНЕННЫХ УЧАСТКОВ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Т. А. Шмелева, Д. Н. Вахов

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

Статья посвящена развитию прикладных вопросов конструирования системы слежения за состоянием загрязненных участков нефтяных месторождений на основе теории наблюдения с использованием геоинформационных технологий.

Проанализирован современный регламент экологического контроля за аварийными ситуациями в районах нефтедобычи. Рассмотрена задача построения математической модели эволюции состояния загрязненности территорий, пораженных действиями аварийных разливов на нефтесборных линейных сооружениях.

В работе приведен алгоритм слежения за динамикой состояния выделенных зон загрязнения с учетом различных периодов инспектирования.

Загрязненный участок, система слежения, геоинформационная технология, динамика состояния, зона загрязнения, аварийный разлив

GEOINFORMATION TECHNOLOGIES FOR CONTROLLING THE STATE OF POLLUTED SITES OF OIL FIELDS

T. A. Shmeleva, D. N. Vakhov

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

The article is devoted to development of applied problems of designing a system for controlling the state of polluted sites of oil fields on the basis of observation theory with the use geoinformation technologies.

A modern rule of the ecological control of emergencies in oil production regions is analyzed. The problem of construction of mathematical model for the evolution of pollution state of territories with damaged oil pipelines is considered.

An algorithm of tracking the dynamics of state of allocated pollution zones with due account of various inspection periods is reported.

Polluted site, tracking system, geoinformation technology, dynamics of state, pollution zone, damage

ВВЕДЕНИЕ

Основными источниками загрязнения территорий нефтяных месторождений Среднего Приобья были и остаются аварии на внутрипромысловых нефтесборных коллекторах и водоводах. Масштабность воздействий (по официальным данным за 1996 г. на территории Нижневартовского района было зарегистрировано 1543 случая аварий на внутрипромысловых трубопроводах, в результате чего 2311,8 т нефти и высокоминерализованных пластовых вод было сброшено на рельеф и в водоемы) в сочетании с низкой устойчивостью ландшафтов обуславливают значительную, во многих случаях необратимую, деградацию состояния окружающей среды. Объем эколого-экономических потерь, пугающие оценки ущерба вывели проблему контроля, предупреждения и ликвидации последствий загрязнения территорий месторождений на одно из первых мест в работе экологических и ресурсных комитетов Ханты-Мансийского автономного округа [Долингер, 1997]. Современный регла-

мент контроля и регулирования природопользованием в части аварий удобно иллюстрировать блок-схемой (рис. 1). В регламенте слежения выделяется три типа событий: собственно аварии; плановые обследования загрязненных участков (ЗУ) (инвентаризация ЗУ); рекультивация мест загрязнений.

По каждому из названных событий ведется сопроводительная документация, в соответствии с Законом об охране окружающей среды выставляются штрафы, осуществляются начисления платы за загрязнения. В действительности, система взаимоотношений между предприятиями и все возрастающим количеством контролирующих органов оказывается более сложной и включает, помимо прочего, широкий спектр действий по планированию и реализации защитно-восстановительных мероприятий.

Отмечая функциональную полноту сложившейся системы контроля и регулирования следует подчеркнуть, что практическая реализация

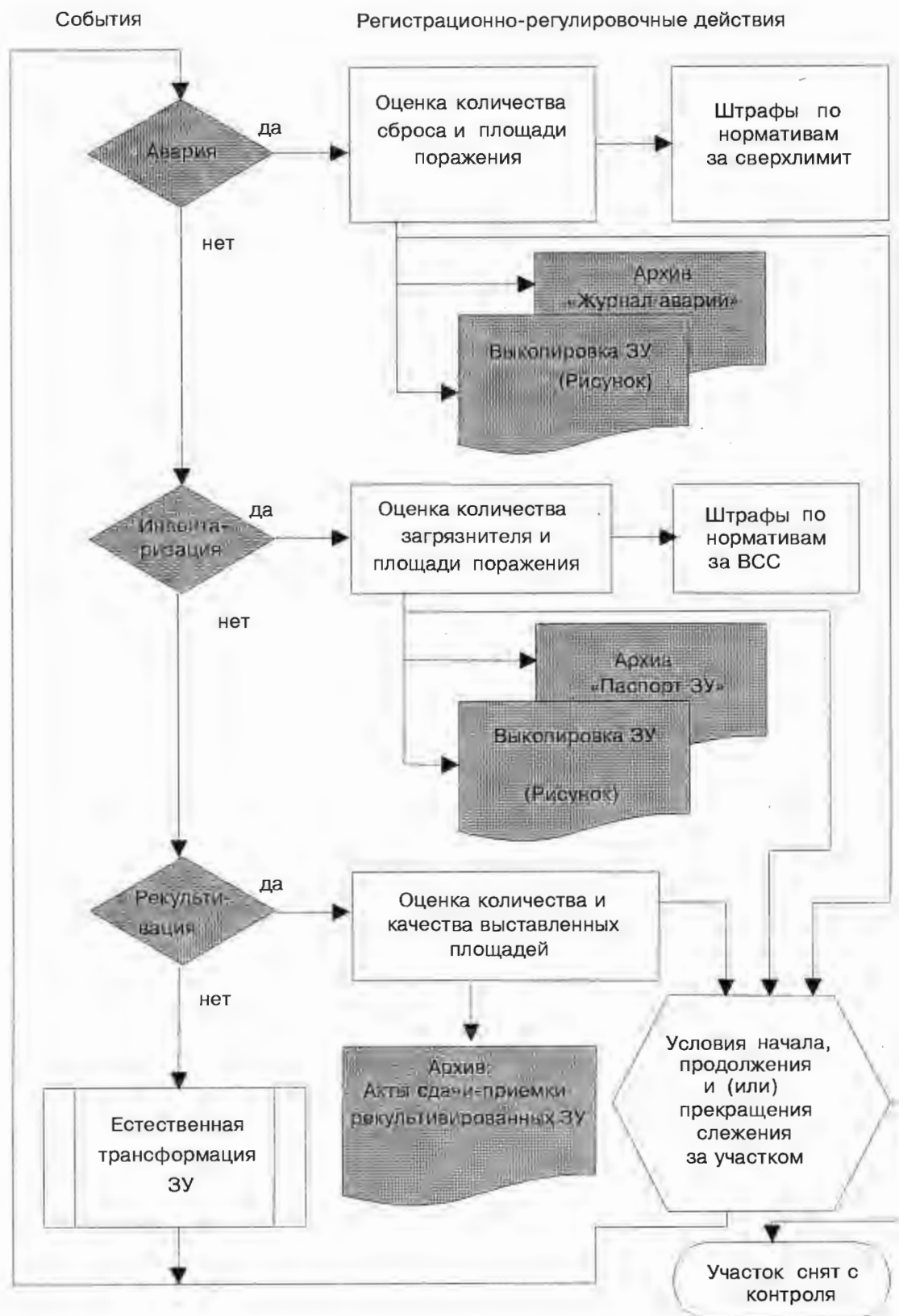


Рис. 1. Блок-схема современного регламента экологического контроля за аварийными ситуациями на территории нефтяных месторождений.

указанного регламента существенно неэффективна. Значительная территориальная рассредоточенность техногена, высокая интенсивность аварийных событий и ограниченные возможности инспекторских служб экологического контроля не позволяют с требуемой полнотой отслеживать состояние старых ЗУ и регистрировать новые. Существенное повышение эффективности функций управления природопользованием видится в переходе на автоматизированные технологии регистрации, ведения и анализа данных о состоянии мест загрязнений с использованием современных географических информационных систем. Внедрение „электронных протоколов“ регистрации, ведения и согласования данных об аварийных разливах и ЗУ [Исмагилов и др., 1998] создает реальную основу перехода к более совершенным технологиям анализа и прогнозирования состояния окружающей среды на основе методов математического моделирования.

Содержание настоящей работы посвящено развитию прикладных вопросов конструирования системы слежения за состоянием ЗУ на основе теории наблюдения [Воронов, 1985] с использованием географических информационных технологий [Мартыненко и др., 1995; Tomlin, 1990].

ВЕКТОР СОСТОЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕННОГО УЧАСТКА И ДИНАМИКА МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

В современных протоколах слежения регистрируют большое количество данных об авариях и состоянии ЗУ. Часть таких данных имеет очевидный смысл, однозначно трактуется и воспроизводима на модельных участках. Это фактурные данные о количестве сброса, отбора, стока в водоемы, о площадях загрязнения и т. п. В то же время сведения о степени и характере загрязнения территории, а также о степени разрушения биоценозов носят более качественный характер. Однако переход на строгие количественные оценки существенно обогащает технологию контроля и планирования, определяя реальные размеры площадей обязательной рекультивации и площадей с сохранившимися свойствами самовосстановления.

Достаточно спорно оценивается остаточное содержание поверхностного загрязнителя при инвентаризации участка. Данная оценка служит базой при начислении штрафа по схеме „за временное размещение отходов“. Соответствующие платежи по старым загрязненным участкам производятся, как правило, каждый год до момента рекультивации, либо полного самовосстановления.

Предметом серьезных разногласий выступают участки, образованные вследствие поверхно-

стного стока, так называемые процессы размывания или вторичного загрязнения.

Изложенная ниже автоматизированная технология наблюдения за состоянием загрязненности участков учитывает вышеназванные обстоятельства и тем самым сглаживает, а во многом снимает проблемную сторону оценивания.

Перейдем к задаче построения математической модели эволюции состояния загрязненности территорий, пораженных действиями аварийных разливов на нефтесборных линейных сооружениях.

Представим общий участок поражения площадью $S(t)$ в виде совокупности зон с различной степенью загрязнения. Пусть $C(x, y, t)$ — масса загрязнителя, приходящаяся на элементарный площадной сегмент с координатами (x, y) (площадная концентрация). Без потери общности введем разделение на четыре зоны — $i = 1, 2, 3, 4$.

Зона сильного поражения:

$$C(\cdot, \cdot, t) > \bar{C}, i = 1.$$

Зона среднего поражения:

$$\underline{C} \leq C(\cdot, \cdot, t) \leq \bar{C}, i = 2.$$

Зона слабого воздействия

$$C_< < C(\cdot, \cdot, t) < \underline{C}, i = 3.$$

Зона с нормально-восстановленными свойствами (после самовосстановления или(и) рекультивации):

$$C(\cdot, \cdot, t) \leq C_<, i = 4,$$

где $C_<$, \bar{C} , \underline{C} — априорно назначенные параметры.

В каждый момент времени t загрязненный участок будем характеризовать группой динамических параметров — вектором состояния ЗУ:

$$ZY(t) = \langle MV(i, t), MS(i, t),$$

$$S(i, t), i = 1, 2, 3, 4 \rangle, \quad (1)$$

где $M(i, t) = MV(i, t) + MS(i, t)$ — масса загрязнителя, содержащегося в i -й зоне площадью $S(i, t)$, причем $MS(i, t)$ — часть загрязнителя, связанная скелетом почвогрунтов, неучаствующая в миграции, а $MV(i, t)$ — масса подвижной части загрязнителя, способной мигрировать с поверхностной влагой. В приведенных обозначениях имеем

$$C(i, t) = M(i, t)/S(i, t), i = 1, 2, 3, 4.$$

Из определения зон следует

$$S(t) = \sum_1^4 S(i, t), \dot{S}(t) \geq 0,$$

что означает: размеры зон $S(i, t)$ могут увеличиваться и уменьшаться; общая площадь пора-

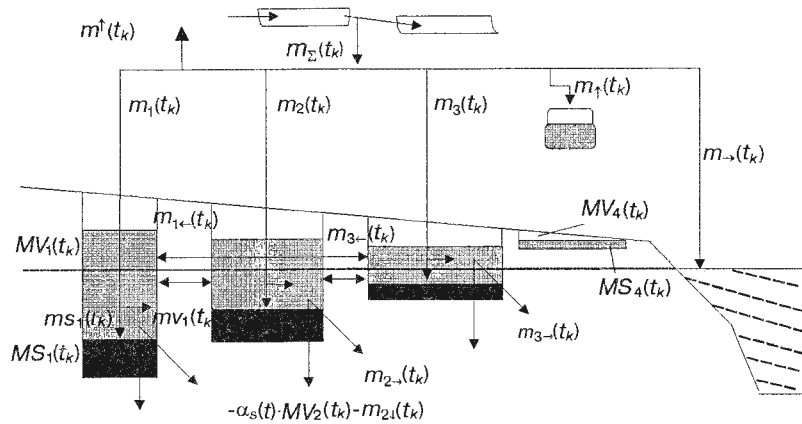


Рис. 2. Схема массообменных процессов на загрязненном участке нефтяного месторождения.

жения по определению является неубывающей функцией времени.

Будем выделять две причины возможного роста $S(t)$: вторичное размывание поверхностным водостоком; повторные аварии, приуроченные к старому ЗУ.

Рассмотрим ЗУ в момент времени t . Схема массообменных процессов ЗУ изображена на рис. 2. Вектор состояния участка включает двенадцать переменных (1). Геометрия выделенных зон с площадями $S(i, t)$ определяется структурой рельефа, подстилом и в общем случае не моделируется, а устанавливается в результате обследований, фиксируется выкопировкой (рисунком), либо дешифрируется по данным дистанционного зондирования [Математические..., 1992; Седых, 1991; Халугин и др., 1992]. Пусть состояние i -й зоны характеризуется значениями $[MV_i(t), MS_i(t), S_i(t)]$ и в момент времени t_k произошла авария со сбросом на рельеф. В соответствии с данными обследования общее количество сброшенного загрязнителя $m_\Sigma(t)$ можно представить следующим образом:

$$m_\Sigma(t_k) = m^\downarrow(t_k) + m^\uparrow(t_k) + m^\uparrow_\uparrow(t_k) + m_\rightarrow(t_k),$$

где $m^\downarrow(t_k)$ — попало на рельеф, $m^\uparrow(t_k)$ — испарилось, $m^\uparrow_\uparrow(t_k)$ — собрано, $m_\rightarrow(t_k)$ — попало в водоем.

Заметим, что с точностью до испарений, данный тип информации традиционно фиксируется природоохранными органами и в настоящее время включен в „электронные протоколы“ регистрации данных об авариях. С другой стороны, учитывая распределение загрязнителя, попавшего на рельеф, по выделенным зонам, можно записать:

$$m^\downarrow(t_k) = m_1(t_k) + m_2(t_k) + m_3(t_k),$$

где $m_i(t_k)$ — количество загрязнителя, попавшего в i -ю зону на рельефе. Тогда, вследствие аварии состояние каждой из выделенных зон изменится следующим образом:

$$\begin{aligned} MV_i(t_k +) &= MV_i(t_k -) + mv_i(t_k), \\ MS_i(t_k +) &= MS_i(t_k -) + ms_i(t_k), \end{aligned} \quad (2)$$

где $t_k -$, $t_k +$ — моменты времени до и после аварии соответственно,

$$m_i(t_k) = mv_i(t_k) + ms_i(t_k),$$

причем $mv_i(t_k)$ — количество поступающего загрязнителя, находящегося в „подвижном состоянии“, способном мигрировать с поверхностной влагой, $ms_i(t_k)$ — количество поступающего загрязнителя, переходящего в связанное состояние.

Механизм перехода загрязнителя в „связанное состояние“ обусловлен двумя факторами: связывание за счет сорбирования на поверхности рельефа; последовательное превращение жидкой фазы в твердую, для нефтепродуктов — это процесс битумизации нефти.

На одновременный акт аварийного сброса количество сорбируемого загрязнителя оценивается следующим образом

$$ms_i(t_k) = \lambda^\downarrow(t_k) \cdot m_i(t_k), \quad (3)$$

$$\lambda^\downarrow(t_k) = \text{sat} \left(1, 1, \left(1 - \frac{HV_i(t_k)}{hp^+} \right)_+ \right) \cdot \nu(t_k),$$

где $\lambda^\downarrow(t_k)$ — доля загрязнителя, находящегося в связанном состоянии; $\text{sat}(\dots)$ — мультипликативный множитель насыщения (рис. 3); $HV_i(t)$ — условная высота столба подвижного (жидкого) загрязнителя:

$$HV_i(t) = MV_i(t) / (S_i(t) \cdot \rho\nu(t)),$$

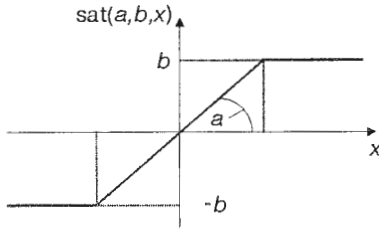


Рис. 3. Вид графика функции $\text{sat}(a, b, x)$.

здесь $\rho v(t)$ — плотность подвижного загрязнителя; $v(t) \in]0, v_+[$, $v_+ < 1$ — параметр смачиваемости (совместное свойство поверхности и жидкого загрязнителя), зависящий от уровня влажности поверхности:

$$v(t_k) = \frac{v_+}{1 + v_+ \cdot h_2(t_k)/h_2^+};$$

v_+ — параметр настройки; $h_2(t_k)$ — условная высота столба поверхностной влаги, h_2^+ — ее максимальное значение; hp^+ — максимальный уровень „сорбирующего резервуара“.

Из соотношения (3) следует, что если $HV_i(t_k) \geq hp^+$, то $\lambda^\downarrow(t_k) = 0$, т. е., если уровень подвижной фракции загрязнителя высок (например, если авария на рассматриваемом участке происходит повторно), то разовое сорбирование новой добавки загрязнителя в данной зоне не происходит и $m_i(t_k) = mv_i(t_k)$. В случае, если $HV_i(t_k) = 0$ (т. е. разлив произошел на „чистую“ поверхность), сорбирование реализуется в максимально возможном объеме $\lambda^\downarrow(t_k) = v(t_k) \leq v_+ < 1$. Количество сорбции зависит от смачиваемости $v(t_k)$, причем смачиваемость определяется свойством подстила v_+ (потенциальная смачиваемость „сухого“ рельефа) и уровнем поверхностной влаги — $h_2(t_k)$. Для нефти параметр $v(t_k)$ уменьшается с повышением влажности $h_2(t_k)$.

На основе введенных обозначений для вектора состояния загрязненного участка по зонам (1), запишем уравнения, характеризующие динамику состояния объекта наблюдения в межаварийные периоды:

$$\begin{cases} \frac{dMV_i(t)}{dt} = -\alpha_{\text{BX}}(t, MV_i(t)) - \alpha_s(t) \cdot MV_i(t) - m_{i \rightarrow}(t) - m_{i \downarrow}(t) + m_{i \leftarrow}(t), \\ \frac{dMS_i(t)}{dt} = -\alpha_{\text{BX}}(t, MS_i(t)) + \alpha_s(t) \cdot MV_i(t) + \lambda_\downarrow(t) \cdot m_{i \downarrow}(t), \end{cases} \quad (4)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$; $\alpha_{\text{BX}}(t, MV_i(t))$, $\alpha_{\text{BX}}(t, MS_i(t))$ — параметры биохимического распада жидкой и связанной (включая твердую) фазы

загрязнителя соответственно; $\alpha_s(t)$ — скорость трансформации жидкой фазы в твердую (неподвижную) — процесс битумизации; $m_{i \rightarrow}(t)$ — масса загрязнителя, участвующего в поверхностном стоке с i -й зоны; $m_{i \downarrow}(t)$ — масса загрязнителя, участвующего в грунтовом стоке i -й зоны; $\lambda_\downarrow(t)$ — параметр сорбируемости загрязнителя в грунтовом стоке i -й зоны; $m_{i \leftarrow}(t)$ — приток загрязнителя из сопредельных зон в i -ю зону.

Рассмотрим подробнее введенные выше составляющие правой части уравнений. Скорости биохимического распада жидкой и связанной фазы с учетом нелинейного эффекта типа „насыщения“ оцениваются по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{BX}}(t, MV_i(t)) &= \alpha_{\text{BX}}(t) \cdot S_i(t) \cdot \underline{HV} \cdot \text{sat}\left(1, 1, \frac{HV_i(t)}{\underline{HV}}\right), \\ \alpha_{\text{BX}}(t, MS_i(t)) &= \alpha_{\text{BX}}(t) \cdot S_i(t) \cdot \underline{HS} \cdot \text{sat}\left(1, 1, \frac{HS_i(t)}{\underline{HS}}\right), \end{aligned}$$

где $\alpha_{\text{BX}}(t)$, $\alpha_{\text{BX}}(t)$ — коэффициенты биохимического распада загрязнителя; $HV_i(t) = MV_i(t)/(S_i(t) \cdot \rho v)$, $HS_i(t) = MS_i(t)/(S_i(t) \cdot \rho s)$ — условные высоты столбов загрязнителя в жидкой и связанной фазе соответственно, \underline{HV} , \underline{HS} — их контрольные значения с линейной моделью трансформации; ρv , ρs — соответствующие плотности загрязнителя по фазам.

Количество загрязнителя, мигрирующего с поверхностным стоком с территории, оценивается следующим образом:

$$m_{i \rightarrow}(t) = v_\rightarrow \cdot Q_{2li}(t) \cdot HV_i(t),$$

где $Q_{2li}(t)$ — расход поверхностного стока с i -й зоны; v_\rightarrow — настроечный параметр, определяющий динамику миграции загрязнителя (зависит от типа поверхности и загрязнителя).

Аналогично можно записать выражения для грунтового стока $m_{i \downarrow}(t)$ и притока из сопредельных зон $m_{i \leftarrow}(t)$:

$$\begin{aligned} m_{i \downarrow}(t) &= (v_{1\downarrow} \cdot Q_{23i}(t) + v_{2\downarrow} \cdot S_i(t) \cdot \text{sat}\left(1, 1, \left(1 - \frac{HS_i(t)/hg^+}{\varepsilon + (1 - h_3(t)/h_3^+)}\right)_+\right)) \cdot HV_i(t), \\ m_{i \leftarrow}(t) &= \sum_{j \neq i} v_{ij} \cdot (Q_{2lij}(t))_+ \cdot HV_j(t), \end{aligned}$$

где $Q_{23i}(t)$ — расход грунтового стока с i -й зоны; $Q_{2lij}(t)$ — общая часть поверхностного стока для

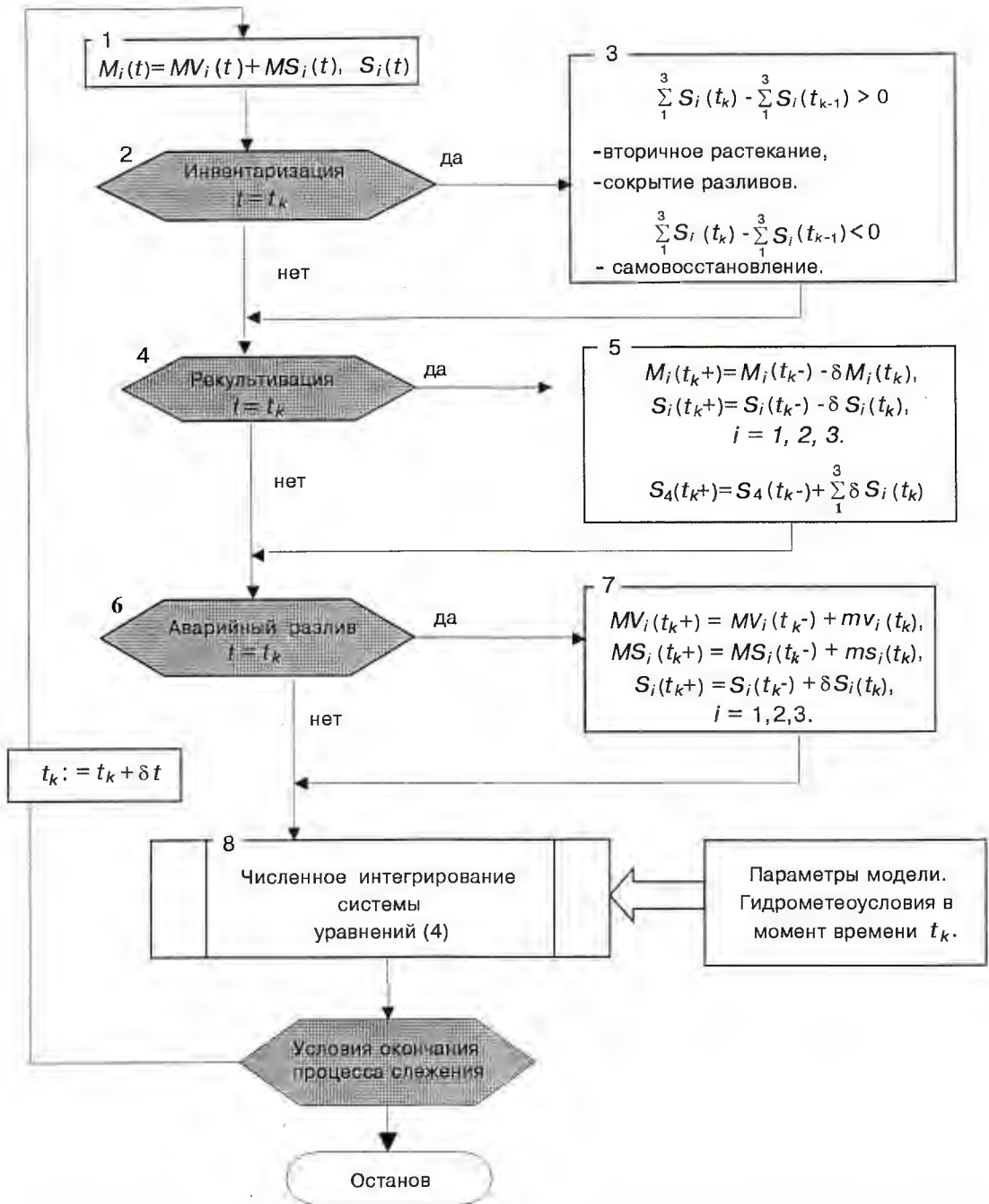


Рис. 4. Блок-схема алгоритма слежения за состоянием загрязненного участка нефтяного месторождения.

i -й и j -й зон, v_{1j}, v_{2j}, v_{ij} — настроечные параметры, определяющие динамику миграции загрязнителя; ϵ — малый параметр; $h_3(t)$ — уровень грунтовой влаги; h_3^+ — потенциальная емкость „грунтового резервуара“.

Слагаемое с функцией насыщения $\text{sat}(\dots)$ (см. рис. 3) отражает механизм самопроизволь-

ной грунтовой инфильтрации, величина hg^+ характеризует потенциальную емкость инфильтрационного пространства для загрязнителя, которое может уменьшаться по мере заполнения почвогрунтов влагой, в пределе самопроизвольная инфильтрация под действием $HV_i(t)$ отсутствует.

Динамика сорбируемости грунтового загрязнителя определяется параметром $\lambda_{\downarrow}(t) < 1$, метод задания которого аналогичен $\lambda^{\downarrow}(t)$ (3):

$$\lambda_{\downarrow}(t) = \text{sat} \left(1, 1, \left(1 - \frac{HS_i(t)}{hg^+} \right)_+ \right) \cdot v_{\downarrow}(t),$$

где

$$v_{\downarrow}(t) = \frac{v_+}{(1 + v_1 \cdot h_3(t)/h_3^+)}$$

— функция смачиваемости грунтов.

Следует заметить, что динамика миграций (параметры v_{\rightarrow} , $v_{1\downarrow}$, $v_{2\downarrow}$, v_{ij} , $Q_{21i}(t)$, $Q_{21ij}(t)$, $Q_{23i}(t)$) и трансформаций ($\alpha_{v_{\text{БХ}}}(t)$, $\alpha_{S_{\text{БХ}}}(t)$, $\alpha_S(t)$) зависят от гидрометеорологических сезонных условий. В частности, зимой почти отсутствуют миграционные и трансформационные процессы — $Q_{21i}(t) = 0$. Весной усилены миграционные процессы (увеличиваются значения $Q_{21i}(t)$), летом — трансформационные (высокие значения $\alpha_{v_{\text{БХ}}}(t)$, $\alpha_{S_{\text{БХ}}}(t)$, $\alpha_S(t)$). Осень объединяет свойства весны и лета, но с пониженной интенсивностью.

ТЕХНОЛОГИЯ НАБЛЮДЕНИЯ

Предложенная динамическая модель (1) — (4) выступает составной частью технологии слежения за состоянием загрязненных участков нефтяных месторождений. В рамках введенных выше обозначений общий регламент слежения иллюстрируется алгоритмом, изображенном на рис. 4.

Вектор состояния загрязненности участка на произвольный момент времени t оценивается на основе моделирования (численного интегрирования) системы уравнений (4) (см. рис. 4, блок 1). Предполагается, что визуальный образ ЗУ в виде выкопировки электронной карты-схемы (рис. 5,а), аэрофото- или космоизображений с зонами $S_1(t), \dots, S_4(t)$ априорно известен. Регламент инспекторских проверок фиксирует три типа событий. Это: инвентаризация ЗУ (фиксация текущего состояния площадей поражения с целью оценки процессов вторичного растекания, самовосстановления или выявления объемов сокрытых аварий — см. рис. 4, блоки 2, 3); рекультивация ЗУ (см. рис. 4, блоки 4, 5); обследование новых объявленных аварий (см. рис. 4, блоки 6, 7).

Каждое из объявленных событий предполагает обновление текущих значений вектора состояния на основе фактурных измерений величин $S_i(t_k)$, а возможно, и $\hat{M}_i(t)$.

На рис. 5,б изображены контуры зон загрязнений в период весенней инвентаризации t_k для аварии, зафиксированной в начале осени t_{k-1} ($t_k > t_{k-1}$). Увеличение площади поражения вследствие весеннего паводка не связано с увеличением количества размещенного загрязни-

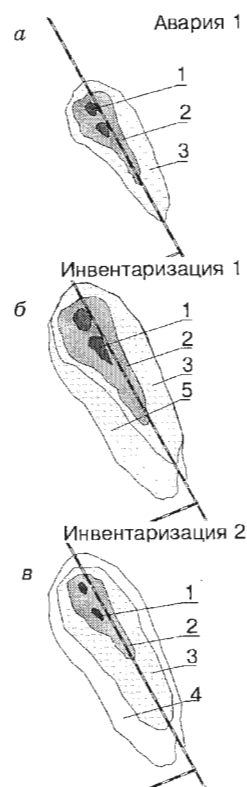


Рис. 5. Примеры выкопировок электронных карт-схем с образами загрязненных участков.

а — во время осенней аварии; б — контуры зон загрязнений в период весенней инвентаризации; в — во время плановой инвентаризации через 5 лет. 1 — зона сильного поражения; 2 — зона среднего поражения; 3 — зона слабого воздействия; 4 — зона с нормально-восстановленными свойствами (после самовосстановления); 5 — увеличение площади загрязнения вследствие вторичного размывания поверхностным стоком.

теля. Отсюда площадная концентрация загрязнителя в выделенных зонах в целом не увеличилась, т. е.

$$C_{\Sigma}(t_k) = \sum_1^3 M_i(t_k) / \sum_1^3 S_i(t_k) \leq C_{\Sigma}(t_{k-1}),$$

хотя перераспределение концентраций отдельно в выделенных зонах может быть неравномерным.

Приемка ЗУ после рекультивации связана с преобразованиями вектора состояния пораженных зон в сторону уменьшения (см. рис. 4, блок 5).

Аварийное событие (повторная авария), напротив, связано с корректировкой вектора состояния ЗУ в сторону увеличения согласно (2) с последующим разделением компонент вектора состояния на фазы — подвижную и связанную.

Циклическая процедура имитационного слежения за состоянием ЗУ продолжается до выполнения условия „останова“, например

$$\sum_1^3 S_i(t_k) \leq \delta S_0,$$

т. е. почти полного восстановления площади поражения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная технология слежения за состоянием загрязненности территории нефтяных месторождений полностью наследует типовой регламент инспектирования, существенно улучшая его качество.

Масштабность аварийных событий и объем подконтрольной документации столь велики, что службы экологического надзора не в состоянии в полном объеме и с должной оперативностью фиксировать, отслеживать, а тем более анализировать полное множество аварийных ситуаций.

Представленная технология слежения систематизирует регламент инспектирования в единую схему анализа с полным взаимосогласованным множеством данных.

Учет многофакторных явлений моделирования состояния ЗУ доставляет новые полезные оценки, такие как объемы накопленных (битумизированных) нефтепродуктов в верхнем почвогрунтовой слое; объемы биохимического распада и степень заражения биоты; объемы стока загрязнителя в сопредельные территории.

Даже в условиях редких проверок система позволяет оценивать текущее состояние уровня загрязненности территории месторождений, степень неравномерности распределения загрязнителя, учитывая размеры зон, способных самовос-

становливаясь (см. рис. 5, в), и потребные объемы рекультивационных работ.

Литература

- Воронов А. А. Введение в динамику сложных управляемых систем. М., Наука, 1985, 352 с.
- Долингер В. А. Об экологической ситуации в округе, обусловленной нефтяными загрязнениями // Создание комплексной системы предупреждения и ликвидации нефтяных загрязнений и механизма ее финансирования на территории Ханты-Мансийского автономного округа. Материалы окружного совещания. Ханты-Мансийск, 1997, с. 6—12.
- Исмагилов Т. Р., Юденко А. Е., Патракова И. И. Автоматизированные технологии ведения, сбора и анализа данных по основным источникам загрязнения (*электронные протоколы*) // Криосфера Земли, 1998, № 3, с. 20—27.
- Мартыненко А. И., Бугаевский Ю. Л., Шибалов С. Н. и др. Основы ГИС: теория и практика. WinGIS руководство пользователя. М., Инженерная экология, 1995, 232 с.
- Математические и технические проблемы обработки визуальной информации. Сб. науч. тр. / Под ред. А. С. Алексеева, В. П. Пяткина. Новосибирск, ВЦ СО РАН, 1992, 114 с.
- Седых В. Н. Аэрокосмический мониторинг лесного покрова. Новосибирск, Наука, 1991, 239 с.
- Халугин Е. И., Жалковский Е. А., Жданов Н. Д. Цифровые карты / Под ред. Е. И. Халугина. М., Недра, 1992, 419 с.
- Tomlin C. Dana. Geographic information systems and cartographic modeling. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.07632, 1990, 250 p.

Поступила в редакцию
6 февраля 1998 г.