

В.М. Черненкоий, П.Г. Ерцев

**ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ
ФОРМАЛИЗОВАННАЯ МОДЕЛЬ
ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ
ДЛЯ АНАЛИЗА МЕТОДОВ ЛИКВИДАЦИИ
ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТИ**

Рассмотрена проблема описания природной среды в процессах ликвидации аварийных разливов нефти. Для решения этой проблемы использован объектно-ориентированный подход к описанию предметной области в целях дальнейшего исследования методами имитационного моделирования. Для формирования понятия «объект» предложено провести пространственную декомпозицию путем задания сетки в плоскости x и разбиения по оси z , в результате чего создаются понятия «ячейка», «слой», «секция». Ячейка характеризуется совокупностью входящих в нее компонентов, структурно организованных в виде дерева, компоненты — параметрами, над которыми заданы операции преобразования (разложение, синтез, трансформация, внутреннее преобразование), а также операции перемещения компонентов. Для описания процессов преобразования использована алгоритмическая модель.

E-mail: iu5vmch@rambler.ru

Ключевые слова: объектно-ориентированное описание, имитация, алгоритмическая модель, ликвидация разливов нефти, декомпозиция, процессы преобразования.

Введение. Несмотря на высокий уровень безопасности, обеспечиваемый технологическими процессами нефтегазодобывающего производства, полностью исключить аварийные разливы нефти невозможно [1].

Попадающая в почву нефть приводит к изменению состава почв и их состоянию, к развитию различных негативных процессов, ухудшающих качества почв. Согласно ГОСТ 17.4.3.04—85, попадание нефти в почву относится к загрязнению почв и в соответствии с ГОСТ 17.5.1.01—83 приводит к нарушению земель [2, 3]. Загрязненные земли теряют хозяйственную ценность, представляют собой угрозу дальнейшего распространения загрязнения и отрицательно воздействуют на окружающую среду в целом. Такие почвы относятся к нарушенным землям [3].

Исходя из требований охраны окружающей среды и в соответствии с законодательством, для нарушенных земель разрабатывается и осуществляется комплекс мер, направленных на восстановление их продуктивности и народнохозяйственной ценности, а также на улучшение состояния окружающей среды. Комплекс мер называется рекультивацией земель [3].

Действия по локализации и ликвидации аварийного разлива нефти регламентируются специально создаваемыми в соответствии с

постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2002 г. № 240 «О порядке организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации» планами по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов (ПЛАРН).

Актуальность восстановительных работ связана с высокой опасностью нефтяного загрязнения, длительными сроками естественной деградации нефти, а также с низкими скоростями самовосстановления нарушенных экологических систем, особенно в условиях Крайнего Севера [4, 5].

При разработке проектов (программ) рекультивации земель и принятии решений о ликвидации последствий аварийных разливов нефти необходимо решить задачи определения [6]:

- потенциала самовосстановления экологической системы;
- обоснованного допустимого остаточного содержания нефти (ДОСН);
- наиболее приемлемых с экономической и экологической точек зрения методов и технологий рекультивации земель, в том числе с учетом возможного экологического ущерба от применения этих технологий.

Решить перечисленные задачи можно путем проведения серий натуральных испытаний или с использованием результатов математического моделирования [7]. Натурные испытания обладают рядом недостатков, существенно сужающих возможности их применения. Так, к недостаткам относятся высокая стоимость работ и их продолжительность, сложность заложения большого количества альтернативных опытов. При наличии значительного объема опытных данных предпочитают методы математического моделирования, обладающие гибкостью в создании различных сценариев развития событий, скоростью получения результатов и относительно невысокой стоимостью их реализации.

Математическое моделирование поведения экологической системы является трудоемкой задачей вследствие [8]:

- сложности и комплексности экологических процессов;
- недостаточной изученности как отдельных экологических объектов и процессов, так и их взаимосвязей;
- нечеткости исходных данных.

Для практического решения поставленных задач предложено использовать метод объектно-ориентированного имитационного моделирования, совмещающего объектно-ориентированный подход к описанию предметной области и вычислительное моделирование путем имитации в дискретном времени.

С точки зрения объектно-ориентированного подхода экологическая система и предметы физического мира (природно-техногенный агломерат, ПТА) рассматриваются в виде структурированной системы компонентов и связанных с ними процессов [9].

Суть имитационного моделирования заключается в описании развития системы во времени последовательностью смен ее состояний, определяемую операторами перехода от текущего состояния к новому. Последовательность операторов формируют процессы, которые представляют собой наборы специальных алгоритмов пошагового изменения состояния системы [10].

Совмещение объектно-ориентированного подхода и принципов имитационного моделирования позволяет свести описание комплексных моделей экологических систем к описанию алгоритмов изменения состояния объектов систем во времени, а также дает возможность осуществления контроля и оперативного управления в ходе вычислительного эксперимента [11].

Основные аспекты таких моделей — автономность, упорядоченность, динамичность и взаимосвязанность. **Автономность** выражается в инкапсуляции объектом своих характеристик и связанных с ним процессов, **упорядоченность** — в однозначной идентификации пространственного местоположения каждого из объектов системы, **динамичность** — в изменении параметров взаимодействующих объектов в дискретные промежутки времени, **взаимосвязанность** — в зависимости процессов, протекающих в объекте, от состояния других объектов системы и иерархической связи объектов системы, т. е. способности объектов содержать другие объекты.

Рассмотрим принципы объектно-ориентированного подхода к описанию предметной области. Для описания предметной области и процессов преобразования будем использовать нотацию, предложенную в работе [12].

Компонентная декомпозиция. Пусть ПТА = $\langle P \rangle$ — природно-техногенный агломерат, характеризующий рассматриваемый участок загрязненных нефтью земель; $P = \{p_j\}$, $i = 1, \dots, N_p$, — множество всех параметров, описывающих различные аспекты ПТА, $p_j = \langle \text{имя}, \text{значение} \rangle$; $\sigma(p_j)$ — множество значений p_j .

Введем понятие компонент: $c_j = \langle \text{имя}, \sigma(c_i) \rangle$, где $\sigma(c_j) = \{p_j^1, p_j^2, \dots, p_j^{n_j}\}$ — множество параметров, описывающих компонент c_j , $\sigma(c_j) \subset P$.

Множество $C = \{c_j\}$, $j = 1, \dots, N_c$, удовлетворяющее условиям

$$\bigcup_j \sigma(c_j) = P; \quad \sigma(c_i) \cap_{\forall i, j: i \neq j} (c_j) \sigma = \emptyset,$$

назовем компонентной декомпозицией.

Смеси компонентов. Являясь отражением объектов физического мира, компоненты ПТА c_j занимают некоторую область пространства $\nu(c_j)$.

Смесь — множество компонентов $\gamma(c_i) = \{c_j\}$, для каждого элемента которого существует некоторая общая область пространства с компонентом c_i :

$$\forall c_j \in \gamma(c_i) : \nu(c_i) \cap \nu(c_j) \neq \emptyset.$$

Смесь $\gamma(c_i)$ будет неполной, если существует такая смесь $\gamma(c_j)$, для которой смесь $\gamma(c_i)$ является ее подмножеством:

$$\exists c_j \notin \gamma(c_i) : \gamma(c_i) \subset \gamma(c_j).$$

В противном случае смесь $\gamma(c_i)$ называется полной, а компонент c_i — корневым компонентом смеси.

Компоненты $c_{\text{пр}}$ и $c_{\text{нос}}$, для которых область пространства $\nu(c_{\text{пр}})$ находится внутри области $\nu(c_{\text{нос}})$ — это примесь и носитель соответственно:

$$\nu(c_{\text{пр}}) \subset \nu(c_{\text{нос}}).$$

Область примеси всегда строго меньше области носителя. Перемещение носителя в пространстве влечет за собой перемещение всех его примесей.

Определим бинарное отношение включения β :

$$c_{\text{пр}} \beta c_{\text{нос}} \Rightarrow \nu(c_{\text{пр}}) \subset \nu(c_{\text{нос}}).$$

Непосредственным носителем для примеси $c_{\text{пр}}$ будет носитель $c_{\text{нос}}$, для которого не существует примеси $c_{\text{пр}}$ среди всех носителей:

$$\neg \exists c_i \in \{c_j : c_{\text{пр}} \beta c_j\} : c_i \beta c_{\text{нос}}.$$

Непосредственной примесью для носителя $c_{\text{нос}}$ назовем примесь $c_{\text{пр}}$, для которой не существует носителей $c_{\text{нос}}$ среди всех примесей:

$$\neg \exists c_i \in \{c_j : c_j \beta c_{\text{нос}}\} : c_{\text{пр}} \beta c_i.$$

Компонент $c_{\text{пр}}^{\text{в.тк}}$, принадлежащий более чем одной полной смеси, является внешней транskomпонентной примесью:

$$c_{\text{пр}}^{\text{в.тк}} \in C_i, C_j, i \neq j.$$

Компонент $c_{\text{пр}}^{\text{вн.тк}}$, принадлежащий двум различным неполным смесям, корневые компоненты которых не находятся в отношении включения β , назовем внутренней транskomпонентной примесью:

$$c_{\text{пр}}^{\text{вн.тк}} \in C_i, C_j, \neg \exists C_j, i \neq j: C_i \beta C_j \vee C_j \beta C_i,$$

где C_i, C_j — неполные смеси.

Зависимая полная смесь C_i — это смесь, среди компонентов которой существует хотя бы одна внешняя транskomпонентная примесь $c_{\text{пр}}^{\text{в.тк}}$:

$$c_{\text{пр}}^{\text{в.тк}} \in C_i.$$

В противном случае полная смесь будет независимой.

Полная смесь C_i является противоречивой, если среди ее компонентов есть хотя бы одна внутренняя транskomпонентная примесь $c_{\text{пр}}^{\text{вн.тк}}$:

$$c_{\text{пр}}^{\text{вн.тк}} \in C_i.$$

Иначе полная смесь называется согласованной.

Утверждение 1. Независимая согласованная полная смесь содержит единственный компонент, не являющийся примесью для других компонентов смеси.

Утверждение 2. Такой компонент является носителем для всех компонентов смеси.

Компонент, удовлетворяющий утверждениям 1 и 2, — универсальный носитель смеси.

Упорядоченную пару компонентов $l = \{c_{\text{нос}}, c_{\text{пр}}\}$, удовлетворяющую условию, назовем связью:

$$c_{\text{нос}} \beta c_{\text{пр}}.$$

Утверждение 3. Отношение включения β для полной независимой и согласованной смеси C_i приводит к иерархической структуре, которую можно представить в виде деревьев $\psi_i = \langle C_i, L_i \rangle$, где $L_i = \{L_j^i\}$ — множество связей смеси C_i .

Рассмотрим ПТА, в котором все полные смеси независимы и согласованы, т. е. имеют структуру в виде деревьев. Обозначим множество таких смесей ПТА как $\Psi = \langle \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_M \rangle$.

Пространственная декомпозиция осуществляется путем задания сетки в плоскости x и вертикали по оси z .

Пусть S — площадь, занимаемая ПТА; Oxy — ортогональная система координат. Осуществим разбиение ПТА на равновеликие квадратные единичные площади Δs_{xy} заданием сетки $S_{xy} = \{\Delta s_{xy}\}$ с шагом s по осям Ox и Oy , $x = 1, \dots, M_x$, $y = 1, \dots, M_y$. Сетка S_{xy} должна покрывать всю площадь рассматриваемого ПТА

$$S \subset \bigcup_{\forall x,y} \Delta s_{xy}.$$

Декомпозиция ПТА по оси z может быть проведена в соответствии с границами корневых компонентов смесей. Для этого зададим отношение порядка $\alpha: \Psi \rightarrow V$, определяющее расположение компонентов смеси по оси относительно друг друга, где $V = \{1, \dots, M_z\}$ — множество уровней.

Множество высот $H = \langle h(\psi_1), h(\psi_2), \dots, h(\psi_{M_z}) \rangle$ смесей $h(\psi_i)$, упорядоченных по отношению α , называют вертикалью.

Задание сетки и вертикали приводит к однозначной пространственной декомпозиции ПТА на трехмерное множество кубов (ячеек), каждый из которых можно описать тройкой координат $\langle x, y, z \rangle$, $x = 1, \dots, M_x$, $y = 1, \dots, M_y$, $z = 1, \dots, M_z$.

Множество смесей Ψ_{xy} , упорядоченное по отношению α и характеризующее ПТА в пределах единичной площади Δs_{xy} , в паре с вертикалью H_{xy} для единичной площади Δs_{xy} называется единичным столбом. Таким образом, для описания ПТА необходимо задание отображения

$$f: S_{xy} \rightarrow \langle \Psi_{xy}, H_{xy} \rangle,$$

где $S_{xy} = \{\Delta s_{xy}\}$ — сетка; $\langle \Psi_{xy}, H_{xy} \rangle$ — единичный столб; $\Psi_{xy} = \langle \psi_{xy z_1}, \psi_{xy z_2}, \dots, \psi_{xy z_{M_z}} \rangle$ — множество смесей, упорядоченных по отношению α , $H_{xy} = \langle h(\psi_{xy z_1}), h(\psi_{xy z_2}), \dots, h(\psi_{xy z_{M_z}}) \rangle$ — вертикаль, $z = 1, \dots, M_z$.

Другими словами, ПТА — это множество единичных столбов, соответствующих ячейкам сетки,

$$\text{ПТА} = \left\{ \langle \Psi_{xy}, H_{xy} \rangle \right\}.$$

Межкомпонентные преобразования и перемещение. В ходе эволюции ПТА, описываемой некоторым функционалом, происходит изменение его параметров, которые могут быть описаны внутриком-

понентными и межкомпонентными преобразованиями, а также вертикальным ($f_{\text{вер}}$) и горизонтальным ($f_{\text{гор}}$) перемещениями:

$$F = \left\{ f_i (P_{\text{ак}}, P_{\text{пас}}, P_{\text{упр}} t) \rightarrow P_{\text{рез}} \right\},$$

где $P_{\text{ак}}$ — активные параметры (действующие компоненты); $P_{\text{пас}} \subset P$ — пассивные параметры (факторы преобразования); $P_{\text{упр}}$ — управляющие параметры (внешние воздействия); $P_{\text{рез}}$ — результирующие параметры (компоненты).

К основным типам преобразований компонентов с сохранением количества вещества относятся преобразования:

- 1) разложения $f_{\text{раз}}, P_{\text{ак}} = \langle \sigma(c_k), \sigma(c_l), \sigma(c_m) \rangle, P_{\text{пас}} \subset P$;
- 2) синтеза $f_{\text{син}}, P_{\text{ак}} = \langle \sigma(c_k), \sigma(c_l), \sigma(c_m) \rangle, P_{\text{пас}} \subset P$;
- 3) трансформации $f_{\text{тр}}, P_{\text{ак}} = \langle \sigma(c_k), \sigma(c_l) \rangle, P_{\text{пас}} \subset P$;
- 4) внутреннее $f_{\text{вн}}, P_{\text{ак}} = \langle \sigma(c_k) \rangle, P_{\text{пас}} \subset P$.

Преобразование разложения — способность одного компонента к образованию двух новых компонентов, характерно уменьшение количества исходного компонента одновременно с увеличением количества двух результирующих компонентов. Преобразование разложения можно расширить для случая разложения компонента на три и более компонентов.

Преобразование синтеза — способность двух компонентов к синтезу одного нового компонента, характерно уменьшение количества двух исходных компонентов с одновременным увеличением количества результирующего компонента. Преобразование синтеза можно расширить для случая синтеза нового компонента из трех и более компонентов.

Преобразование трансформации — способность перехода одного компонента в другой компонент, имеющий отличные характеристики и свойства. Преобразование трансформаций — частный случай преобразования разложения, когда результирующий компонент только один.

Внутреннее преобразование отражает способность компонента к изменению своих внутренних характеристик во времени.

Перемещение компонентов между смесями различных ячеек представлено:

- горизонтальным перемещением $f_{\text{гор}}$ компонента $(c_k)_{x_0 y_0 z}$,

$$P_{\text{ак}} = \left\langle \sigma\left((c_k)_{x_0 y_0 z}\right), \sigma\left((c_k)_{x_1 y_1 z}\right), \dots, \sigma\left((c_k)_{x_n y_n z}\right) \right\rangle, P_{\text{пас}} \subset P$$
;
- вертикальным перемещением $f_{\text{вер}}$ компонента $(c_k)_{x y z_0}$, $P_{\text{ак}} =$

$$= \left\langle \sigma\left((c_k)_{x y z_0}\right), \sigma\left((c_k)_{x y z_1}\right), \dots, \sigma\left((c_k)_{x y z_n}\right) \right\rangle, P_{\text{пас}} \subset P$$
.

Горизонтальное перемещение — способность компонента к миграции в пределах уровня, вертикальное перемещение — в пределах единичного столба.

Состояние модели описывается набором состояний ее отдельных компонентов, полученных в ходе компонентной и пространственной декомпозиций.

Пусть $\sigma(p_i^j)$ — множество значений i -го параметра j -го компонента, тогда $S_{c_i} = \prod_j \sigma(p_i^j)$ — пространство состояний компонента

c_i ; $S_{C_z} = \prod_i S_{c_i}$ — пространство состояний смеси C_z единичного

столба Ψ_{xy} ; $S_{\Psi_{xy}} = \prod_z S_{C_z}$ — пространство состояний единичного

столба Ψ_{xy} , $S = \prod_{x,y} S_{\Psi}$ — пространство состояний модели (ПТА).

Изменение состояния системы во времени. Все изменения состояния системы происходят в результате протекающих в ней преобразований, являющихся отражением реальных физических, химических и других изменений в моделируемой системе.

Эволюция системы непрерывна во времени, однако в рамках предложенной модели примем, что состояние системы изменяется скачкообразно в дискретном времени.

Пусть $T = \{t_i\}$ — упорядоченное множество моментов времени изменения состояния модели, $t_i < t_{i+1}$, $S(t_i) \in S$ — состояние модели в момент времени t_i .

Вычисление нового состояния системы $S(t_{i+1})$ в момент времени t_{i+1} связано с суммированием текущего состояния системы $S(t_i)$ с дифференциальным состоянием $\Delta S(t_{i+1})$, вычисленным для всех преобразований, произошедших в момент времени t_{i+1} :

$$S(t_{i+1}) = S(t_i) + \Delta S(t_{i+1}).$$

Пусть $F = \{f_j\}$ — множество всех процессов, протекающих в системе; $f_j(P_{акj}, P_{пасj}, P_{упрj}, t) \rightarrow P_{резj}$, тогда $S_{f_j}(t_{i+1}) = S_{f_j}(t_i) + \Delta S_{f_j}(t_{i+1})$ — изменение состояния системы в результате преобразования f_j ; $S_{f_j}(t_i) = S(t_i) + \sum_{k < j} \Delta S_{f_k}(t_{i+1})$ — исходное состояние преобразования

f_j , учитывающее дифференциальные состояния предыдущих преобразований; $\Delta S_{f_j}(t_{i+1}) = P_{резf_j}(t_{i+1}) - P_{акf_j}(t_{i+1})$ — дифференциальное со-

стояние преобразования f_j . Таким образом, дифференциальное состояние системы $\Delta S(t_{i+1})$ вычисляется как сумма дифференциальных состояний всех преобразований, произошедших в момент времени t_{i+1} :

$$\Delta S(t_{i+1}) = \sum_j \Delta S_{f_j}(t_{i+1}).$$

Инкапсуляция и близкодействие. Инкапсуляция параметров и преобразований в рамках одного компонента требует определения области действия преобразований. Найдем области действия преобразований в соответствии с их типами так, чтобы максимально сузить область воздействия преобразований и выделить для каждого из них главный действующий компонент:

$$f_{\text{раз}} \quad c_k, c_l, c_m \in C_{xyz}^i, f_{\text{раз}} \in \mu(c_k);$$

$$f_{\text{син}} \quad c_k, c_l, c_m \in C_{xyz}^i, f_{\text{син}} \in \mu(c_m);$$

$$f_{\text{тр}} \quad c_k, c_l \in C_{xyz}^i, f_{\text{тр}} \in \mu(c_k);$$

$$f_{\text{вн}} \quad c_k \in C_{xyz}^i, f_{\text{вн}} \in \mu(c_k);$$

$$f_{\text{гор}} \quad (c_k)_{x_0 y_0 z} \in C_{x_0 y_0 z}, (c_k)_{x_1 y_0 z} \in C_{x_1 y_0 z}, (c_k)_{x_2 y_0 z} \in C_{x_2 y_0 z}, \\ (c_k)_{x_0 y_1 z} \in C_{x_0 y_1 z}, (c_k)_{x_0 y_2 z} \in C_{x_0 y_2 z}; x_1 = x_0 + 1, x_2 = x_0 - 1, \\ y_1 = y_0 + 1, y_2 = y_0 - 1, f_{\text{гор}} \in \mu\left((c_k)_{x_0 y_0 z}\right);$$

$$f_{\text{вер}} \quad (c_k)_{x y z_0} \in C_{x y z_0}, (c_k)_{x y z_1} \in C_{x y z_1}, (c_k)_{x y z_2} \in C_{x y z_2}, z_1 = z_0 + 1, \\ z_2 = z_0 - 1, f_{\text{вер}} \in \mu\left((c_k)_{x y z_0}\right).$$

Взаимодействие в пределах одной смеси для межкомпонентных преобразований, в пределах ближайших двух уровней единичного столба для вертикального перемещения и в пределах ближайших четырех смесей в пределах одного уровня называют **принципом близкодействия**.

Граничные условия. Для описания взаимодействия модели с окружающей средой будем использовать понятие «границы ПТА».

Граница ПТА — множество единичных столбов, расположенных по периметру сетки

$$GP = \left\{ \left\langle \Psi_{xy}, H_{xy} \right\rangle \right\} \Big|_{x=1 \vee x=M_x, y=1, \dots, M_y} \cup \left\{ \left\langle \Psi_{xy}, H_{xy} \right\rangle \right\} \Big|_{x=1, \dots, M_x, y=1 \vee y=M_y}.$$

Единичные столбы, принадлежащие границе ПТА, будем называть граничными столбами.

Компоненты граничных столбов связаны с единственным преобразованием — с преобразованием стабилизации, возвращающим значения параметров компонентов к некоторым заданным значениям:

$$\forall \Psi_{xy} \in GP, c_i \in \Psi_{xy} : \mu(c_i) = f_{\text{стаб}}.$$

Заключение. Практическое решение поставленных задач предлагается осуществить с использованием метода объектно-ориентированного имитационного моделирования, совмещающего объектно-ориентированный подход к описанию предметной области и вычислительное моделирование путем имитации с дискретным временем.

Основные аспекты предметно-ориентированного подхода к описанию: компонентная декомпозиция (описание ПТА в виде множества компонентов); смеси компонентов; пространственная декомпозиция (задание сетки и вертикали); единичные столбы смесей; граничные столбы смесей.

Для обеспечения связанности происходящих в модели преобразований с задействованными в них компонентами описание компонента включает в себя все преобразования, главным действующим компонентом которых он является. Область действия преобразований подчиняется принципу близкодействия.

Полученные результаты позволяют синтезировать вычислительный алгоритм, реализующий объектно-ориентированную модель функционирования системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булатов А.И., Макаренко П.П., Шеметов В.Ю. Охрана окружающей среды в нефтегазовой промышленности. — М.: Недра, 1997. — 483 с.
2. ГОСТ 17.4.3.04—85. Охрана природы. Почвы. Общие требования к контролю и охране от загрязнения.
3. ГОСТ 17.5.1.01—83. Охрана природы. Рекультивация земель. Термины и определения.
4. Ерцев Г.Н., Баренбойм Г.М., Таскаев А.И. Опыт ликвидации аварийных разливов нефти в Усинском районе Республики Коми. — Сыктывкар, 2000. — 183 с.
5. Ерцев Г.Н., Ерцев П.Г. Агромелиоративная технология. Рекультивация земель и водно-болотных угодий в условиях холодного климата // Технадзор. 2010. № 1. — С. 38—39.
6. Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем / Под ред. М.И. Глазковой. — М.: Наука, 1988. — 254 с.
7. Применение математического моделирования при ликвидации загрязнения почвы и подземных вод нефтепродуктами / И.С. Пашковский, Д.В. Коннов, И.С. Клейн и др. // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2002. № 5. — С. 436—441.
8. Калужный И.Л., Лавров С.А. Информационно-прогностическая система обеспечения проведения мероприятий по локализации и ликвидации разливов нефти магистральных трубопроводов, расположенных на олиготорфных болотных массивах // Водное хозяйство России. 2000. Т. 2. № 6.

9. Ерцев П.Г. Метод объектно-ориентированного имитационного моделирования загрязненных территорий при аварийных разливах нефти // Мат. Второй науч.-практич. конф. «Применение компьютерных технологий в экологии, водном хозяйстве и землеустройстве», г. Сыктывкар, 6—9 октября 2008 г. — Сыктывкар. 2008. — 154 с.
10. Ворошук А.Н. Математические основы теории построения имитационных моделей заданной точности и моделирование экологических систем: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1988. — 31 с.
11. Черненький В.М., Ерцев П.Г. Некоторые вопросы имитационного моделирования ликвидации последствий аварийных разливов нефти // Мат. Четвертой науч.-практич. конф. «Экологические работы на месторождениях нефти Тимано-Печорской провинции. Состояние и перспективы». г. Усинск, 11—15 сентября 2006 г. — Сыктывкар, 2006. — С. 114—120.
12. Черненький В.М. Процессно-ориентированная концепция системного моделирования АСУ: Дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2000. — 299 с.

Статья поступила в редакцию 4.07.2012