

УДК 504.064.2.001.18

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОГНОЗНОГО МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ НАКОПЛЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВРЕДА

© 2025 К.Л. Чертес, А.П. Сеянко, Н.С. Бухман, О.В. Тушицына, А.В. Васильев

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 01.09.2025

В статье приводятся результаты построения прогнозной области загрязнения на основе численного гидрогеологического моделирования. Проведен анализ существующих типизаций объектов накопленного экологического вреда. В основу создаваемых моделей загрязнения геосреды положено сочетание закономерностей теории фильтрации жидкостей через «идеальные» пористые среды и основ массопереноса вязких потоков загрязнений во фрагментах их реальных аналогов: в песчаных, глинистых породах и других элементах геосреды, обладающих неоднородным сопротивлением. Геосреда, нарушенная многолетним поступлением токсичных соединений, выступает в качестве источника вторичного загрязнения экосистем. Накопленные в породах зоны аэрации инфильтраты подвергаются обводнению, взаимодействуют с веществом грунта с образованием новых соединений. Периодически, за счет микроподвижек земной коры, механически связанные («защемленные» порами и капиллярами грунта) соединения переходят в свободное состояние и продолжают выноситься в водоисточники даже после ликвидации массива отходов. Отсутствие прогноза загрязнений геосреды, включая их аккумуляцию в отдельных фрагментах пород, динамику перемещения поллютантов с подземными водами сдерживает выбор и обоснование мероприятий по системному мониторингу объектов накопленного экологического вреда. Кроме того, без получения детальной информации о масштабах загрязнений грунтов и химического состава поллютантов в зонах воздействия объектов загрязнения, невозможно принять решения по восстановлению нарушенной геосреды.

**Ключевые слова:** загрязнение геосреды, моделирование, проницаемость грунтов, объекты накопленного экологического вреда, экологический мониторинг

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4(2)-425-434

EDN: TTXUQY

### ВВЕДЕНИЕ

Значительную часть объектов накопленного экологического вреда (ОНЭВ) составляют полигоны, шламонакопители, хвостохранилища, отвалы горных пород и другие типы объектов размещения отходов (ОРО). На всех ОРО необходимо вести экологический мониторинг [1-5, 15].

ОНЭВ представляет собой природно-технические системы (ПТС). Их природным элементом выступает геосреда, загрязненная инфильтратами из отходов. Техногенным элементом – массивы отходов. Необходимость оценки состояния отходов и геосреды, учета взаимосвязей между этими элементами, требует системного подхода к экологическому мониторингу.

Сеть экологического мониторинга должна охватывать и участки размещения отходов, и геосреду в зоне их воздействия [6, 7, 11, 13, 14]. Количество и место выбора наблюдательных пунктов регламентировано нормативными документами (СП 320.1325800.2017 «Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация» (утв. и введено в действие Приказом Минстроя России от 16.03.2022 N 164/пр); СП 127.13330.2017 Полигоны по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов. Основные положения по проектированию и др.).

В общем виде, количество пунктов наблюдения зависит от размеров ОНЭВ, видов и классов опасности отходов, особенностей геосреды, а также местоположения области разгрузки загрязнений с подземными водами. Данные показатели определяются инженерными изысканиями (СП

Чертес Константин Львович, доктор технических наук, профессор кафедры химическая технология и промышленная экология. E-mail: chertes2007@yandex.ru

Сеянко Артём Петрович, аспирант. E-mail: artem-seyanko@mail.ru

Бухман Николай Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры строительная механика и сопротивление материалов. E-mail: smsm@samgtu.ru

Тушицына Ольга Владимировна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химической технологии и промышленной экологии. E-mail: olgatupicyna@yandex.ru

Васильев Андрей Витальевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность и управление качеством», директор научно-исследовательского центра техносферной безопасности и новых материалов. E-mail: vasilyev.av@samgtu.ru

47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 (утв. приказом Минрегиона России от 2012 г.).

Линейные размеры источника накопленного вреда (массива ТКО, шламового тела накопителя, отвала карьера, хвостохранилища) известны. Известны расстояния от границ размещенных отходов до областей разгрузки подземных вод, а также глубины проникновения загрязнений в геосреду в непосредственной близости от ОНЭВ.

Затруднительным представляется оценка загрязнения геосреды в зоне влияния ОНЭВ на участках, значительно удаленных от полигона или шламонакопителя.

Известно, что геосреда, нарушенная многолетним поступлением токсичных соединений, будет выступать в качестве источника вторичного загрязнения экосистем.

Проблему мониторинга геосреды, нарушенной ОНЭВ, предлагается решать с использованием приемов численного гидрогеологического моделирования.

Целью исследования является прогнозирование распространения загрязнений в геосреде от объектов накопленного экологического вреда с использованием методов численного моделирования.

## ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ

Моделирование в настоящей работе представлено на примерах ОНЭВ, сформированных выведенными из эксплуатации шламонакопителями, с дифференцированными особенностями рельефа, расположением по отношению к областям разгрузки загрязненных подземных вод и фильтрационно-реологическим характеристиками среды [12].

По расположению к областям разгрузки можно выделить три типа накопителей[5]:

- террасно-склоновый тип: в любой период паводково-меженного режима подземные воды поступают в водоисточник;

- пойменный: в межень загрязненные воды направлены в сторону водоисточника, а в паводок – от водоисточника к выемке, затапливая её и обводняя шламовое тело;

- водораздельный: в зависимости от расположения к нескольким водоисточникам направление движения потоков и, соответственно, загрязнений, постоянно меняется.

Загрязнения из шламовых тел выносятся потоками подземных вод в вертикальном и горизонтальном направлениях. В большинстве случаев, условно чистые подземные воды выше накопителя по потоку, проходят через шламовые тела и загрязняются.

Шламовое тело, как источник загрязнения, отличается от окружающей его геосреды набором параметров, наиболее важными из которых выступают пористость, коэффициент проницаемости и коэффициент фильтрации.

Изучение параметров и особенностей фильтрации загрязнений в природно-техногенных системах «шламовое тело – породы зоны аэрации – область разгрузки подземных вод», с отличающимися от окружающего ее грунта параметрами, необходимо для конструктивно-технологического оформления мониторинга, а также выбора и назначения направлений ликвидации ОНЭВ.

Например, имея сведения по динамической вязкости инфильтрата, проницаемости вмещающих его пород, а также геометрическим размерам области фильтрации, можно определить расход фильтрующейся жидкости и запроектировать сооружения сбора загрязненных подземных вод в толще геосреды.

Одним из допущений принято наличие в зоне аэрации, которая вмещает шламовое тело и загрязненные породы, регионального водоупора. В этом случае, фильтрация принимается горизонтальной.

В качестве баз данных по гидрогеологическому моделированию были выбраны параметры наиболее типичных шламонакопителей, расположенных в различных геоморфологических условиях, обладающих различными геологическими, гидрогеологическими особенностями геосреды, а также различиями в вязкости шламовых тел и их инфильтраторов.

Сведения по объектам представлены в таблице 1.

Для решения задачи моделирования переноса загрязнений обычно используется хорошо известное уравнение Дарси [9]:

$$Q = -grad(p) + \rho \vec{g} - \frac{\mu}{k} \vec{u}, \quad (1)$$

В этом уравнении:  $Q$  – расход фильтрующейся жидкости;

$p = p(x,y,z)$  – давление в точке  $(x,y,z)$ ;

$\rho$  – плотность фильтрующейся жидкости;

$\vec{g}$  – ускорение свободного падения;

**Таблица 1.** Сведения по фильтрационным и реологическим свойствам шламов и загрязненной геосреды для шламонакопителей – объектов исследования

Наименование объекта	Полигон ТКО г.Самара	Иловые площадки (Самара)	Буферный пруд КНПЗ	Накопитель ЦБК (Карелия)	Шламонакопитель (Чапаевск)	Иловые площадки (Сызрань)	Иловые площадки (Тольятти)	Илонакопитель (Новокуйбышевск)	Иловые площадки (Чапаевск)
Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Входные параметры	$H_{\text{водоуп.}}$ , м	50	25	25	20	25	25	40	25
	$H_{\text{гр.в.}}$ , м	4	3,5	3	2,8	1,5	2	5	2
	$H_{\phi}$ , м	46	32	22	17,2	23,5	23	35	23
	$\text{grad } P$	0,002	0,021	0,008	0,008	0,013	0,133	0,002	0,012
	$K_{\phi}$ , м/с	0,0082	0,00012	0,0000014	0,00029	0,0088	0,0000042	0,0002	0,0000022
	$K_{\text{шл}}$ , $\text{м}^2$	$6,5 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-10}$	$3,4 \times 10^{-11}$	$5,1 \times 10^{-13}$	$9,4 \times 10^{-10}$	$5,7 \times 10^{-12}$	$3,6 \times 10^{-10}$	$4,2 \times 10^{-10}$
	$K_{\text{rc}}$ , $\text{м}^2$	$8,2 \times 10^{-10}$	$1,2 \times 10^{-11}$	$1,4 \times 10^{-13}$	$2,9 \times 10^{-11}$	$8,8 \times 10^{-10}$	$4,2 \times 10^{-13}$	$2 \times 10^{-11}$	$2,2 \times 10^{-13}$
	$C_{\text{sat}}$ , $\text{кг}/\text{м}^3$	10	7	5	44	26	2	3	13
	$\Pi_{\text{пр}}$	7,93	10	242,86	0,02	1,07	13,57	18	1909,09
	$\Gamma$	1,78	1,82	1,99	0,03	1,03	1,86	1,89	2
	$R_{\text{шл}}$ , тыс.м	0,9	1,2	0,5	0,2	0,1	0,3	0,5	0,7
	$R_{\text{оз}}$ , тыс.м	1,6	2,2	1	0	0,1	0,6	0,9	1,4
	$S_{\phi.\text{rc}}$ , тыс. $\text{м}^2$	132,3	125,7	39,4	6,5	2,3	23,1	59,7	57,9
	$\Pi_{\text{З}}$ , м/с	0,0000164	$2,52 \times 10^{-6}$	$1,17 \times 10^{-8}$	$2,32 \times 10^{-6}$	0,0001144	$5,6 \times 10^{-7}$	0,0000004	$2,6 \times 10^{-8}$
Выходные параметры	$V_{\text{poll}}$ , $\text{м}^3/\text{с}$	2,17	0,317	0,0005	0,02	0,26	0,013	0,024	0,001
	$M_{\text{poll}}$ , $\text{кг}/\text{с}$	21,7	2,22	0,0023	0,66	6,84	0,03	0,07	0,02

Примечания:  $H_{\text{водоуп.}}$  – глубина расположения водоупора;  $H_{\text{гр.в.}}$  – отметка поверхности первого водоносного горизонта;  $H_{\phi}$  – толщина фронта фильтрации;  $\text{grad } P$  – градиент напора подземных вод;  $K_{\phi}$  – коэффициент фильтрации (максимальный в выборке);  $K_{\text{шл}}$  – коэффициент проницаемости шлама (максимальный в выборке);  $K_{\text{rc}}$  – коэффициент проницаемости геосреды (максимальный в выборке);  $C_{\text{sat}}$  – концентрация насыщения ключевого загрязнителя (для объектов 1,2,4,5,6,7,9 – ХПК; для объектов 3 и 8 – содержание нефтепродуктов, общее);  $\Pi_{\text{пр}}$  – показатель проницаемости ( $\Pi_{\text{пр}} = K_{\text{шл}} / K_{\text{rc}}$ );  $\Gamma$  – коэффициент расширения (показывает, во сколько раз ширина канала загрязненной воды за зоной загрязнения шире диаметра зоны загрязнения;  $\Gamma = (\Pi_{\text{пр}} \times 2) / (1 + \Pi_{\text{пр}})$ );  $R_{\text{шл}}$  – максимальный радиус шламового тела (определен по данным инженерных изысканий);  $R_{\text{оз}}$  – максимальный радиус ореола загрязнения геосреды (определен по данным инженерных изысканий);  $S_{\phi.\text{rc}}$  – поперечная площадь фильтрации геосреды;  $\Pi_{\text{З}}$  – поток загрязнений ( $\Pi_{\text{З}} = \text{grad } P \times K_{\phi}$ );  $V_{\text{poll}}$  – производительность зоны загрязнений ( $V_{\text{poll}} = \Pi_{\text{З}} \times S_{\phi.\text{rc}} \times 1000$ );  $M_{\text{poll}}$  – масса выносимых загрязнений ( $M_{\text{poll}} = V_{\text{poll}} \times C_{\text{sat}}$ )

$\mu$  – (динамическая) вязкость жидкости;

$k = k(x, y, z)$  – проницаемость (или коэффициент проницаемости) среды (имеет размерность площади, а его величина имеет порядок квадрата характерного размера пор [10]);

$\vec{u} = \vec{u}(x, y, z)$  – скорость фильтрации жидкости.

Решение уравнения (1) в общем виде в случае свободной (безнапорной) фильтрации, когда форма поверхности депрессии заранее неизвестна, затруднительно. Поэтому имеет смысл использовать приближение так называемой гидравлической теории [6], в рамках которой предполагается, что течение жидкости в основном происходит в горизонтальной плоскости (оси  $x$  и  $y$  направлены горизонтально, а ось  $z$  – вертикально вверх), то есть:

$$u_z = -\frac{k}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \right) = 0, \quad (2)$$

отсюда следует:

$$p(x, y, z) = \rho g(h(x, y) - z), \quad (3)$$

где  $h(x, y)$  – расстояние от регионального водоупорного слоя до поверхность депрессии в данной точке  $(x, y)$ .

С учетом (3) из (1) нетрудно получить

$$\vec{u}_\perp = -C \operatorname{grad}_\perp h, \quad (4)$$

где  $h = h(x, y)$ ,  $\vec{u}_\perp = \vec{u}_\perp(x, y)$  – горизонтальная составляющая скорости фильтрации,  $C = \frac{k \rho g}{\mu}$  – коэффициент фильтрации, зависящий (в отличие от коэффициента проницаемости) не только от свойств среды, но и от свойств фильтрующейся жидкости. Задача при этом становится не трехмерной (как (1)), а двумерной, то есть все переменные начинают зависеть только от координат  $(x, y)$ , все векторы становятся горизонтальными, а  $\vec{\operatorname{div}}_\perp = \operatorname{div}$  и  $\vec{\operatorname{rot}}_\perp = \operatorname{rot}$ . Для отыскания поверхности депрессии (а затем – и всех остальных неизвестных функций) обычно используется закон сохранения массы [7]:

$$\operatorname{div}(\vec{U}) = 0, \quad (5)$$

где  $\vec{U} = h \vec{u}_\perp$  – горизонтальный вектор погонного (на единицу длины периметра) расхода жидкости в направлении ее просачивания (единица измерения –  $\text{м}^2/\text{с}$ ). Введя обозначение  $\vec{V} = \vec{U}/C$ , и заметив, что  $\operatorname{rot}(\vec{V}) = \operatorname{rot}\left(\frac{\vec{U}}{C}\right) = \operatorname{rot}\left(\frac{-C \operatorname{grad}_\perp h}{C}\right) = -\frac{1}{2} \operatorname{rot}(\operatorname{grad}(h^2)) = 0$ , нетрудно получить замкнутую систему уравнений:

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\vec{U}) = 0, \\ \operatorname{rot}(\vec{V}) = 0, \\ \vec{U} = C \vec{V}, \end{cases} \quad (6)$$

полностью совпадающую с хорошо известной системой уравнений электростатики:

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\vec{D}) = 0, \\ \operatorname{rot}(\vec{E}) = 0, \\ \vec{D} = \epsilon \vec{E} \end{cases} \quad (7)$$

с точностью до замены  $\vec{D} \rightarrow \vec{U}$ ,  $\vec{E} \rightarrow \vec{V}$ ,  $\epsilon \rightarrow C$ . Совпадают и граничные условия на границе сред с разными свойствами – «электростатическое» условие  $E_{\tau 1} = E_{\tau 2}$  заменяется на условие  $V_{\tau 1} = V_{\tau 2}$  (являющееся следствием второго из уравнений (6)), а условие  $D_{n1} = D_{n2}$  – на условие  $U_{n1} = U_{n2}$  (являющееся следствием первого из уравнений (6) или непосредственно закона сохранения массы).

Это обстоятельство (являющееся одним из следствий хорошо известной аналогии между электростатикой и теорией просачивания) позволяет при решении задач теории просачивания использовать математические результаты, давно известные в электростатике [8].

## ПРОСАЧИВАНИЕ ЧЕРЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ ОБЛАСТЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Рассмотрим фильтрацию жидкости через цилиндрическую в объеме (и круглую на плоскости) область загрязнения радиусом  $R$  (см. случаи А-Е в табл.2).

Пусть  $C_e$  – коэффициент фильтрации окружающего грунта,  $C_i$  – коэффициент фильтрации области загрязнения,  $\vec{U}_0$  – вектор погонного расхода жидкости вдали от зоны загрязнения, направленный вдоль оси  $O_x$  прямоугольной декартовой системы координат (с вертикальной осью  $O_z$  и горизонтальными осями  $O_x$  и  $O_y$ ). Если  $C_e = C_i$ , то с точки зрения фильтрующейся жидкости зона загрязнения ничем не отличается от окружающего грунта, во всем пространстве вектор расхода жидкости совпадает с  $\vec{U}_0$ , линии тока жидкости не искажены. В этом случае (см. случай А табл.2) ширина канала загрязненной жидкости  $d_{\text{poll}}$  совпадает с диаметром зоны загрязнения  $2R$ .

Если же фильтрационные свойства области загрязнения и окружающего грунта отличаются,  $C_e \neq C_i$ , то происходит искажение линий тока и приходится решать задачу (6) в неоднородной среде. Подобная математическая задача (диэлектрический цилиндр в однородном внешнем поле) так же решена в электростатике, как физической области – аналоге гидрогеологии [8], что позволяет нам немедленно выписать ответ.

Оказывается, что в случае цилиндрической геометрии зоны загрязнения вектор погонного расхода жидкости (и скорость фильтрации) во всей области загрязнения одинаков и равен

$$\vec{U}_i = \Gamma \vec{U}_0, \Gamma = \frac{2\kappa}{1+\kappa}, \kappa = \frac{C_i}{C_e} = \frac{k_i}{k_e}, \quad (8)$$

Коэффициент  $0 \leq \kappa < +\infty$  показывает, во сколько раз проницаемость загрязненной зоны выше проницаемости окружающего грунта.

С использованием закона сохранения массы нетрудно проверить, что коэффициент расширения  $0 \leq \Gamma < 2$  показывает, во сколько раз ширина канала загрязненной воды за зоной загрязнения шире диаметра зоны загрязнения,  $\Gamma = d_{poll}/2R$ .

Максимальное значение коэффициента расширения  $\Gamma = 2$  достигается при  $\kappa = \infty$ , когда проницаемость зоны загрязнения существенно выше проницаемости окружающего грунта (см. случай Б табл. 2).

Минимально возможное значение коэффициента расширения  $\Gamma = 0$  достигается при  $\kappa = 0$ , когда проницаемость зоны загрязнения равна 0 и поток жидкости обтекает зону загрязнения (см. случай В табл. 2). Ни сужения, ни расширения потока жидкости не происходит, когда  $\kappa = 1$ , то есть при совпадении коэффициентов проницаемости зоны загрязнения и окружающего грунта (см. случай А табл. 2).

В случае  $\kappa < 1$  (проницаемость зоны загрязнения ниже проницаемости окружающего грунта) коэффициент расширения  $\Gamma < 1$ , то есть ширина потока загрязненной жидкости за зоной загрязнения меньше ширины зоны загрязнения (см. случаи Г, Д табл. 2),

В противном случае  $\kappa > 1$  (проницаемость зоны загрязнения выше проницаемости окружающего грунта) коэффициент расширения  $\Gamma > 1$ , то есть ширина потока загрязненной жидкости за зоной загрязнения больше ширины зоны загрязнения (см. случай Е табл. 2).

Для составляющих вектора расхода жидкости  $\vec{U}_e$  по осям  $O_x, O_y$  вне зоны загрязнения имеем

$$\begin{aligned} U_{ex} &= U_0 \left( 1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2} \right), \\ U_{ey} &= U_0 \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \frac{2xy}{(x^2 + y^2)^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

С использованием (9) нетрудно записать дифференциальное уравнение линии тока:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2xy(\kappa-1)}{(\kappa+1)(x^2 + y^2)^2 - (\kappa-1)(y^2 - x^2)}, \quad (10)$$

результаты численного решения которого (линии тока) также представлены таблице 2 для пяти объектов исследования, представленных в таблице 1.

## ЭВОЛЮЦИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Рассмотрим эволюцию загрязнений во времени. Не следует думать, что узость канала загрязненной жидкости за зоной загрязнения в случае низкой проницаемости зоны загрязнения свидетельствует о низком уровне загрязнения окружающей среды. Обычно ситуация противоположна – если количество жидкости в зоне загрязнения (следовательно, и скорость миграции загрязнителя из загрязненного грунта в грунтовые воды) не зависит от ширины канала загрязненной жидкости и определяется объемом зоны загрязнения, то чем уже канал загрязненной жидкости за зоной загрязнения, тем сильнее загрязнена жидкость в этом канале [12].

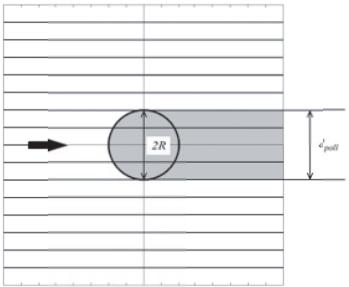
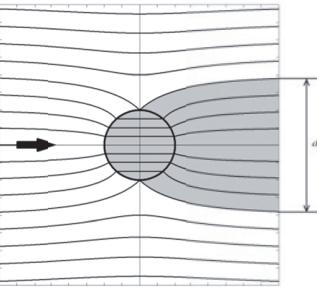
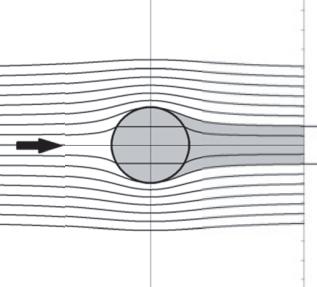
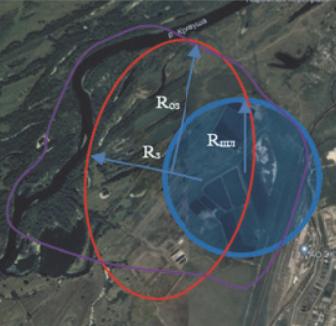
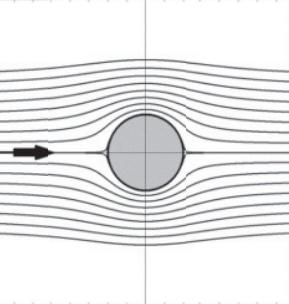
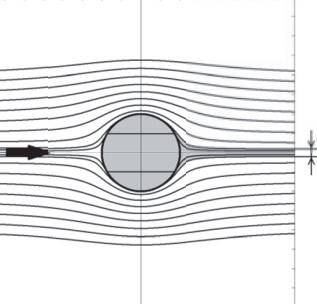
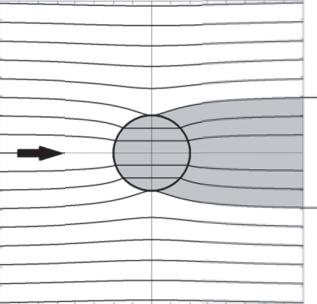
Интенсивность загрязнения можно характеризовать несколькими параметрами. Во-первых, представляет интерес производительность зоны загрязнения  $V_{poll}$ , то есть объем загрязненной жидкости (без учета «качества» загрязнения), продуцируемый в единицу времени зоной загрязнения. Очевидно, с учетом (8)

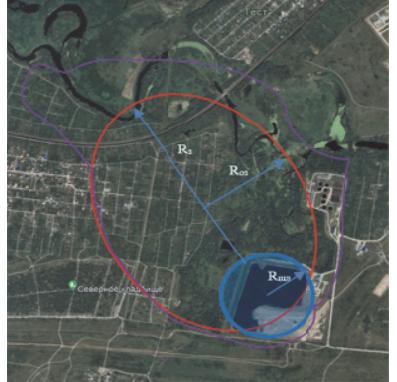
$$V_{poll} = 2R \frac{2\kappa}{1+\kappa} \frac{h_{poll}}{h} U_0, \quad (11)$$

где  $h$  – расстояние от водоупорного слоя до поверхности депрессии (вблизи зоны загрязнения),  $h_{poll}$  – расстояние от нижней точки (дна) цилиндрической области загрязнения до поверхности депрессии.

В уравнении (11) учтено, что загрязнению (по крайней мере в рамках гидравлического приближения) часть жидкости, фильтрующаяся под зоной загрязнения, не подвергается. Нетрудно заметить, что производительность зоны загрязнения максимальна в случае высокой проницаемости за-

**Таблица 2.** Геометрическая интерпретация моделей распространения загрязнений для различных типов шламонакопителей

		
<p>А) Случай <math>K_{шл}=K_{rc}</math>. (Шламонакопитель, Чапаевск, Самарская обл.) Фильтрация жидкости через область загрязнения радиусом <math>R</math>. Диаметр канала загрязнения <math>d_{poll}</math> совпадает с диаметром зоны загрязнения (<math>\Gamma=1</math>).</p>	<p>Б) Случай <math>K_{шл}&gt;&gt;K_{rc}</math>. (Группа шламонакопителей Новокуйбышевской градопромышленной агломерации) Диаметр канала загрязнения <math>d_{poll}</math> совпадает с удвоенным диаметром зоны загрязнения (<math>\Gamma=2</math>).</p>	<p>В) Случай <math>K_{шл}=0,5K_{rc}</math>. (Шламовый фрагмент обводненных, разложившихся отходов Полигона ТКО «Преображенка» г. Самары) Диаметр канала загрязнения <math>d_{poll}</math> равен половине диаметра загрязненной зоны (<math>\Gamma=0,5</math>).</p>
		
<p>Конфигурации прогнозной (результат моделирования) и фактической (по данным изысканий) областей загрязнения геосреды от шламонакопителя г. Чапаевска с основными геометрическими параметрами.</p> <p><math>R_z</math> - 150 м; <math>R_{0z}</math> - 210 м; Площадь <math>S_a</math> - 0,123 км<sup>2</sup>; Площадь <math>S_{\phi}</math> - 0,287 км<sup>2</sup>. Сходимость <math>(S_a/S_{\phi} \times 100)</math> = 42,86 %</p>	<p>Конфигурации прогнозной (результат моделирования) и фактической (по данным изысканий) областей загрязнения геосреды от шламонакопителей Новокуйбышевской градопромышленной агломерации с основными геометрическими параметрами.</p> <p><math>R_z</math> - 650 м; <math>R_{0z}</math> - 1300 м; Площадь <math>S_a</math> - 3,591 км<sup>2</sup>; Площадь <math>S_{\phi}</math> - 6,82 км<sup>2</sup>. Сходимость <math>(S_a/S_{\phi} \times 100)</math> = 52,65 %</p>	<p>Конфигурации прогнозной (результат моделирования) и фактической (по данным изысканий) областей загрязнения геосреды шламовым фрагментом обводненных, разложившихся отходов Полигона ТКО «Преображенка» г. Самары.</p> <p><math>R_z</math> - 1200 м; <math>R_{0z}</math> - 160 м; Площадь <math>S_a</math> - 0,507 км<sup>2</sup>; Площадь <math>S_{\phi}</math> - 0,764 км<sup>2</sup>. Сходимость <math>(S_a/S_{\phi} \times 100)</math> = 66,36 %</p>
		

<p>Г) Случай <math>K_{шл} &lt; K_{rc}</math>, (Накопитель шламов Сегежского ЦБК). Диаметр канала загрязнения <math>d_{poll}</math> равен нулю. Единственная линия тока, пересекающая область загрязнения – осевая. Вся загрязненная жидкость сосредоточена в области загрязнения (<math>\Gamma=0</math>)</p>	<p>Д) Случай <math>K_{шл}=K_{rc}/20</math>. Проницаемость зоны загрязнения существенно меньше проницаемости окружающего грунта. Диаметр канала загрязнения <math>d_{poll}</math> равен <math>2/21</math> диаметра загрязненной зоны (<math>\Gamma=2/21</math>).</p>	<p>Е) Случай <math>K_{шл}=3 K_{rc}</math>, (Накопители спиртовой барды, с. Рождествено, Самарская обл.). Диаметр канала загрязнения <math>d_{poll}</math> равен <math>1,5</math> диаметра загрязненной зоны (<math>\Gamma=3/2</math>)</p>
 <p>Конфигурации прогнозной (результат моделирования) и фактической (по данным изысканий) областей загрязнения геосреды от Иловые площадки КОС г. Чапаевска с основными геометрическими параметрами.  <math>R_3</math> - 1100 м; <math>R_{os}</math> - 400 м.  Площадь <math>S_a</math> - 0,885 км<sup>2</sup>; Площадь <math>S_{\phi}</math> 1,145 - км<sup>2</sup>.  Сходимость <math>(S_a/S_{\phi} \times 100)</math> = 77,29 %</p>	 <p>Конфигурации прогнозной (результат моделирования) и фактической (по данным изысканий) областей загрязнения геосреды от буферного пруда АО «Куйбышевский НПЗ» с основными геометрическими параметрами.  <math>R_3</math> - 1100 м; <math>R_{os}</math> – 320 м;  Площадь <math>S_a</math> – 1,225 км<sup>2</sup>; Площадь <math>S_{\phi}</math> 1,712 - км<sup>2</sup>. Сходимость <math>(S_a/S_{\phi} \times 100)</math> = 71,55 %</p>	

Примечание: Направление фильтрации жидкости показано стрелкой, линии тока – сплошными линиями, загрязненная жидкость показана серым цветом.

$S_a$  – площадь прогнозируемой области загрязнения геосреды, км<sup>2</sup>,  $S_{\phi}$  – площадь фактической области загрязнения после проведения изысканий, км<sup>2</sup>

грязненного грунта (при  $k>>1$  имеем  $V_{poll} = V_{pollmax} = 4R \frac{h_{poll}}{h} U_0$ ) и снижается до нуля в случае низкой проницаемости загрязненного грунта.

Второй важный параметр – интенсивность выноса загрязнителя  $M_{poll}$ , то есть количество загрязнителя, вымываемого (в единицу времени) грунтовыми водами из области загрязнения. Величина этого параметра, очевидно, зависит от деталей обмена загрязнителем между загрязненным грунтом и грунтовыми водами. С этой точки зрения можно выделить два предельных случая – случай насыщения, при котором прошедшая через зону загрязнения вода насыщается загрязнителем и случай слабого загрязнения, когда концентрация загрязнителя в прошедшей через зону загрязнения воде мала в сравнении с насыщенной. Разумеется, для разных загрязнителей из одной и той же зоны загрязнения могут реализоваться разные случаи (в том числе и промежуточный случай, когда концентрация загрязнителя в воде сравнима с насыщенной).

В «случае насыщения» концентрация загрязнителя  $\omega$  во всех порциях воды, прошедшей через загрязнитель, одинакова и равна  $\omega_{sat}$ , поэтому

$$M_{poll} = V_{poll} \rho \omega_{sat}, \quad (12)$$

где  $\omega_{sat}$  – концентрация (массовая доля) насыщенного раствора загрязнителя в воде.

В этом случае интенсивность выноса загрязнителя пропорциональна производительности зоны загрязнения.

В «случае слабого загрязнения» концентрация загрязнителя, очевидно, пропорциональна времени взаимодействия воды с загрязнителем (или, что тоже самое, пройденному в загрязнителе пути) и потому различна в разных точках потока загрязненной жидкости:

$$\omega(y) = \begin{cases} \omega_{\max} \sqrt{1 - (2y/d_{poll})^2}, & y \leq d_{poll}/2 \\ 0, & y > d_{poll}/2, \end{cases} \quad (13)$$

где  $\omega_{\max}$  – максимальная концентрация загрязнителя, достигающаяся на оси потока.

Нетрудно проверить, что в этом случае средняя концентрация загрязнителя связана с максимальной соотношением:

$$\omega_{av} = (\pi/4)\omega_{\max}. \quad (14)$$

В результате для интенсивности выноса загрязнителя с учетом (11) имеем

$$M_{poll} = R \frac{2\kappa}{1+\kappa} \frac{h_{poll}}{h} U_0 \rho (\pi/2) \omega_{\max}, \quad (15)$$

Для отыскания  $\omega_{\max}$  можно использовать  $M_{poll}$  не с точки зрения просачивающейся жидкости, а с точки зрения зоны загрязнения. Очевидно, что с точки зрения зоны загрязнения скорость уменьшения загрязнения в предположении слабой загрязненности просачивающейся воды прямо пропорциональна площади поверхности контакта, то есть

$$M_{poll} = AS, \quad (16)$$

где  $S$  – площадь поверхности контакта загрязненного вещества и воды в пределах зоны загрязнения,  $A$  – некоторый коэффициент, зависящий от химических свойств загрязнения, который может быть определен экспериментально в модельных опытах.

Для использования соотношения (16) необходимо связать площадь контакта  $S$  с наблюдаемыми характеристиками среды. Вспомнив, что в принципе по порядку величины коэффициент проницаемости среды совпадает с квадратом характерного размера пор, то есть  $k_i \cong d^2$ , имеем  $d \cong k_i^{1/2}$ , в предположении сферичности пор имеем для суммарной поровой поверхности грунта в области загрязнения  $S \cong 6m_i k_i^{-1/2} \pi R^2 h_{poll}$ , где  $m_i$  – пористость грунта в зоне загрязнения. Отсюда

$$M_{poll} \cong 6Am_i k_i^{-1/2} \pi R^2 h_{poll}, \quad (17)$$

Сравнив (15) и (17), имеем для максимальной концентрации загрязнителя в просачившейся воде (в случае слабого загрязнения)

$$\omega_{\max} \cong 6Am_i k_i^{-1/2} R \frac{\kappa+1}{\kappa} \rho^{-1} u_0^{-1}, \quad (18)$$

где  $u_0 = U_0/h$  – скорость фильтрации жидкости вдали от зоны загрязнения.

Оценка (18) позволяет точнее сформулировать условие слабого загрязнения воды при фильтрации через зону загрязнения  $\omega_{\max} < \omega_{sat}$

$$6Am_i k_i^{-1/2} R \frac{\kappa+1}{\kappa} \rho^{-1} u_0^{-1} \ll \omega_{sat}, \quad (19)$$

или противоположное ему условие сильного загрязнения

$$6Am_i k_i^{-1/2} R \frac{\kappa+1}{\kappa} \rho^{-1} u_0^{-1} > \omega_{sat}, \quad (20)$$

Можно сделать вывод, что сильному загрязнению воды при фильтрации благоприятствует не только низкая проницаемость загрязненного грунта и низкая скорость фильтрации воды в окрестностях зоны загрязнения, но и большие поперечные размеры зоны загрязнения. Низкая пористость загрязненного грунта, напротив, способствует слабому загрязнению просачившейся воды.

Оценки (12) (в случае сильного загрязнения просачивающейся воды) или (17) (в случае слабого загрязнения) позволяют поставить вопрос о «времени жизни» зоны загрязнения, разного по отношению к тем или иным загрязнителям, то есть о времени, в течение которого сконцентрированный в зоне загрязнения загрязнитель уйдет из зоны загрязнения в область разгрузки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом проведенного исследования является вывод о том, что в зависимости от соотношения проницаемостей грунта в зоне загрязнения и на окружающей территории может возникать совершенно различная геометрия канала загрязненных грунтовых вод за зоной загрязнения и, соответственно, возникать геометрически различные зоны вторичного загрязнения с различной ин-

тенсивностью продуцирования загрязненных грунтовых вод, различной степенью их загрязнения и различной интенсивностью выноса загрязнений из загрязненной зоны.

В данной работе рассмотрение было ограничено случаем цилиндрической геометрии зоны загрязнения, но можно предположить, что основные результаты данного рассмотрения качественно отражают ситуацию и в более общем случае. Так, например, в случае, когда проницаемость загрязненного грунта существенно ниже проницаемости чистого грунта, за зоной загрязнения формируется не широкий канал слабо загрязненной жидкости, а узкий канал сильно загрязненной жидкости, причем в трехмерной геометрии этот канал может быть существенно локализован не только по горизонтали, но и по вертикали, то есть проходить на фиксированной глубине под уровнем депрессии и практически представлять собой естественно образующуюся «сточную трубу», никак не проявляющуюся на поверхности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ашихмина, Т.Я. Комплексный экологический мониторинг регионов / Т.Я. Ашихмина, В.М. Сюткин.* – Киров: Изд-во ВятГГУ, 1997. – 286 с.
2. *Васильев, А.В. Анализ и оценка загрязнения биосферы при воздействии нефтесодержащих отходов: Монография / А.В. Васильев.* – Самара: Издательство СамНЦ РАН, 2022. – 106 с.
3. *Васильев, А.В. Анализ источников загрязнения биосферы нефтепродуктами и особенности оценки их экологического воздействия / А.В. Васильев // Научный журнал «Академический вестник ЭЛПИТ».* – Тольятти: изд-во «ELPIT» ООО «ИХИИЭ». – 2022. – Т. 7. – № 2(20). – С.15-20.
4. *Васильев, А.В. Особенности оценки рисков негативного воздействия на биосферу отходов, возникающих при разработке нефтегазовых месторождений / А.В. Васильев // Научный журнал «Академический вестник ЭЛПИТ».* – Тольятти: изд-во «ELPIT» ООО «ИХИИЭ», 2022. – Т. 7. – № 3(21). – С.12-20.
5. *Васильев, А.В. Особенности мониторинга негативного воздействия нефтесодержащих отходов на биосферу / А.В. Васильев // Известия Самарского научного центра РАН.* – 2022. – Т. 24. – № 2. – С. 113-120.
6. *Васильев, А.В. Анализ особенностей и практические результаты экологического мониторинга загрязнения почвы нефтесодержащими отходами / А.В. Васильев, Д.Е. Быков, А.А. Пименов // Известия Самарского научного центра РАН.* – 2014. – Т. 16. – №1(6). – С.1705-1708.
7. *Жаров, О.А. Современные методы переработки нефтешламов / О.А. Жаров, В.Л. Лавров // Экология производства.* – 2004. – №5. – С. 43-51.
8. *Ландау, Л.Д. Электродинамика сплошных сред. Издание 4-е, стереотипное / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц.* – М.: Физматлит, 2005. – 656 с. («Теоретическая физика», том VIII).
9. *Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации / Н.Е. Леонтьев.* – М.: Изд-во ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ, 2009. – 88 с.
10. *Маскет, М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. Пер. с англ. / М. Маскет.* – М. - Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. – 640 с
11. *Солнцева, Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов / Н.П. Солнцева.* – М.: МГУ, 1998. – 346 с.
12. *Чертес, К.Л. Прогнозирование и ликвидация загрязнений в экосистемах, сформированных выведенными из эксплуатации шламонакопителями / К.Л. Чертес, А.А. Букин, Н.С. Бухман, В.Н. Пыстин, А.П. Сеянко, О.В. Тупицына // Вестник МГСУ.* – 2023. – Т. 18. – № 7. – С. 1089-1103.
13. *Шешнев, А.В. Загрязнение нефтепродуктами вод волгоградского водохранилища и почв в районе ликвидированного цементного завода (г. Вольск Саратовской области) / А.В. Шешнев // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология.* – 2016. – № 5. – С. 420-426.
14. *Vasilyev A.V. Experience, Results and Problems of Ecological Monitoring of Oil Containing Waste. Proceedings of the 2018 IEEE International Conference “Management of Municipal Waste as an Important Factor of Sustainable Urban Development” (WASTE’2018), October, 4-6, 2018, Saint-Petersburg; edition of Saint-Petersburg State Electrical Technical University “LETI”, 2018, pp. 82-85.*
15. *Vasilyev A.V. Classification and reduction of negative impact of waste of oil-gas industry. Proc. of the International Scientific Conference (XIV International Forum) World Heritage and Degradation. Smart Design, Planning and Technologies “Le vie dei Mercanti”, June 16<sup>th</sup> – 18<sup>th</sup> 2016, Naples-Capri, Italy. – Fabbrica della Conoscenza series, Edition of La scuola di Pitagora, Naples, Italy. - pp.101-107.*

## MODELING OF POLLUTANT SPREADING AS A TOOL FOR PREDICTIVE MONITORING OF OBJECTS OF ACCUMULATED ECOLOGICAL DAMAGE

© 2025 K.L. Chertes, A.P. Seyanko, N.S. Buhman, O.V. Tupitsyna, A.V. Vasilyev

Samara State Technical University, Samara, Russia

This article presents the results of constructing a predicted pollution domain based on numerical hydrogeological modeling. An analysis of existing classifications of accumulated environmental damage objects is conducted. The resulting geology environment pollution models are based on a combination of the laws of fluid filtration theory through "ideal" porous media and the principles of mass transfer of viscous pollutant flows in fragments of their real-world counterparts: sand, clay, and other geology environment elements with non-uniform resistance. The geology environment disturbed by the long-term influx of toxic compounds acts as a source of secondary pollution of ecosystems. Infiltrates accumulated in the vadose zone rocks are subject to water logging and interact with soil matter, forming new compounds. Periodically, due to micro-movements of the earth's crust, mechanically bound compounds ("trapped" by soil pores and capillaries) become free and continue to be carried into water sources even after the waste mass is eliminated. The lack of a forecast for geology environment pollution, including its accumulation in individual rock fragments and the dynamics of pollutant transport with groundwater, hinders the selection and justification of measures for systematic monitoring of sites of accumulated environmental damage. Furthermore, without detailed information on the scale of soil pollution and the chemical composition of pollutants in the impact zones of polluted sites, it is impossible to make decisions on restoring the damaged geology environment.

**Keywords:** geology environment, pollution, modeling, soil permeability, sites of accumulated environmental damage, environmental monitoring

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4(2)-425-434

EDN: TTXUQY

## REFERENCES

1. *Ashihmina, T.Ya. Kompleksnyj ekologicheskij monitoring regionov / T.Ya. Ashihmina, V.M. Syutkin.* – Kirov: Izd-vo VyatGGU, 1997. – 286 s.
2. *Vasil'ev, A.V. Analiz i ocenka zagryazneniya biosfery pri vozdejstvii neftesoderzhashchih othodov: Monografiya / A.V. Vasil'ev.* – Samara: Izdatel'stvo SamNC RAN, 2022. – 106 s.
3. *Vasil'ev, A.V. Analiz istochnikov zagryazneniya biosfery nefteproduktami i osobennosti ocenki ih ekologicheskogo vozdejstviya / A.V. Vasil'ev // Nauchnyj zhurnal «Akademicheskij vestnik ELPIT».* – Tol'yatti: izd-vo «ELPIT» OOO «IHiIE». – 2022. – T. 7. – № 2(20). – S.15-20.
4. *Vasil'ev, A.V. Osobennosti ocenki riskov negativnogo vozdejstviya na biosferu othodov, voznikayushchih pri razrabotke neftegazovyh mestorozhdenij / A.V. Vasil'ev // Nauchnyj zhurnal «Akademicheskij vestnik ELPIT».* – Tol'yatti: izd-vo «ELPIT» OOO «IHiIE», 2022. – T. 7. – № 3(21). – S.12-20.
5. *Vasil'ev, A.V. Osobennosti monitoringa negativnogo vozdejstviya neftesoderzhashchih othodov na biosferu / A.V. Vasil'ev // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN.* – 2022. – T. 24. – № 2. – S. 113-120.
6. *Vasil'ev, A.V. Analiz osobennostej i prakticheskie rezul'taty ekologicheskogo monitoringa zagryazneniya pochvy neftesoderzhashchimi othodami / A.V. Vasil'ev, D.E. Bykov, A.A. Pimenov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN.* – 2014. – T. 16. – № 1(6). – S.1705-1708.
7. *Zharov, O.A. Sovremennye metody pererabotki nefteshlamov / O.A. Zharov, V.L. Lavrov // Ekologiya proizvodstva.* – 2004. – №5. – S. 43-51.
8. *Landau, L.D. Elektrodinamika sploshnyh sred. Izdanie 4-e, stereotipnoe / L. D. Landau, E. M. Lifshic.* – M.: Fizmatlit, 2005. – 656 s. («Teoreticheskaya fizika», tom VIII).
9. *Leont'ev N.E. Osnovy teorii fil'tracii / N.E. Leont'ev.* – M.: Izd-vo CPI pri mekhaniko-matematicheskem fakultete MGU, 2009. – 88 s.
10. *Masket, M. Techenie odnorodnyh zhidkostej v poristoj srede. Per. s angl. / M. Masket.* – M. - Izhevsk: Institut kom'yuuternykh issledovanij, 2006. – 640 s
11. *Solnceva, N.P. Dobycha nefti i geohimiya prirodnnyh landshaftov / N.P. Solnceva.* – M.: MGU, 1998. – 346 s.
12. *Chertes, K.L. Prognozirovaniye likvidaciya zagryaznenij v ekosistemah, sformirovannyh vyvedennymi iz ekspluatacii shlamonakopitelyami / K.L. Chertes, A.A. Buhman, N.S. Buhman, V.N. Pystin, A.P. Seyanko, O.V. Tupicyna // Vestnik MGSU.* – T. 18. – № 7. – S. 1089-1103.
13. *Sheshnev, A.V. Zagryaznenie nefteproduktami vod volgogradskogo vodohranilishcha i pochv v rajone likvidirovannogo cementnogo zavoda (g. Volsk Saratovskoj oblasti) / A.V. Sheshnev // Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya.* – 2016. – № 5. – S. 420-426.
14. *Vasilyev A.V. Experience, Results and Problems of Ecological Monitoring of Oil Containing Waste. Proceedings of the 2018 IEEE International Conference «Management of Municipal Waste as an Important Factor of Sustainable Urban Development» (WASTE>2018), October, 4-6, 2018, Saint-Petersburg; edition of Saint-Petersburg State Electrical Technical University "LETI", 2018, pp. 82-85.*
15. *Vasilyev A.V. Classification and reduction of negative impact of waste of oil-gas industry. Proc. of the International Scientific Conference (XIV International Forum) World Heritage and Degradation. Smart Design, Planning and Technologies «Le vie dei Mercanti», June16th – 18th 2016, Naples-Capri, Italy. – Fabbrica della Conoscenza series, Edition of La scuola di Pitagora, Naples, Italy. - pp.101-107.*

Konstantin Chertes, Doctor of Engineering Sciences, Professor Department of Chemical Technology and Industrial Ecology.  
E-mail: chertes2007@yandex.ru

Artem Seyanko, Graduate Student. E-mail: artem-seyanko@mail.ru

Nikolay Buhman, Doctor of Physics and Mathematics, Professor of the Department of Structural Mechanics and Resistance of Materials. E-mail: smsm@samgtu.ru

Olga Tupitsyna, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Chemical Technology and Industrial Ecology. Email: olgatupicyna@yandex.ru

Andrey Vasilyev, Doctor of Technical Sciences, professor, Head of Department of Technosphere Safety and Quality Management, Director of Research and Development Center of Technosphere Safety and New Materials.  
E-mail: vasilyev.av@samgtu.ru