

УДК.504.5:621.6.033

## ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ В РАЙОНЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА

канд. техн. наук, доц. В.Е. САВЕНОК; Н.А. КОВАЛЕВСКАЯ  
(Витебский государственный университет им. П.М. Машерова)

Анализируются методики оценки загрязнения почв, а также прогнозный расчет возможного нефтяного загрязнения почв в районе строящегося промышленного объекта. В качестве объекта исследования рассматривается прибрежная зона строительства Витебской гидроэлектростанции на реке Западная Двина. Представлена математическая модель трансформации загрязненных участков, которая использовалась для проведения исследований возможного загрязнения почв нефтепродуктами в рассматриваемом районе. Показана актуальность оценки загрязнения почв нефтепродуктами – важной составляющей комплексной оценки экологического состояния почв. Результаты прогностических расчетов могут быть использованы как для оценки масштабов загрязнения нефтепродуктами непосредственно почвенного покрова районов водосбора с учетом рельефа местности, так и при оценке масштабов возможного загрязнения водотоков, протекающих по этим районам.

**Введение.** Побочным эффектом роста современного уровня развития промышленного производства является всевозрастающая техногенная нагрузка на окружающую среду. Большие масштабы принимает загрязнение территорий вокруг развитых промышленных комплексов, что оказывает негативное влияние на состояние почв этих территорий. Спектр химического загрязнения почв в результате техногенного воздействия очень широк. Одними из наиболее распространенных загрязнителей являются нефть и нефтепродукты. При попадании в почву нефтепродукты аккумулируются, что приводит к изменениям в химическом составе, свойствах и структуре почв. Загрязнение углеводородами нефти приводит к резкому нарушению в почвенном микробиоценозе, подавляется фотосинтетическая активность растительных организмов, а также при длительном воздействии на почвенную биоту возникает массовая гибель животных. Из-за отсутствия надежных методик имеет место необходимость в создании адекватной оценки и дальнейшем прогнозе последствий воздействия нефтепродуктов на почву [1].

Целью данной работы является анализ методик оценки загрязнения почв, а также прогнозный расчет возможного нефтяного загрязнения почв в районе строящегося промышленного объекта. В качестве района исследования нами рассматривалась прибрежная зона строительства Витебской мини-ГЭС на реке Западная Двина.

Оценка воздействия нефтепродуктов на состояние почв может осуществляться по двум направлениям: исследование физико-химических и биологических показателей. В качестве главного показателя загрязнения почв выступает концентрация нефтепродуктов в грунте. Для расчета данного показателя необходимо знать нефтеёмкость грунта, которая определяется с помощью инструментального метода или экспериментальным путем с использованием данных о влажности грунта:

$$\alpha = \frac{M_{\text{вг}}}{M_{\text{г}}} \cdot 10^3, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – концентрация нефти в грунте, г/кг;  $M_{\text{вг}}$  – нефтенасыщенность грунта (количество нефти, впитавшейся в грунт), т;  $M_{\text{г}}$  – количество нефтезагрязнённого грунта, т.

Нефтенасыщенность грунта может быть рассчитана по формуле

$$M_{\text{вг}} = K_{\text{н}} \rho_{\text{н}} F_3 h_c, \quad (2)$$

где  $K_{\text{н}}$  – нефтеёмкость грунта (определяется инструментальным или экспертным путем в зависимости от влажности грунта);  $\rho_{\text{н}}$  – плотность нефти, т/м<sup>3</sup>;  $F_3$  – площадь разлива, м<sup>2</sup>;  $h_c$  – средняя глубина пропитки грунта нефтью, м.

Количество нефтезагрязнённого грунта определяется как

$$M_z = \rho_z F_3 h_c, \quad (3)$$

где  $\rho_z$  – плотность нефтезагрязнённого грунта, т/м<sup>3</sup>.

При масштабных разливах нефти может быть рассчитано количество низкомолекулярных углеводородов, испарившихся с поверхности земли. Но для данного показателя необходимо знать удельную величину выбросов углеводородов в атмосферу с поверхности нефти, разлившейся по земле. Количество

низкомолекулярных углеводородов  $M_{из}$ , испарившихся с поверхности нефти, разлившейся по поверхности земли, определяется по формуле

$$M_{из} = q_3 \cdot F_3 \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

где  $q_3$  – удельная величина выбросов углеводородов в атмосферу с поверхности нефти, разлившейся по земле, кг/м<sup>2</sup>.

Удельная величина выбросов углеводородов определяется по табличным данным в зависимости от толщины слоя свободной нефти на поверхности земли (м), продолжительности процесса испарения свободной нефти с поверхности земли (ч), средней температуры поверхности испарения при испарении нефти с поверхности земли (°C).

Необходимо обратить внимание на то, что при определении нефтепродуктов в почве обязательно учитывается содержание органических соединений самой почвы, так как существуют методы определения накопления нефтепродуктов по содержанию органического углерода. Изначально вычисляют суммарную долю углерода, входящего в состав нефти. А затем вводят поправочный коэффициент накопления нефтепродуктов в почве для сравнительной характеристики загрязненных районов. Данная методика базируется на знании данных о качественном составе нефти.

Нефтезагрязненные почвы теряют способность впитывать и удерживать влагу, для них характерны более низкая гигроскопическая влажность, водопроницаемость, влагоемкость и влагоемкость по сравнению с незагрязненными участками. При загрязнении почв нефтью увеличивается дисперсность почв, уменьшается структурность и степень агрегатности, снижается коэффициент фильтрации воды. В процессе проникновения углеводородов нефти в грунт наблюдается фильтрация несмешивающихся фаз. Так, с помощью математических моделей исследуются характеристики порового пространства, однако данная модель применима только для верхних однородных слоев почвы. Для ее построения необходимо учитывать вязкость и плотность углеводородов, а также пористость и проницаемость грунта. Основными уравнениями, описывающими движение жидкости в пористой среде, являются уравнение неразрывности и закон фильтрации Дарси. Закон Дарси используется в обобщенном виде для описания многофазного течения. На основании данной модели мы сможем установить степень загрязнения почвенной среды, а также скорость образования загрязненной территории. Закон сохранения массы в пористой среде или уравнение неразрывности в декартовой системе координат для однородной жидкости в недеформированном грунте имеет вид:

$$m \frac{\partial s}{\partial t} + \left[ \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} \right] = 0, \quad (5)$$

где  $s$  – насыщенность пористой среды;  $m$  – пористость материала;  $\rho$  – плотность;  $u$  ( $u_x, u_y, u_z$ ) – вектор скорости фильтрации;  $u_x, u_y, u_z$  – компоненты вектора фильтрации;  $x, y, z$  – координаты;  $t$  – время.

Обобщение закона фильтрации (закон Дарси) для трехмерного течения:

$$\vec{u} = -k \frac{k(s)}{\mu} (\nabla_p - \rho \vec{g}), \quad (6)$$

где  $k$  – проницаемость пористой среды;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность;  $k(s)$  – относительная проницаемость;  $g$  – вектор ускорения свободного падения.

Для описания многофазного течения используются законы Дарси в обобщенном виде:

$$\vec{u}_l = -k \frac{k_l(s)}{\mu_l} (\nabla_{p_l} - \rho_l \vec{g}), \quad (7)$$

где  $k$  – проницаемость пористой среды;  $\mu_l$  – динамическая вязкость  $l$ -й фазы;  $p_l$  – давление  $l$ -й фазы;  $\rho_l$  – плотность  $l$ -й фазы;  $k_l(s)$  – относительная фазовая проницаемость  $l$ -й фазы;  $g$  – вектор ускорения свободного падения.

Глубина проникновения нефти в грунт определяется в зависимости от физико-механических свойств грунта и физико-химических характеристик взаимодействия жидкости с частицами грунта. Процесс фильтрации нефти и нефтепродуктов будет зависеть от нахождения воды в различном состоянии и от свойств дисперсных частиц в грунте. Нефть будет адсорбироваться почвенной влагой, а взаимодействие загрязнителя с поровой водой будет определяться поверхностным натяжением воды. Дисперсные же частицы почвы будут двигаться к границе раздела двух сред, что приведет к снижению вязкости нефти. Фильтрацию нефти и нефтепродуктов в почве необходимо рассматривать как послойное движение, в данном случае движущей силой будут выступать поверхностные явления между нефтью и водой. Глубина проникновения углеводородов нефти может быть определена экспериментальным путем в лаборатор-

ных условиях на моделях грунта. Грунт в связанном состоянии имеет дисперсные частицы, следовательно, вода в данном случае будет участвовать в транспортировке нефти.

Рассмотрение грунта в виде связанной среды с однородной пористостью позволит получить формулу для определения количества воды, выступающей в роли транспорта нефти и нефтепродуктов:

$$q = 10^{-2} \frac{\rho_w}{\rho_r} m[\varphi_0 - \varphi - W_m], \quad (8)$$

где  $q$  – удельное количество воды в порах грунта, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\rho_w$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_r$  – плотность грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  – пористость грунта, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\varphi_0$  – относительная влажность грунта, %;  $\varphi$  – массовое процентное содержание частиц в поровом пространстве размером менее 0,1 мм, %;  $W_m$  – максимальная молекулярная влагоёмкость дисперсных частиц размером менее 0,1 мм, %.

При биодиагностике почв устанавливаются показатели, связанные с биологической активностью почв. Определяют изменение численности и видового разнообразия почвенной мезо- и микрофауны, а также микрофлоры. При этом типы ответных реакций различных групп неодинаковы. В почвах, загрязненных углеводородами нефтепродуктов, появляется дополнительный пищевой субстрат, который будет оказывать определенное воздействие на микробную биомассу, а следовательно, будет наблюдаться изменение активности микроорганизмов и изменение дыхательной активности почв. Так происходит увеличение численности следующих групп микроорганизмов: денитрифицирующих, азотфиксирующих, аммонифицирующих, сульфатредуцирующих бактерий, а также дрожжей и микромицетов. В свою очередь, численность нитрифицирующих бактерий, целлюлозоразрушающих микроорганизмов и актиномицетов снижается. В ходе модельных экспериментов может быть установлена общая численность колониеобразующих единиц (КОЕ) основных групп микроорганизмов. На основании данных КОЕ чистых почв и загрязненных проводится сравнение показателей для выявления степени и характера действия нефтепродуктов. На загрязненных почвах проводятся исследования активности определенных групп ферментов. Активность почвенной уреазы и каталазы зависит от гранулометрического состава почвы.

Так, почвы тяжелого гранулометрического состава имеют высокую активность уреазы и каталазы. Для определения целлюлозолитической активности пользуются аппликационным методом в чашках Петри путем учета остаточного количества нерасщепленной целлюлозы. Выявляют изменение кинетики ферментативных реакций природно-технической системы, возникшей при загрязнении почвы нефтью. Оценку фитотоксичности почв проводят по проросткам и тест-растениям. Изучают длину корней растений, которая позволит выявить токсическое или ингибирующее действие нефти и нефтепродуктов. Выявляют всхожесть, выживаемость и вес сухой биомассы выращенных культур. Представленный набор биологических показателей дает информативную картину протекающих в почве биологических процессов и ее экологического состояния. Критерием степени нарушения экологических функций почвы может служить интегральный показатель биологического состояния почв. Для расчета интегрального показателя берутся контрольные образцы, и каждый из перечисленных биологических показателей принимается за 100 %. Далее выражаются в процентах относительно контроля остальные показатели опыта и проводится сравнение.

При разработке критериев оценки загрязнения почв нефтепродуктами можно применить и балльную систему оценок. Данная система основывается на том, что каждый фактор (показатель), независимо от единиц измерения, оценивается в баллах. Взяв один фактор, мы оцениваем его величину по выбранному способу. Далее суммируем полученные баллы по разным альтернативам и сравниваем между собой по общей сумме набранных баллов. Данная система ясно позволяет интерпретировать полученные результаты: чем хуже условия, тем выше балл. Однако здесь имеет место большой недостаток – не учитывается вклад каждого фактора в конечный результат.

Территория строительства Витебской мини-ГЭС располагается в районе городского поселка Лужесно и населенного пункта Букатино по правому берегу реки Западной Двины, по левому – в районе населенных пунктов Биберевка и Подберезье. Недалеко от строящегося объекта находится карьер «Тяково-Койтово» и действующий карьер «Гралёво».

Рельеф территории Витебского района формировался на протяжении длительного периода времени под совокупным воздействием различных геологических процессов, важнейшим из которых была деятельность покровных оледенений. Современная поверхность представлена чередованием обширных холмистых возвышенностей и плоских, расчлененных долинами рек низинами. Поверхность в целом имеет котловинообразную форму, причем приподнятые края созданы ледниковыми возвышенностями и грядами. О ее озерно-ледниковом происхождении свидетельствуют плосковогнутая форма и распространение ленточных глин. Рельеф Витебской возвышенности холмисто-моренный денудированный. Рельеф территории оказывает существенное влияние на процессы почвообразования. Кроме озерных отложений, широко представлены водно-ледниковые наносы (гравий, пески, иногда супеси). В отдельных местах

сквозь них проступает морена, которая образует скопление холмов. Наиболее заболочена центральная часть низины, высланная озерными осадками.

В соответствии с почвенно-географическим районированием данная территория относится к Витебско-Лиезненскому району северной провинции дерново-подзолистых пылевато-суглинистых и супесчаных почв. Преобладающими являются дерново-подзолистые сильно- и среднеподзоленные почвы, развивающиеся на легких водно-ледниковых слабозавалуненных суглинках, реже – лессах, подстилаемых моренными суглинками [2]. Под влиянием наиболее типичных для данного региона подзолистого, дернового и болотного процессов почвообразования формируются основные типы почв: дерново-подзолистые, дерново-подзолистые заболочиваемые, торфяно-болотные, пойменные дерновые и др. Более 50 % почв рассматриваемого региона переувлажнены, поэтому в этом регионе преобладают минеральные заболоченные почвы. Они формируются на породах тяжелого механического состава, чаще всего на донно-моренных и озерно-ледниковых глинах [3].

Нами проведена оценка площади возможного загрязнения почв нефтепродуктами на четырех участках водосбора в районе строительства мини-ГЭС на реке Западная Двина. Рассматривались по два участка, непосредственно прилегающие к месту строительства с каждой стороны реки. Вся территория строительства может быть ограничена по периметру крайними точками 1...4 с координатами, измеренными по программе «Google Earth» (табл. 1).

Таблица 1

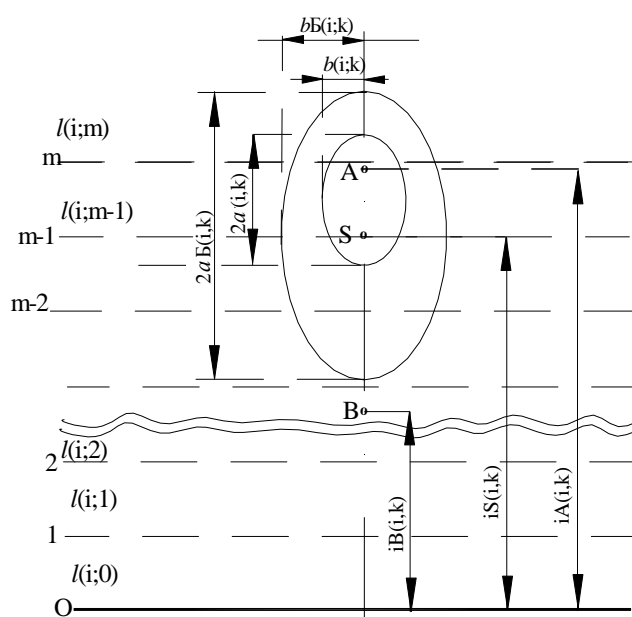
Координаты граничных точек

№ точки	широта	долгота	Расстояние до реки, м	Уклон, %	
				максимальный	средний
1	55°15'14.33"C	30°9'17.46"В	397	-11,9	-3,5
2	55°15'13.37"C	30°9'37.11"В	210	-13,5	-7,3
3	55°14'51.27"C	30°10'0.38"В	470	-28,9	-9,9
4	55°14'46.03"C	30°9'21.98"В	330	-26,8	-12,0

Моделировались ситуации, связанные с аварийным проливом различных нефтепродуктов (плотность 600...900 кг/м<sup>3</sup>) на почву на расстояниях от максимальных, указанных в таблице, до 100 м от реки Западная Двина. В качестве контрольной массы брались массы пролитого нефтепродукта от 0,5 до 20 тонн.

Для проведения исследований использовалась математическая модель трансформации загрязненных участков [4–6].

Известно, что форма пятна определяется наклоном поверхности. В данной модели принимается, что разлившееся по поверхности земли пятно нефтепродукта принимает форму эллипса, при этом загрязненный участок состоит из двух пятен: основного и буферного (рисунок).



Геометрическая схема пятна

Длина большой полуоси обозначена  $a(i,k)$  – основного пятна,  $aБ(i,k)$  – буферной зоны. Длина малой полуоси обозначена  $b(i,k)$  – основного пятна,  $bБ(i,k)$  – буферной зоны.

Алгоритм расчета был следующий. Ландшафт, лежащий в зоне стока, делился на  $m$  зон. Для каждой зоны выделялись линейные координаты  $l(i,m)$ , показывающие расстояние соответствующей зоны от водотока (от пятна до водотока) вдоль линии стока  $AB$ . Введенные обозначения:  $i$  – номер участка ( $i$ -тый участок);  $k$  – переменная дискретного времени;  $A$  – рассматриваемая точка (место аварии);  $B$  – точка стока;  $S$  – точка условного центра стока загрязненного участка. Далее определялись и позиционировались параметры эллипса пятна загрязнителя: длина большой полуоси  $a(i,k)$ , длина малой полуоси  $b(i,k)$ .

Зависимость между площадью пятна и массой загрязнителя:

$$S(i,k) = \beta(i) \cdot M(i,k)^{2/3}, \quad (9)$$

где  $\beta(i) = \frac{1}{\delta \cdot \rho}$  – коэффициент, учитывающий зависимость площади пятна от массы содержащегося в нём загрязнителя;  $\delta$  – предполагаемая конечная толщина нефтяного пятна, м;  $\rho$  – плотность нефтепродукта, кг/м<sup>3</sup>;  $2/3$  – степень, которая определяется формой тела пятна (конус);  $M(i,k)$  – масса загрязнителя в пятне на  $i$ -том участке в момент времени  $k$ , кг.

Затем по формуле (1) определялись параметры геометрической схемы пятна: площадь загрязненного участка  $S(i,k)$ ; площадь буферной зоны загрязненного участка определяется по формуле (9), в которую подставлялся коэффициент, учитывающий зависимость площади буферной зоны от массы содержащегося в ней загрязнителя и массы загрязнителя в буферной зоне.

Условный радиус загрязненного участка

$$r(i,k) = (S(i,k) / \pi)^{0.5}. \quad (10)$$

Условный радиус буферной зоны загрязненного участка по уточненной формуле (10):

$$r_B(i,k) = [(S(i,k) + S_B(i,k)) / \pi]^{0.5}. \quad (11)$$

При проведении оценочных расчетов на загрязненном участке учитывались следующие массообменные процессы: трансформация подвижного загрязнителя в неподвижный; перенос подвижного загрязнителя в неподвижный; перенос подвижного загрязнителя из пятна в буферную зону; миграция загрязнителя в водные объекты; поступление загрязнителя в загрязненном участке по фактам аварий; изъятие загрязнителя из загрязненного участка при рекультивационных работах.

Изменение массы загрязнителя в пятне происходит за счет таких процессов: биохимический распад жидкой и связанной фаз; переход жидкой фазы в связанную; вынос жидкой фазы в буферную зону участка; вынос жидкой фазы с территории (сток в водотоки); поступление жидкого загрязнителя с авариями; изъятие жидкой и связанной фаз при рекультивации.

Для буферной зоны характерны аналогичные процессы, за исключением выноса жидкой фазы в буферную зону (по логике моделирования). Вычисления были проведены с использованием разработанной нами компьютерной программы, реализующей приведенный выше алгоритм расчета.

В таблице 2 представлены результаты расчетов распространения нефтяного пятна на почве при его начальной толщине 0,001 м для различных начальной массы и плотности нефтепродукта. За максимальную длину распространения нефтяного пятна может быть принята длина большой полуоси буферной зоны загрязненного участка.

Таблица 2

Результаты расчетов

Масса нефтепродукта, кг	2000		5000		10 000	
	Плотность, кг/м <sup>3</sup>		Плотность, кг/м <sup>3</sup>		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	
Параметры	600	800	600	800	600	800
Площадь загрязненного участка, м <sup>2</sup>	265,20	198,00	487,30	365,00	773,60	580,20
Условный радиус загрязненного участка, м	9,17	7,94	12,45	10,78	15,70	13,60
Площадь буферной зоны загрязненного участка, м <sup>2</sup>	2466,12	924,82	2271,40	1703,50	3605,60	2704,20
Условный радиус буферной зоны загрязненного участка, м	29,48	18,9	29,6	25,66	37,33	32,33
Длина большой полуоси эллипса буферной зоны загрязненного участка, м	38,44	24,65	38,64	33,46	48,68	42,16

По результатам проведенных исследований установлено, что масса нефтепродукта, который может попасть в реку, пропорциональна уклону, расстоянию добегающего и зависит от рельефа местности. Пролиты различных нефтепродуктов на почву в количестве не более 10 тонн (10 000 кг) на расстояниях более 50 м от уреза реки в районе строительства мини-ГЭС не приводят к ее загрязнению. Увеличение объема аварийного разлива нефтепродуктов ведет к увеличению безопасного расстояния от уреза реки, которое зависит от рельефа местности.

Глубина миграции нефти и нефтепродуктов в горизонтальном и вертикальном направлениях зависит от механического состава почв и грунтов, водного режима почв, уровня грунтовых вод. Проведенный анализ рельефа местности и составляющих его почв в районе строительства мини-ГЭС позволяет сделать вывод, что достижение нефтяным загрязнением уровня грунтовых вод при нефтепроливах на рассматриваемой территории не прогнозируется. Можно отметить, что наибольшая глубина проникновения нефти на этой территории будет наблюдаться на песчаных и супесчаных почвах, наименьшая – на суглинках и глинистых грунтах, имеющих примерно одинаковое процентное соотношение в районе строительства.

**Заключение.** Каждая методика оценки загрязнения почв в отдельности позволяет лишь в определенной степени и по отношению к определенному фактору установить негативное влияние, не давая полного представления о последствиях и возможности восстановления целостности всей биосистемы. Считаем необходимым отметить, что в зоне расположения объектов такого типа, как мини-ГЭС, целесообразно проводить комплексную оценку экологического состояния почв как на этапе проектирования и строительства, так и при последующей эксплуатации таких объектов. Данный комплексный подход может быть использован при оценке любой промышленной территории, включающей в себя районы водосбора рек.

Оценка загрязнения почв нефтепродуктами является важной составляющей комплексной оценки экологического состояния почв. Представленные в работе результаты прогностических расчетов могут быть использованы как для оценки масштабов загрязнения нефтепродуктами непосредственно почвенного покрова районов водосбора с учетом рельефа местности, так и при оценке масштабов возможного загрязнения водотоков, протекающих по этим районам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мотузова, Г.В. Химическое загрязнение биосферы и его экологические последствия / Г.В. Мотузова, Е.А. Карпова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2013. – 304 с.
2. Клебанович, Н.В. Почвоведение и земельные ресурсы: учеб. пособие / Н.В. Клебанович. – Минск: БГУ, 2013. – 373 с.
3. Мержвинский, Л.М. Биологическое разнообразие Белорусского Поозерья / Л.М. Мержвинский. – Витебск: УО «ВГУ им. П.М. Машерова», 2011. – 413 с.
4. Караблин, У.С. Методы ликвидации и предупреждения ситуаций при освоении месторождений углеводородного сырья: моногр. / У.С. Караблин. – Алмааты: Изд-во «Эверо», 2008. – 185 с.
5. Юденко, А.Е. Модель трансформации участков / А.Е. Юденко // Вычислительные технологии 2000: сб. тр. междунар. конф. – Новосибирск, 2000. – С. 156–163.
6. Оразбаев, Б.Б. Гидродинамические модели для расчета растекания нефти и нефтепродуктов / Б.Б. Оразбаев, А.К. Кенжегалиев, С.Н. Гайсина // Нефть и газ: науч.-техн. журнал. – 2007. – № 4. – С. 98–108.

Поступила 04.05.2015

#### ASSESSMENT OF POLLUTION OF SOILS IN THE INDUSTRIAL PROPERTY

V. SAVENOK, N. KOVALVSKAYA

*The purpose of this paper is to analyze valuation techniques of soil contamination, as well as prediction calculation of possible oil contamination of soil in the area is being built industrial facility. As the study area we consider the construction of the coastal zone Vitebsk small hydropower plants on the Western Dvina river. For studies of possible soil contamination by oil products in this region used a mathematical model of transformation of contaminated sites. Evaluation of soil contamination by oil products is an important component of a comprehensive assessment of the ecological status of soils. Presented in this paper the results of prognostic calculations can be used to assess the extent of oil pollution of soil directly catchment areas based on terrain and in assessing the extent of possible contamination of streams flowing through these areas.*