

Определение нефтепроницаемости почв и грунтов расчетным методом

В.Е. Савенок, Е.В. Шаматульская

*Учреждение образования «Витебский государственный университет
имени П.М. Машерова»*

Для минимизации возможных последствий нефтяного загрязнения природных ландшафтов должна проводиться предварительная оценка устойчивости почв и грунтов к этому загрязнению. Одним из основных критериев, по которому проводится эта оценка, является нефтепроницаемость почв и грунтов.

Цель данной работы – оценка нефтепроницаемости основных типов почв и грунтов, характерных для территории Витебской области.

Материал и методы. При различных аварийных ситуациях, связанных с разливом нефти на рельеф, необходимо, прежде всего, оценить масштабы загрязнения почв и грунтов. Основными расчетными параметрами для определения нефтепроницаемости почв и грунтов являются коэффициент фильтрации, коэффициент проницаемости, коэффициент скорости фильтрации, коэффициент нефтепроводимости.

При прогностических расчетах использовались в качестве исходных данных характеристики почв и грунтов. Характеристиками нефтепродукта, применяемыми в расчетах, были плотность нефтепродукта, температура нефтепродукта, вязкость нефтепродукта.

Результаты и их обсуждение. Согласно проведенному анализу, основными типами грунтов на территории Витебской области являются: дерново-подзолистые, местами эродированные на моренных глинах и суглинках; дерново-подзолистые и глеевые преимущественно на глинах; дерново-подзолистые, местами эродированные, на лёсах, лёссовидных суглинках и супесях; дерново-подзолистые на песках. В работе определена нефтепроницаемость почв и грунтов, типичных для Витебской области, при различных значениях коэффициента фильтрации и других параметрах.

Заключение. Борьба с аварийными разливами нефти и нефтепродуктов, приводящими к загрязнению природной среды, является актуальным вопросом сегодняшнего дня. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при прогностической оценке масштабов нефтяного загрязнения почв и грунтов в случае аварийных нефтеразливов на рельеф.

Ключевые слова: грунт, коэффициент, нефтяное загрязнение, нефтепроницаемость, параметр, пористость, почва, расчет, фильтрация.

Identificaion of Oil Impenetrability of Groud and Soils by the Method of Calculation

V.E. Savenok, E.V. Shamatulskaya

Educational establishment «Vitebsk State University named after P.M. Masherov»

To minimize possible consequences of oil pollution of natural landscapes primary assessment of ground and soil resistance against this pollution should be conducted. One of basic criteria of such assessment is oil penetrability of grond and soil.

The purpose of the paper is assessment of oil penetrability of basic types of ground and soil which are typical of the territory of Vitebsk Region.

Material and methods. During emergencies connected with oil spill it is necessary, first of all, to assess the scale of ground and soil pollution. Basic calcucation parameters to identify oil penetrability of ground and soil are: filtration coefficient, penetrability coefficient, rate of filtration coefficient, oil conductance coefficient.

In forecast calculations ground and soil characteristics were used as initial data. The characteristics of the oil product, which were used in calculations, were: oil product density, oil product temperature, oil product viscosity.

Findings and their discussion. According to the analysis basic types of soils on the territory of Vitebsk Region are: sod-podzolic, eroded in some places, on moraine clay and loam; sod-podzolic and gley primarily on clay; sod podzolic, eroded in some places, on loess, loess type loam and sandy loam; sod-pofdzolic on sand. Oil impenetrability of ground and soil, which are typical of the territory of Vitebsk Region with different indications of the filtration coefficient and other parameters, is identified in the paper.

Conclusion. Combating emergency oil and oil product spills, which result in the pollution of the environment, is an urgent issue of today. Findings of the research can be used in forecast assessment of the scale of the oil pollution of the ground and soils caused by emergency oil spills.

Key words: ground, coefficient, oil pollution, oil penetrability, parameter, porosity, soil, calculation, filtration.

Важным фактором при оценке состояния природных ландшафтов выступает устойчивость почв и грунтов к химическому загрязнению. Количественная оценка устойчивости грунтов позволяет учитывать региональную специфику территории и характеризовать потенциальные возможности различных грунтов и их ответную реакцию на равное техногенное воздействие независимо от характера этого воздействия. Для минимизации возможных последствий нефтяного загрязнения должна проводиться предварительная оценка устойчивости почв и грунтов к этому загрязнению. Одним из основных критериев, по которому предлагается эта оценка, является нефтепроницаемость почв и грунтов.

Разлитые по поверхности грунта нефть и нефтепродукты, полностью заполняющие поры грунтов и трещины в различных породах, при определенных условиях перемещаются в порах. Проницаемость грунта зависит от его пористости, а также от характера пустот и пор.

Цель данной работы – оценка нефтепроницаемости основных типов почв и грунтов, характерных для территории Витебской области. В исследовании приведена методика определения коэффициентов фильтрации и пористости для рассматриваемых типов почв и грунтов, необходимая для прогнозной оценки загрязненности почв и грунтов различными видами нефтепродуктов, и представлены прогностические расчеты.

Материал и методы. В Витебской области широко распространены ледниковые и озерно-ледниковые суглинистые и глинистые отложения, а также частично пески; кроме того, встречаются суглинистые и песчаные образования аллювиального генезиса [1–2].

Глинистые грунты ледникового и водно-ледникового происхождения. Эта группа грунтов представлена главным образом моренными супесями, суглинками и глинами, содержащими различное количество дресвы, гравия, гальки и валунов, слагающих различные по мощности тела. В них часто встречаются внутриморенные линзы водонасыщенных песков, которые, с одной стороны, увеличивают неоднородность строения толщ, а с другой – уменьшают их устойчивость в стенках откосов и котлованов. Глинистые моренные грунты являются полиминеральными образованиями. В их глинистой фракции чаще всего преобладают гидрослюды. Наряду с ними здесь содержится значительное количество кварца, полевых шпатов и других минералов. Содержание водорастворимых солей в глинистых моренно грунтах незначительно, часто они совсем отсутствуют. Карбонатов

больше в нижних частях моренной толщи. Органическое вещество в этих грунтах, как правило, отсутствует. Отличительной чертой глинистых моренных грунтов является их высокая плотность, значения которой колеблются от 1,80–1,90 до 2,20–2,30 г/см³. Пористость этих грунтов мала – обычно 25–35%. Показатели механических свойств характеризуют морену как плотный, слабосжимаемый грунт. Необходимо отметить, что моренные суглинки и глины, хотя и обладают значительной водопрочностью, все же размокают и размываются водой. Эта способность моренных грунтов иногда является причиной деформаций откосов и дна выемок и котлованов.

Современные речные, озерные глинистые грунты (аллювиальные). Среди аллювиальных грунтов глинистые грунты развиты очень широко, особенно в долинах рек Витебской области. Они отличаются разнообразием как по составу, так и по свойствам, обычно представлены супесями и суглинками, нередко содержащими органические остатки. По форме тел это горизонтально-, волнисто- и линзовидно-слоистые суглинки и глины; супеси встречаются реже. Обычно это серые, черно-серые образования вследствие их оглеения и обогащения органическими веществами; иногда бурые или коричневые. Молодые пойменные глины, суглинки и супеси, как правило, очень рыхлые, влажные и слабо связанные. Высыхание их сопровождается изменением структуры породы и появлением мельчайших трещинок, разбивающих породу на отдельные неправильной формы. По стенкам трещин нередко отлагаются бурые окислы железа, увеличивающие неоднородность строения пойменных отложений. Очень часто в разрезах современного аллювия наблюдаются погребенные почвы или темноцветные горизонты, обогащенные органическим материалом. Наличие таких горизонтов и погребенных почв ухудшает свойства грунтов, поскольку высокое содержание органического материала в этих прослоях повышает гидрофильность, влажность, набухаемость, сжимаемость и снижает сопротивление сдвигу аллювиальных глинистых грунтов. Специфические глинистые грунты формируются в брошенных старых руслах – старицах, которые постепенно превращаются в замкнутые заболоченные понижения, заполняющиеся в паводковый период пылевато-глинистым материалом. Богатство этих отложений гниющими органическими остатками нередко вызывает процессы торфообразования и типичный при недостатке кислорода процесс минералообразования. Для отложений стариц, в отличие от глинистых грунтов остальной части

поймы, характерно также постоянное полное водонасыщение. После спада паводковых вод глинистые отложения поймы подвергаются длительному просыханию, а старичные отложения, как правило, остаются все время покрытыми водой. В этих условиях старичные глинистые грунты приобретают явные коллоидные свойства, обуславливающие их обычно пластичное или даже текучее состояние и весьма низкие показатели механических свойств. Озерные суглинки и глины, как правило, тонкослоистые, реже линзовидно-слоистые. Отличительной их особенностью является значительное содержание органических веществ. Все типы глинистых аллювиальных грунтов характеризуются высокой сжимаемостью и низкими показателями сопротивления сдвигу. Водопроницаемость грунтов, несмотря на их значительную общую пористость, очень небольшая.

При различных аварийных ситуациях, связанных с разливом нефти на рельеф, необходимо, прежде всего, оценить масштабы загрязнения почв и грунтов. Для этого требуется знать нефтепроницаемость почв и грунтов.

Основными расчетными параметрами для определения нефтепроницаемости почв и грунтов являются коэффициент фильтрации, коэффициент проницаемости, коэффициент скорости фильтрации, коэффициент нефтепроводимости.

Важным показателем при прогнозной оценке загрязненности почв нефтепродуктами является коэффициент фильтрации. Он является основной характеристикой нефтепроницаемости почв и грунтов и служит исходным параметром для всех фильтрационных расчетов [3]. Коэффициент фильтрации может определяться инструментальными и расчетными методами (лабораторными исследованиями). Как показывают многочисленные эксперименты, расход фильтрационного потока пропорционален площади поперечного сечения потока и гидравлическому уклону – это основной закон фильтрации (закон Дарси) [4]. Коэффициентом пропорциональности служит величина K , называемая коэффициентом фильтрации:

$$Q = K \cdot F \cdot J, \quad (1)$$

где $Q = v \cdot F$ – расход фильтрационного потока; F – площадь поперечного сечения потока; v – скорость фильтрации (расход воды через единицу площади поперечного сечения грунта, включая площадь сечения порового пространства и скелета грунта); J – гидравлический уклон (напорный градиент).

Коэффициент фильтрации K представляет собой скорость фильтрации при напорном градиенте, равном единице ($J=1$), иначе коэффициент фильтрации – это фильтрационный расход, отнесенный к площади поперечного сечения потока при напорном градиенте, равном единице:

$$K = v = Q/F. \quad (2)$$

При практических расчетах коэффициент фильтрации измеряют в метрах в сутки или в сантиметрах в секунду. В лабораторных условиях коэффициент фильтрации грунта определяется с помощью прибора Дарси.

Проницаемостью называется свойство грунтов (почв) пропускать через себя жидкости, газы и их смеси при наличии перепада давления (напора); проницаемость зависит от размера сообщающихся между собой пор и трещин в грунтах. Коэффициент проницаемости представляет собой расход жидкости, имеющей динамическую вязкость $1 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, фильтрующейся через поперечное сечение площадью 1 см^2 при перепаде давления $0,1 \text{ МПа}$. Он измеряется в *дарси* ($1 \text{ дарси} = 1,02 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$).

Коэффициент проницаемости может быть выражен формулой

$$C = Q \mu \Delta l / (\Delta P F), \quad (3)$$

где Q – объемный расход жидкости, $\text{см}^3/\text{с}$; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, $\text{мПа}\cdot\text{с}$; Δl – отрезок пути фильтрации, на котором происходит изменение давления ΔP , см; ΔP – перепад давления, МПа ; F – площадь поперечного сечения потока, см^2 .

Связь коэффициента фильтрации K с коэффициентом проницаемости C выражается формулой [3]:

$$K = a \cdot C \cdot \rho / (\mu \cdot 1000), \quad (4)$$

где a – коэффициент размерности; если K выражен в сантиметрах в секунду, то $a=1$; если в метрах в сутки, то $a=0,01 \cdot 24 \cdot 3600 = 864$; ρ – плотность жидкости (для воды $\rho=1000 \text{ кг/м}^3$).

При прогностических расчетах для определения коэффициента фильтрации (м/сут) по известному коэффициенту проницаемости формула (4) может быть преобразована к виду:

$$K = b \cdot C / \nu, \quad (5)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; $b=10^{-6}$ – коэффициент размерности,

если коэффициент фильтрации определяется в метрах в сутки.

Коэффициентом скорости фильтрации K_o называется скорость движения жидкости в порах или трещинах грунта при напорном градиенте, равном единице:

$$K_o = v/P_o = Q/(P_o F), \quad (6)$$

где P_o – активная пористость (скважность) пород.

Коэффициент скорости фильтрации и коэффициент фильтрации связаны зависимостью:

$$K_o = R/P_o. \quad (7)$$

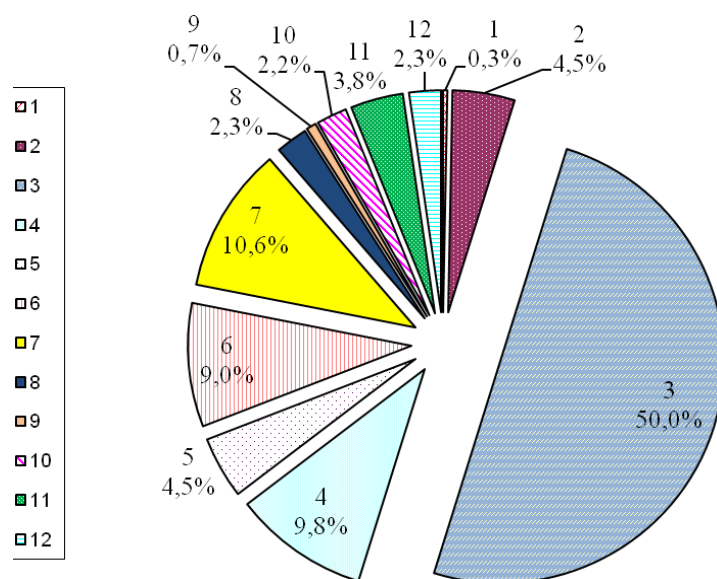
Коэффициент нефтепроводимости ($m^3/сут$) характеризует единичный расход (на 1 м ширины) пятна нефтяных загрязнений при напорном градиенте, равном единице. Коэффициент нефтепроводимости T может быть определен как произведение коэффициента фильтрации на рас-

ход нефтяных загрязнений, приходящихся на 1 м ширины нефтяного пятна m :

$$T = Km. \quad (8)$$

При прогностических расчетах нами использовались в качестве исходных данных характеристики почв и грунтов. Характеристиками нефтепродукта, применяемыми в расчетах, были плотность нефтепродукта, температура нефтепродукта, вязкость нефтепродукта.

Результаты и их обсуждение. Согласно проведенному нами анализу [5–6] основными типами почв (грунтов) на территории Витебской области являются: дерново-подзолистые, местами эродированные на моренных глинах и суглинках, которые составляют 50% от всех типов почв региона; дерново-подзолистые и глеевые преимущественно на глинах (10,6%); дерново-подзолистые, местами эродированные, на лёсах, лёссоподобных суглинках и супесях (9,8%); дерново-подзолистые на песках (9%) (рис. 1).



- 1 – дерново-карбонатные, суглинистые супесчаные на карбонатных моренных и лёссовых отложениях;
- 2 – дерново-подзолистые, временами излишне увлажненные, на озерно-ледниковых глинах и суглинках;
- 3 – дерново-подзолистые, местами эродированные, на моренных глинах и суглинках;
- 4 – дерново-подзолистые, местами эродированные, на лёсах, лёссоподобных суглинках и супесях;
- 5 – дерново-подзолистые на водно-ледниковых суглинках и супесях, часто подосланных мореной;
- 6 – дерново-подзолистые на песках;
- 7 – дерново-подзолистые и глеевые преимущественно на глинах;
- 8 – дерново-подзолистые и глеевые преимущественно на супесях, песках;
- 9 – дерново-глеевые и глеевые на породах различного гранулометрического состава;
- 10 – аллювиальные дерново-глеевые и торфяно-болотные;
- 11 – торфяно-болотные низинные;
- 12 – торфяно-болотные верховые и переходные.

Рис. 1. Процентное соотношение типов почв.

В работе была проведена оценка почв и грунтов, типичных для Витебской области, по их нефтепроницаемости при различных значениях коэффициента фильтрации и других параметрах.

Нефтяные загрязнения, заполняя поры между частицами грунта, движутся под действием силы тяжести. Движение нефтяных загрязнений можно рассматривать как безнапорное и равномерное при постоянном гидравлическом уклоне для малых площадей загрязнения. В то же время, если площадь загрязнения является значительной, тогда возможно изменение гидравлического уклона и подобное движение можно рассматривать как неравномерное. Поскольку скорость фильтрации, глубина, гидродинамическое давление и иные гидравлические характеристики пятна нефтяного загрязнения зависят от времени и координат пространства, то проникновение загрязнения в поры грунта будет являться неустановившимся движением. В соответствии с [3] коэффициенты фильтрации и проницаемости для одного и того же типа почв и грунтов могут изменяться в широких пределах и зависят, как было отмечено выше, от размера сообщающихся между собой пор и трещин и различных других факторов. В табл. 1 приведены ориентировочные пределы коэффициентов фильтрации и проницаемости нефти и нефтепродуктов для типов почв, характерных для ландшафтов Витебской области, при температуре 20°C (нумерация почв в соответствии с рис. 1).

Согласно формуле (4) изменение коэффициента фильтрации зависит от плотности и вязко-

сти. Для воды приближенно можно считать коэффициент проницаемости в 1 *дарси*, соответствующий коэффициенту фильтрации 1 *м/сут*. Для нефти и нефтепродуктов, плотность которых изменяется от 640 кг/м^3 (бензин) до 1000–1040 кг/м^3 (мазут) для коэффициента проницаемости в 1 *дарси*, пределы вариации коэффициента фильтрации изменяются в широких пределах и будут зависеть от типа почвы и ее состояния. По формуле (5) нами был определен коэффициент фильтрации для среднего значения коэффициента пористости для различных типов почв и разных видов нефтепродуктов при температуре $t=20^\circ\text{C}$. Результаты расчетов представлены в табл. 2 (нумерация почв в соответствии с рис. 1).

По полученному значению коэффициента фильтрации далее определялся коэффициент нефтепроводимости. Определенные по формуле (8) коэффициенты нефтепроводимости для различных значений расхода нефтяных загрязнений, приходящихся на 1 *м* ширины нефтяного пятна *m* (принимался постоянным для расчетного времени), представлены графически для типов почв 6, 8 и 1, 3 на рис. 2 и 3 соответственно. Таким образом, чем больше коэффициент фильтрации, тем больше нефтепроницаемость почв (грунтов), в то же время при одном значении коэффициента фильтрации для одного типа почв (грунтов) их загрязненность в значительной степени будет зависеть от расхода нефтепродукта, приходящегося на 1 *м* ширины пятна нефтяного загрязнения.

Таблица 1

Значение коэффициентов фильтрации и проницаемости для различных типов почв

Типы почв	Коэффициент фильтрации K , м/сут	Коэффициент проницаемости C , дарси
6, 8	10÷100	11,6÷116
4, 5, 7, 9, 10, 11, 12	1÷10	1,16÷11,6
1, 3	0,1÷1	0,12÷1,16
2	0,001÷0,1	$1,2 \cdot 10^{-3}$ ÷0,12

Таблица 2

Значение коэффициентов фильтрации нефтепродуктов для различных типов почв (при среднем значении коэффициента пористости (см. табл. 1))

Типы почв	Коэффициент фильтрации K , м/сут		
	Бензин $\rho=640 \text{ кг/м}^3$, $\nu=0,93 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Дизельное топливо $\rho=640 \text{ кг/м}^3$, $\nu=2,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Мазут $\rho=960 \text{ кг/м}^3$ $\nu=0,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$
6, 8	68,60	23,63	0,03
4, 5, 7, 9, 10, 11, 12	6,86	2,36	0,0032
1, 3	0,69	0,24	0,0003
2	0,07	0,02	0,00003

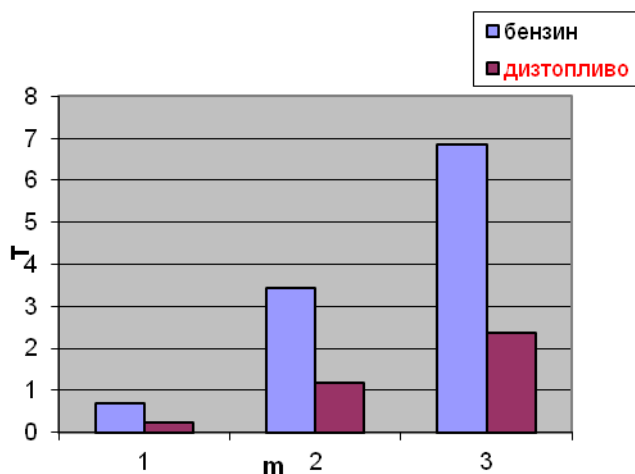


Рис. 2. Коэффициент нефтепроводимости для типов почв 6, 8, где 1 – $m=0,01$; 2 – $m=0,05$; 3 – $m=0,1$.

Закключение. Борьба с аварийными разливами нефти и нефтепродуктов, приводящими к загрязнению природной среды, является актуальным вопросом сегодняшнего дня. Решение задач, связанных с прогнозированием распространения нефтепродуктов в природной среде, – важный элемент оценки степени негативного влияния нефтепродуктов на природные ландшафты. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при прогнозной оценке масштабов нефтяного загрязнения почв и грунтов в случае аварийных нефтеразливов на рельеф. Своевременный и качественный прогноз будет способствовать минимизации экологического ущерба в этих случаях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павловская, И.Э. Полоцкий ледниково-озерный бассейн: строение, рельеф, история развития / И.Э. Павловская. – Минск: Наука и техника, 1994. – 121 с.
2. Закономерности распространения грунтовых толщ в Беларуси и особенности их прочностных и деформационных свойств [Электронный ресурс] // Геотехника в строительстве. – 2011. – № 4(37). – Режим доступа: <http://bsc.by>. – Дата доступа: 16.01.14.
3. П-717-80. Руководство по определению коэффициента фильтрации водоносных пород методом опытной откачки / Гидропроект. – М.: Энергоиздат, 1981. – 142 с.
4. Пашков, Н.Н. Гидравлика. Основы гидрологии: учебник для уч. энерг. и энергостроительных техн. / Н.Н. Пашков, Ф.М. Долгачев. – М.: Энергия, 1977. – 408 с.
5. Минаева, О.Н. Оценка почв районов водосбора / О.Н. Минаева, В.Е. Савенок // Проблемы устойчивого развития регионов Республики Беларусь и сопредельных стран: сб. науч. ст. 2-й Междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 27–29 марта 2012 г. / МГУ им. А.А. Кулешова. – Могилев, 2012. – Ч. 1. – С. 77–80.

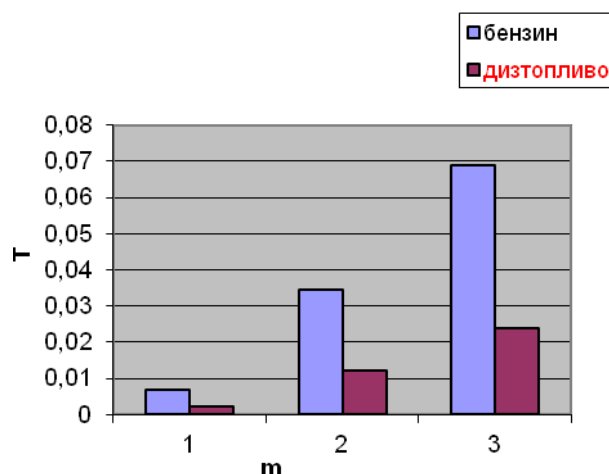


Рис. 3. Коэффициент нефтепроводимости для типов почв 1, 3, где 1 – $m=0,01$; 2 – $m=0,05$; 3 – $m=0,1$.

- дунар. науч.-практ. конф., Могилев, 27–29 марта 2012 г. / МГУ им. А.А. Кулешова. – Могилев, 2012. – Ч. 1. – С. 77–80.
6. Минаева, О.Н. Прогнозная оценка районов водосбора / О.Н. Минаева, В.Е. Савенок // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сб. докл. VI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 8–9 июня 2011 г. / НИИ ПБ и ЧС МЧС Респ. Беларусь. – Минск, 2011. – С. 303–308.

REFERENCES

1. Pavlovskaya I.E. Polotskii lednikovo-ozernii basseini: stroyeniye, relyef, istoriya razvitiya [Polotsk Glacier and Lake Basin: Structure, Relief, History of Development], Minsk: Nauka i tekhnika, 1994, 121 p.
2. Zakonomernosti rasprostraneniya gruntovikh tolshch v Belarusi i osobennosti ikh prochnostnykh i deformatsionnykh svoystv [Regularities of the Spread of Ground Columns in Belarus and Peculiarities of their Stability and Deformation Features (e-resource)], Geotechnology in Construction, 2011, 4(37), <http://bsc.by>.
3. Rukovodstvo po opredeleniyu koeffitsienta filtratsii vodonosnykh porod metodom optimoi otkachki [Manual on Identification of the Coefficient of Water Carrying Ground by the Method of Experimental Pumping], Gidroproekt, Moscow: Energoizdat, 1981, 142 p., <http://www.complexdoc.ru>.
4. Pashkov N.N., Dolgachev F.M. Gidravlika. Osnovi gidrologii. Uchebnik [Hydraulics. Bases of Hydrology. Textbook], M.: Energiya, 1977, 408 p.
5. Minayeva O.N., Savenok V.E. Problemi ustoychivogo razvitiya regionov RB i sopredelnykh stran: sbornik nauchn. statei 2-i Mezhd. NPK, Mogilev 27–29 marta 2012 g., MGU im. Kuleshova [Issues of Stable Development of the Regions of Belarus and Borderline Countries: Collection of Articles of the 2nd international Scientific and Practical Conference, Mogilev, March 27–29 2012, Mogilev State Kuleshov University], Mogilev, 2012, Part1, pp. 77–80.
6. Minayeva O.N., Savenok V.E. ChS: preduprezhdeniye i likvidatsiya: sbornik dokladov VI Mezhd. NPK, Minsk 8–9 iyunia 2011 g. [Emergencies: Prevention and Fighting: Collection of Reports of the VI International Scientific and Practical Conference, Minsk, June 8–9, 2011, NII PB I ChS MChS RB, Minsk, 2011, pp. 303–308.

Поступила в редакцию 22.01.2014. Принята в печать 19.02.2014
Адрес для корреспонденции: e-mail: ecologybf@rambler.ru – Савенок В.Е.