

УДК 502.5

**А. В. Бурмакова<sup>1</sup>, В. В. Смелов<sup>1</sup>, А. А. Захаров<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup> Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси**РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНОГО ПРОЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ**

Статья посвящена описанию математической модели прогнозирования последствий аварийного пролива нефтепродуктов. Модель является основой экологической экспертной системы и носит комплексный характер. Разделена на уровни, соответствующие слоям геологической среды: поверхностный, почвенный, грунтовый, грунтовые воды. Модель позволяет рассчитывать значения концентраций нефтепродуктов в почве и в грунте под наземным пятном загрязнения, а также концентрацию нефтепродуктов в грунтовых водах, горизонтальную скорость распространения загрязнения за границы наземного пятна. Позволяет также рассчитать площадь и форму наземного пятна, вертикальную скорость проникновения и распространения загрязнения, учитывает испарение и адсорбцию нефтепродуктов в почве и грунте. В качестве входных данных используются данные о географических координатах пролива (долгота, широта), тип и объем пролитого нефтепродукта, справочные данные о физико-химических свойствах нефтепродуктов, почвы и грунта, картографическая информация (рельеф местности, глубина залегания грунтовых вод, мощность грунтового и почвенного слоя), температура окружающей среды.

**Ключевые слова:** математическая модель, прогнозирование, экология, нефтепродукты, экспертная система.

**A. V. Burmakova<sup>1</sup>, V. V. Smelov<sup>1</sup>, A. A. Zakharov<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Belarusian State Technological University<sup>2</sup> The Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus**THE IMPLEMENTATION OF THE MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING THE CONSEQUENCES OF THE EMERGENCY EXERCISE OF OIL PRODUCTS**

The article is devoted to the description of the mathematical model of forecasting the consequences of accidental spillage of oil products. The model is the basis of the ecological expert system and is of a complex nature. It is divided into levels corresponding to the layers of the geological environment: surface, soil, ground, groundwater. The model makes it possible to calculate the values of the concentrations of oil products in the soil and in the ground under the ground pollution spot, as well as the concentration of petroleum products in groundwater, the horizontal speed of pollution spread beyond the boundary of the ground spot. It also allows to calculate the area and shape of the ground spot, the vertical rate of penetration and spread of pollution, takes the into account evaporation and adsorption of oil products in soil and soil. Are used as input data on the geographic coordinates of the strait (longitude, latitude), type and amount of spilled oil, reference data on the physicochemical properties of oil products, soil and soil, cartographic information (terrain relief, groundwater depth, ground and soil thickness layer), ambient temperature.

**Key words:** mathematical model, forecasting, ecology, oil products, expert system.

**Введение.** Математическая модель прогнозирования последствий аварийного пролива нефтепродуктов является основой экспертной системы, которая предназначена для поддержки принятия решений по выбору оптимальных с точки зрения экологической и экономической эффективности технологий реабилитации геологической среды.

Существуют различные модели для прогноза последствий пролива нефтепродуктов, например программно-аппаратный комплекс по моделированию последствий аварийных разливов нефти на платформе ArcGIS, созданный во Всероссийском научно-исследовательском ин-

ституте по проблемам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям МЧС России в 2005 г. Программный модуль позволяет определить: площадь и форму пятна загрязнения и вероятность загрязнения близлежащих объектов. Существует также геоинформационная система, которую разрабатывали специалисты Уфимского государственного авиационного технического университета в 2006 г., где с помощью картографических данных определяется направление растекания пятна загрязнения [1].

Математическая модель создана для комплексного прогноза всех возможных последствий загрязнений геологической среды. Для это-

го собраны справочные и картографические данные в качестве входных значений и формулы расчета последствий пролива для каждого из слоев геосферы.

**Основная часть.** Исходными для математической модели прогнозирования (ММП) являются следующие данные.

1. Географические координаты центра пролива, объем и тип (бензин, керосин, сырая нефть и пр.) пролитого нефтепродукта (НП).

2. Данные о физико-химических свойствах нефтепродуктов.

3. Данные о свойствах грунтов.

4. Картографическая информация: рельеф местности, глубина залегания грунтовых вод, мощность грунтового и почвенного слоя, коэффициенты задержки НП в грунте и почве.

ММП позволяет прогнозировать: площадь и форму наземного пятна загрязнения, массу испарения НП с поверхностного слоя, глубину и скорость проникновения НП в почву и грунт, адсорбированную массу НП в почве и грунте, максимальную концентрацию НП в почве и грунте, максимальную концентрацию нефтепродуктов в грунтовых водах, временной интервал для достижения максимальной концентрации в грунтовых водах, скорость распространения фронта загрязнения с потоком грунтовых вод.

ММП является многоуровневой. На рис. 1 отображены четыре уровня ММП (нумеруются сверху вниз от 1 до 4).

В таблице перечислены уровни, значения и справочные данные, применяемые для вычислений на каждом уровне ММП.

**Поверхностный слой.** На первом уровне модели вычисляются следующие значения: масса испарения НП, площадь пятна загрязнения и форма пятна загрязнения.

**Площадь  $S_1$  пятна загрязнения** вычисляется по следующей формуле:

$$S_1 = V_0 \cdot d_1. \quad (1)$$

Коэффициент растекания нефтепродукта  $d_1$  является справочной величиной и зависит от типа и объема нефтепродукта, типа почвы, а также угла наклона поверхности [2].

**Масса  $M_1$  испарившегося нефтепродукта** вычисляется по следующей формуле:

$$M_1 = S_1 \cdot q_1(T). \quad (2)$$

Значение  $q_1(T)$  зависит от температуры  $T$  воздуха и является справочной величиной ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ) [3].

Для вычисления формы пятна загрязнения применяется эвристический алгоритм, исходными данными для которого являются геогра-

фические координаты центра, площадь  $S_1$  пролива, а также картографические данные о рельефе поверхности в окрестности центра. Результатом расчета является множество пар  $(x, y)$  координат границ пятна загрязнения. Высоты в точках вычисляются методом аппроксимации.

**Толщина наземного слоя пролитого нефтепродукта  $H_1$**  находится по формуле

$$H_1 = \frac{V_0}{S_1}. \quad (3)$$

**Почвенный слой.** На втором уровне модели вычисляются: адсорбированная почвой масса НП, максимально возможная концентрация НП в почве и максимальная глубина проникновения НП в почву.

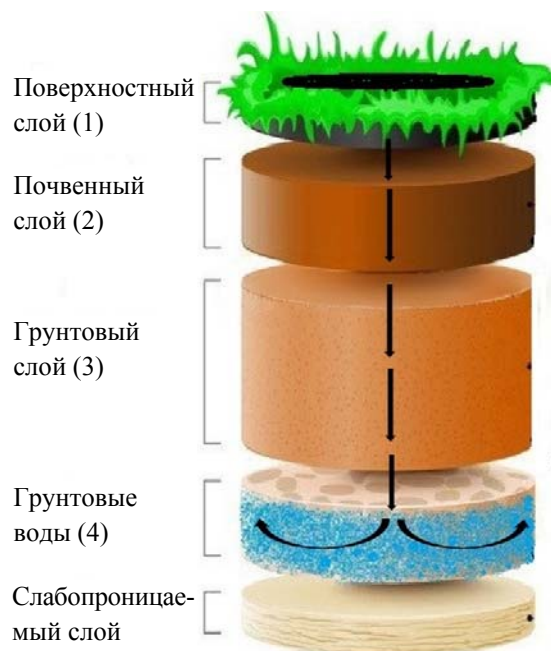


Рис. 1. Слои модели прогнозирования последствий пролива нефтепродуктов

**Адсорбированная почвой масса  $M_2$  НП** вычисляется по следующей формуле:

$$M_2 = S_1 \cdot h_2 \cdot u_2 \cdot \rho_0. \quad (4)$$

Значение  $u_2$  – нефтеемкость почвы, является максимальной возможной концентрацией НП в почве.

Нефтеемкость  $u_2$  является справочной величиной [3], так же как и средняя плотность НП  $\rho_0$  [4].

**Максимальная глубина проникновения  $H_2$  НП в почву** вычисляется следующим образом:

$$H_2 = h_2 \cdot \frac{M_0 - M_1}{M_2}. \quad (5)$$

## Значения, вычисляемые в ММП

| № | Уровни модели      | Величины    |                   |   |
|---|--------------------|-------------|-------------------|---|
|   |                    | Обозначение | Единицы измерения | Наименование  |
| 0 | Исходные данные    | $V_0$       | м <sup>3</sup>    | Объем пролитого НП  |
|   |                    | $\rho_0$    | кг/м <sup>3</sup> | Плотность НП  |
|   |                    | $M_0$       | кг                | Масса пролитого НП  |
|   |                    | $\delta_0$  | кг/с <sup>2</sup> | Коэффициент поверхностного натяжения НП   |
| 1 | Поверхностный слой | $S_1$       | м <sup>2</sup>    | Площадь пятна загрязнения   |
|   |                    | $d_1$       | м <sup>-1</sup>   | Коэффициент растекания НП   |
|   |                    | $M_1$       | кг                | Масса испарившегося нефтепродукта   |
|   |                    | $q_1(T)$    | кг/м <sup>2</sup> | Удельная величина выбросов нефтепродукта  |
|   |                    | $H_1$       | м                 | Толщина наземного слоя пролитого нефтепродукта  |
| 2 | Почвенный слой     | $M_2$       | кг                | Адсорбированная почвой масса НП   |
|   |                    | $h_2$       | м                 | Средняя высота почвенного слоя  |
|   |                    | $u_2$       | –                 | Нефтеемкость почвы  |
|   |                    | $H_2$       | м                 | Максимальная глубина проникновения НП в почву   |
| 3 | Грунтовый слой     | $v_3$       | м/с               | Скорость вертикального проникновения НП в грунт   |
|   |                    | $k_v$       | м/с               | Коэффициент фильтрации воды   |
|   |                    | $r_3$       | –                 | Коэффициент задержки НП в грунте  |
|   |                    | $M_3$       | кг                | Адсорбированная грунтовым слоем масса НП  |
|   |                    | $h_3$       | м                 | Мощность слоя грунта  |
|   |                    | $m_3$       | –                 | Пористость грунта (от 0 до 1)   |
|   |                    | $w_3$       | –                 | Капиллярная влагоемкость грунта (от 0 до 1)   |
|   |                    | $\rho_v$    | кг/м <sup>3</sup> | Плотность воды  |
|   |                    | $\delta_v$  | кг/с <sup>2</sup> | Коэффициент поверхностного натяжения воды   |
|   |                    | $H_3$       | м                 | Максимальная глубина проникновения НП в грунт   |
|   |                    | $C_3$       | –                 | Максимальная концентрация НП в грунте   |
|   |                    | $\rho_3$    | кг/м <sup>3</sup> | Средняя плотность грунта  |
| 4 | Грунтовые воды     | $t_4$       | с                 | Временной интервал для достижения максимальной концентрации в грунтовых водах                       |
|   |                    | $l_4$       | м                 | Максимальное расстояние распространения фронта загрязнения от центра пролива НП с грунтовыми водами |
|   |                    | $v_4$       | м/с               | Горизонтальная скорость распространения фронта загрязнения с грунтовыми водами                      |
|   |                    | $h_4$       | м                 | Толщина водоносного слоя, принимается за 1 м  |
|   |                    | $h'_3$      | м                 | Мощность грунтового слоя в первой точке   |
|   |                    | $h''_3$     | м                 | Мощность грунтового слоя во второй точке  |
|   |                    | $C_4$       | –                 | Концентрация загрязнения в грунтовых водах  |

*Грунтовый слой.* На третьем уровне модели вычисляются: скорость вертикального проникновения НП в грунт, адсорбированная грунтом масса НП, максимальная глубина проникновения НП в грунт, максимальная концентрация НП в грунте.

*Скорость вертикального проникновения  $v_3$  НП в грунт* вычисляется по следующей формуле:

$$v_3 = \frac{k_v}{r_3}. \quad (6)$$

Коэффициент фильтрации воды  $k_v$  [5] и коэффициент задержки  $r_3$  НП [6] в грунте являются справочными величинами.

*Адсорбированная грунтовым слоем масса  $M_3$  НП* рассчитывается по формуле

$$M_3 = h_3 \cdot S_1 \cdot \rho_v \cdot m_3 \cdot w_3 \cdot \frac{\delta_0}{\delta_v}. \quad (7)$$

Плотность воды  $\rho_v$  [7], коэффициент поверхностного натяжения НП  $\delta_0$ , коэффициент поверхностного натяжения воды  $\delta_v$  [8], пористость грунта  $m_3$  и капиллярная влагоемкость грунта  $w_3$  [9] являются справочными величинами.

*Максимальная глубина проникновения  $H_3$  НП в грунт* зависит от адсорбированной в грунте массы и вычисляется следующим образом: концентрация высчитывается с использованием верхней формулы, или же, приравнивая

ется к мощности грунтового слоя. Вычисляется по следующей формуле:

$$H_3 = \begin{cases} h_3 \cdot \frac{M_0 - (M_1 + M_2)}{M_3}, & \text{при } M_0 - (M_1 + M_2) \leq M_3, \\ h_3, & \text{при } M_0 - (M_1 + M_2) > M_3. \end{cases} \quad (8)$$

Максимальная концентрация НП  $C_3$  в грунте зависит от адсорбированной в грунте массы, следовательно, концентрация высчитывается используя максимальную глубину проникновения НП в грунт или же заменяя ее на мощность грунтового слоя. Вычисляется по следующей формуле:

$$C_3 = \frac{M_3}{S_1 \cdot H_3 \cdot \rho_3}. \quad (9)$$

Средняя плотность грунта  $\rho_3$  является справочной величиной [10].

Уровень грунтовых вод. На четвертом уровне модели вычисляются: срок достижения максимальной концентрации на границе грун-

товых вод, горизонтальная скорость распространения фронта загрязнения с грунтовыми водами, концентрация НП в грунтовых водах, радиус распространения НП с грунтовыми водами.

Временной интервал для максимальной концентрации на уровне грунтовых вод  $t_4$  вычисляется как сумма продолжительности времени полного впитывания НП в почву и времени полного впитывания НП в грунт:

$$t_4 = \frac{h_2 + h_3}{v^3}. \quad (10)$$

Максимальное расстояние распространения фронта загрязнения от центра пролива НП с грунтовыми водами  $l_4$  вычисляется по следующей формуле:

$$l_4 = \frac{M_0 - (M_1 + M_2 + M_3)}{2R \cdot h_4 \cdot m_3 \cdot w_3 \cdot \frac{\delta_0}{\delta_b}}, \quad (11)$$

где  $R$  – радиус пятна пролива (м).

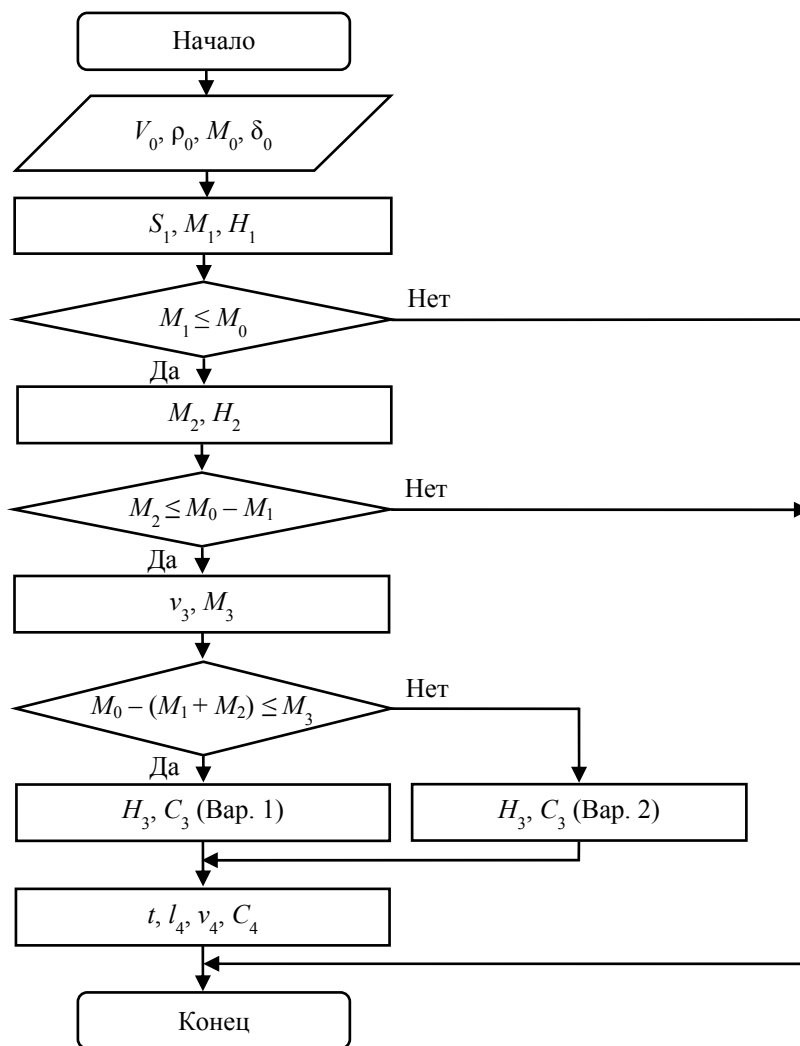


Рис. 2. Схема алгоритма работы ММП

Горизонтальная скорость распространения  $v_4$  фронта загрязнения с грунтовыми водами рассчитывается по следующей формуле:

$$v_4 = \frac{h'_3 - h''_3}{l_4} \cdot \frac{k_B}{r_3}. \quad (12)$$

Концентрация загрязнения в грунтовых водах  $C_4$  вычисляется по следующей формуле:

$$C_4 = \frac{M_0 - (M_1 + M_2 + M_3)}{2R \cdot l_4 \cdot h_4}. \quad (13)$$

ММП работает по алгоритму, схема которого представлена на рис. 2.

Для оценки адекватности модели проведены испытания на пяти объектах в Беларуси. В качестве объектов были выбраны нефтебазы и автозаправочные станции, на которых были зафиксированы аварийные проливы НП и проведены исследования по замеру концентраций Институтом природопользования. Предварительный анализ полученного с помощью ММП прогноза и результатов измерений показал, что при значительных расхождениях прогнозируемых и измеренных концентраций НП в отдельных точках, в целом прогноз ММП не противоречит общей реальной картине загрязнения. Аналогичные исследования в настоящее время проводятся на двух объектах (нефтепроводы) в Казахстане.

**Заключение.** Сравняя рассмотренную математическую модель с программно-аппа-

ратным комплексом на платформе ArcGIS, стоит заметить, что обе модели прогнозируют площадь и форму пятна загрязнения и вероятность попадания нефтепродукта на близлежащие объекты. Однако математическая модель учитывает то, что происходит с пятном загрязнения с момента аварии до распространения загрязнения с грунтовыми водами, показывая последствия пролива поэтапно, начиная с поверхностного слоя до попадания нефтепродукта в водные ресурсы, в отличие от конкурента, где учитываются лишь наземные последствия пролива.

Модель находится в стадии доработки, в дальнейшем планируется ее расширение вводом дополнительной информации.

Работа выполнена в рамках совместного белорусско-казахстанского инновационного проекта «Разработка экспертной системы реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктами, на основе принципов самоорганизации для территорий государств – участников СНГ» Межгосударственной программы инновационного сотрудничества государств-участников на период до 2020 г.

Математическая модель является совместной разработкой специалистов Научно-производственного центра по геологии, Института природопользования Национальной академии наук Беларуси и Белорусского государственного технологического университета.

### Литература

1. Data+/Геоинформационные системы для бизнеса и общества [Электронный ресурс]. 2017. URL: [https://www.dataplus.ru/news/arcreview/detail.php?ID=1865&SECTION\\_ID=49](https://www.dataplus.ru/news/arcreview/detail.php?ID=1865&SECTION_ID=49) (дата обращения: 12.12.2017).
2. Методика расчета минимальной оснащенности аварийно-спасательных служб (формирований) предназначенных для локализации и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации, на континентальном шельфе и в исключительной экономической зоне Российской Федерации: приложение № 1 к приказу № 613, от 21 августа 2000 г., МЧС Российской Федерации. С. 4–5, 39.
3. Белькова С. В. Определение ущерба окружающей среде при авариях на магистральных нефтепроводах. Омск: ОмГТУ, 2010. С. 14–18.
4. Гольдберг В. М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения – М.: Недра, 1984. 262 с.
5. Отчет о комплексной геолого-гидрогеологической и инженерно-геологической съемке масштаба 1:50 000 для целей мелиорации в водосборах рек Или и Гайны (Плещеницкий участок) / Т. А. Михалева [и др.]. Минск: Институт геологических наук, 1978–1980. Отчет 921.
6. Методика прогнозирования миграции загрязняющих веществ в грунтовых водоносных горизонтах от автозаправочных станций: РД РБ 0212.1-98. Минск, 1998. 258 с.
7. Методика прогнозирования объема экологического загрязнения грунтов и грунтовых вод при проливе экологически вредных веществ / А. В. Вагнер [и др.]. // ИСБ: Экологический вестник России. 2004, № 5. С. 45–51.
8. Огнянник Н. С. Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами. Киев: А.П.Н., 2006. С. 278.
9. Белоусова А. П. Экологическая гидрогеология: учеб. для вузов. М.: Академкнига, 2006. С. 397.

10. Шляппо Е. С. Отчет о комплексной геолого-гидрогеологической съёмке масштаба 1:50 000 с инженерно-геологическими исследованиями по водосборам низовьев рек Горыни, Ствиги и Уборти (Средне-Припятский участок) 1968–1970. Бобруйск, 1970.

### References

1. Data+/Geoinformation system for business and society. Available at: [https://www.dataplus.ru/news/arcreview/detail.php?ID=1865&SECTION\\_ID=49](https://www.dataplus.ru/news/arcreview/detail.php?ID=1865&SECTION_ID=49) (accessed 12.12.2017).
2. Methodology for calculating the minimum equipment of rescue services (formations) intended for localization and liquidation of oil and oil products spills in the territory of the Russian Federation, on the continental shelf and in the exclusive economic zone of the Russian Federation: Appendix 1 to the Draft Order of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation. P. 39.
3. Bel'kova S. V. *Opredeleniye ushcherba okruzhayushchey srede pri avariyaх na magistral'nykh nefteprovodakh* [Definition: Determination of damage to the environment during accidents on main oil pipelines]. Omsk, OmGTU Publ., 2010. Pp. 14–18.
4. Gol'dberg V. M., Gazda S. *Gidrogeologicheskiye osnovy okhrany podzemnykh vod ot zagryazneniya* [Definition: Hydrogeological basis of protection of groundwater from pollution]. Moscow, Nedra Publ., 1984. P. 262.
5. Mikhaleva T. A., Deruto G. V., Andrusenko N. Yu. *Otchet o kompleksnoy geologo-gidrogeologicheskoy i inzhenerno-geologicheskoy s'yemke masshtaba 1:50 000 dlya tseley melioratsii v vodosborakh rek Ilii i Gayny (Pleshchenitskiy uchastok)* [Report on a comprehensive geological and hydrogeological survey of a scale of 1:50 000 for the purposes of land reclamation in the watersheds of the rivers Iliya and Gayna (Pleshchenitskiy site)]. 1978–1980. Report 921.
6. RD RB 0212.1-98. Methods of forecasting the migration of pollutants in groundwater aquifers from petrol station. Minsk, 1998. 258 p.
7. Wagner A. V., Bukharin S. N., Kochemasov S. G., Priymak V. M. Methods of forecasting the volume of ecological use of soil and groundwater in the strait of environmentally harmful substances. *ISB: Ekologicheskii vestnik Rossii* [Ecological Bulletin of Russia], 2004, no. 5, pp. 45–51 (In Russian).
8. Ognyanik N. S., Paramonova N. K., Briks A. L., Konnov P. V., Pashkovskiy I. S. *Osnovy izucheniya zagryazneniya geologicheskoy sredy legkimi nefteproduktami* [Fundamentals of studying the pollution of the geological environment with light oil products]. Kiev, A.P.N. Publ., 2006. 278 p.
9. Belousova A. P., Gavich I. K., Lisenkov A. V., Popov Ye. V. *Ekologicheskaya gidrogeologiya: uchebnik dlya vuzov* [Ecological hydrogeology: A textbook for high schools]. Moscow, Akademkniga Publ., 2006. 397 p.
10. Shlyappo Ye. S., Shchurok Ye. K., Sergeevich V. P. *Otchet o kompleksnoy geologo-gidrogeologicheskoy s'yemke masshtaba 1: 50 000 s inzhenerno-geologicheskimi issledovaniyami po vodosboram nizov'yev rek Goryni, Stvigi i Uborti (Sredne-Pripyatskiy uchastok)* [Report on a comprehensive geological and hydrogeological survey of a scale of 1:50 000 engineering-geological studies on catchments of the lower reaches of the Goryni, Stvigi and Uborti rivers (Middle Pripyatskiy site)]. 1968–1970. Report 20.

### Информация об авторах

**Бурмакова Анастасия Владимировна** – магистрант. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: burmakova@belstu.by

**Смелов Владимир Владиславович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: smw@belstu.by

**Захаров Алексей Александрович** – младший научный сотрудник. Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси (220072, г. Минск, пр-т Независимости 66, Республика Беларусь). E-mail: nature@ecology.basnet.by

### Information about the authors

**Burmakova Anastasiya Vladimirovna** – Master's degree student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str, 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: burmakova@belstu.by

**Smelov Vladimir Vladislavovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Information Systems and Technologies. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str, 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: smw@belstu.by

**Zakharov Aleksey Alekseevich** – junior researcher. The Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus. (66, Nezavisimosti Ave, 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nature@ecology.basnet.by

Поступила 13.12.2017