

А.Ю. ШАМЫНА, А.Д. АРДЯКО, А.К. ЛАБОХА

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Республика Беларусь

Аннотация. В представленной работе рассматривается построение системы поддержки принятия решений в условиях радиационной аварии. Анализируются основные классы аналитических моделей переноса загрязняющих веществ в атмосфере, дозиметрических моделей. Описаны технические детали создания ГИС для полимодельного комплекса.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, ГИС, СППР, метеорологические данные.

Abstract. In the present work, the creation of a decision support system in a radiation accident are considered. The main classes of analytical models of the transport of pollutants in the atmosphere, dosimetric models are analyzed. The technical details of creating a GIS for a polymodel complex are described.

Keywords: radioactive contamination, GIS, DSS, meteorological data.

Введение

В настоящее время растет число объектов, на которых возможны аварии или инциденты с потенциальной опасностью выхода радиоактивных веществ в окружающую среду. Ввиду того, что происшествия на подобных объектах всегда сопровождаются угрозой жизни и здоровью человека, а также большим материальным ущербом, существует потребность в создании систем моделирования подобных происшествий на различных этапах развития аварийной ситуации.

Особый интерес для анализа представляют ситуации, когда имеется дефицит исходных данных для моделирования, что характерно для начальной стадии развития аварийного инцидента. Вместе с этим на данной стадии требуется принятие управленческих решений, которые должны минимизировать негативные последствия. Стоит подчеркнуть, что в этом случае особую значимость приобретает время принятия решения, поскольку от этого будет напрямую зависеть величина ущерба. Моделирование распространения загрязняющих веществ в окружающей среде является трудоемкой задачей, т.к. для этого требуется большое число исходных параметров и расчетов, интерпретация полученных результатов, визуализация и т.д. Поэтому наиболее привлекательным вариантом становится реализация соответствующего программного комплекса, использование которого позволяет свести к минимуму время принятия управленческого решения в текущей ситуации

Определение исходных данных для моделирования

Основной проблемой при прогнозных расчетах последствий аварийных выбросов радионуклидов в атмосферу является выбора исходных данных для проведения моделирования, из которых можно выделить следующие группы:

□ метеопараметры (температура на высоте выброса, категория устойчивости атмосферы, скорость/направление ветра на высоте выброса, вид и интенсивность осадков, коэффициент шероховатости подстилающей поверхности);

□ характеристики облака загрязняющего вещества;

□ радионуклидный состав выброса;

□ распределение активности по размеру частиц в выбросе.

Обзор аварийных сценариев проводился для пяти типов аварий на АЭС (проектные и тяжелые запроектные аварии без плавления активной зоны и с плавлением активной зоны реактора). Аварии выбраны из перечня аварийных ситуаций, представленных в [1], с точки зрения наибольших выбросов радионуклидов в окружающую среду.

Каждый сценарий включает в себя изотопный и фракционный состав выброса, с удельными активностями каждого из изотопов и продолжительностью самого выброса. Следует отметить, что использование данных сценариев при моделировании возможно только при консервативном подходе (ввиду того, что изотопный и фракционный состав будет зависеть от различных факторов: например, от степени «выгорания» ядерного топлива, величины загрузки и др.).

Для модели переноса радиоактивных веществ в атмосфере наиболее критическими являются метеорологические параметры в районе моделирования. Значения этих параметров относятся к изменяемым данным и требуют постоянной актуализации. Метеорологические параметры используются при расчете ключевых значений в модели атмосферного переноса загрязняющих веществ: метеорологический фактор разбавления, высота пограничного слоя атмосферы, тепловой подъем загрязняющих веществ, категория устойчивости атмосферы и т.д.

Поэтому целесообразно в рамках данной работы использовать внешний модуль, который предоставляет интерфейс для импорта актуальных погодных данных. Благодаря этому можно избавиться от зависимости от конкретного поставщика метеорологических данных, что является несомненным преимуществом [2].

Для используемого метеорологического модуля исходными данными служит модель GFS (Global Forecast System), которая разработана американским центром NCEP (National Centers for Environmental Prediction) [3] и предоставляет прогнозы на срок до 16 дней.

При расчете рассеяния возможных аварийных выбросов в атмосферу в районе размещения АЭС всегда учитываются эффекты взаимодействия приземного слоя атмосферы с подстилающей поверхностью. Характеристикой неоднородностей подстилающей поверхности, влияющих на движение воздуха в приземном слое атмосферы, является коэффициент шероховатости z_0 , имеющий размерность длины. Коэффициент шероховатости z_0 тем больше, чем больше средняя высота неровностей. При моделировании динамических параметров пограничного слоя атмосферы неоднородность подстилающей поверхности учитывается с помощью мезомасштабных коэффициентов шероховатости. Для расчета коэффициента шероховатости используются данные о профиле местности [4].

В качестве исходных данных о рельефе были выбраны открытые данные миссии SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Для хранения данных о рельефе местности используется БД PostgreSQL с расширением PostGIS. Подготовленные предварительно данные импортируются в БД.

Поскольку разрабатываемая система имеет модульную структуру, взаимодействия с внешними модулями организовывается на уровне интерфейсов. Реализация работы с модулем рельефа организовывается через веб-интерфейс посредством GET-запроса. Данные передаются в формате JSON

Модель расчета атмосферного переноса радионуклидов

Для локального масштаба на раннем этапе развития аварийной ситуации наиболее подходящим является использование гауссовых моделей атмосферного переноса [5]. Гауссовы модели представляют собой обобщение экспериментальных результатов по диспергированию аэрозолей в атмосфере и предполагают наличие стандартных метеоусловий (подчиняющихся стандартной классификации), квазистабильных на время распространения загрязняющих веществ в атмосфере.

Данная модель позволяет делать прогноз переноса загрязняющих веществ на расстояниях не более 10 км от источника и делать ориентировочную экспресс-оценку переноса на расстояниях не более 30 км [6].

Концептуально в гауссовых моделях предполагается, что рассеивание в атмосфере неоседающего загрязняющего вещества по горизонтали и вертикали происходит по нормальному закону распределения при постоянных направлении и скорости ветра и при условии сохранения устойчивости атмосферы [7].

Модель применима не только для мгновенного и непрерывного источника, но и для источника конечного времени действия. В модели учтены влияние высоты пограничного слоя атмосферы (в зависимости от стратификации), зависимость дисперсии гауссова облака от шероховатости подстилающей поверхности [8].

В обобщенном виде расчет приземной концентрации загрязняющего вещества в атмосфере согласно гауссовой модели осуществляется по формуле (1):

$$C_{\text{ПВК}}(x, y, t) \approx M * F(x) * G_{\text{дл}} * t_s \quad (1)$$

где M – мощность источника, Бк/с; t_s – время действия источника, с; $F(x)$ – функция обеднения источника; $G_{\text{дл}}$ – функция разбавления.

На основе значения приземной концентрации загрязняющего вещества в атмосфере можно произвести расчет плотности выпадения на подстилающую поверхность, обусловленной сухим и влажным фактором выведения.

Плотность выпадений веществ на подстилающую поверхность $D(x, y, t)$ рассчитывается как суперпозиция плотности выпадений за счет влажного D_w и сухого D_d , выведений, что можно записать в следующем виде [9] (2):

$$D(x, y, t) \approx D_d(x, y, t) \approx D_w(x, y, t) \quad (2)$$

Рассчитанные значения плотности выпадений и приземной концентрации используются в дозиметрических моделях для оценки радиационного воздействия на население.

Дозиметрическая модель

Наиболее важным для планирования и проведения защитных мероприятий является оценка воздействия радиоактивных веществ на население. Численными характеристиками, с помощью которых можно оценить это воздействие, являются дозы внешнего и внутреннего облучения. Существуют модели, которые позволяют перейти от приземной концентрации и плотности загрязнения поверхности РВ (радиоактивными веществами), полученных при помощи моделей атмосферного переноса, к дозам внешнего и внутреннего облучения [9].

Доза от облака в приближении полубесконечного пространства рассчитывается по формуле (3):

$$H_{CL, \square}^{ext} \square q_{\text{пвк}} \square v \quad (3)$$

где $q_{\text{пвк}}$, Бк*с*м⁻³ – проинтегрированная по времени концентрация в точке (x,y); V_v – дозовый коэффициент, связывающий мощность дозы излучения с объемной активностью текущего радионуклида.

Доза гамма-излучения от загрязненной радионуклидами бесконечной плоской поверхности рассчитывается по формуле 4:

$$H_s^{ext} \square B_s \square k_{\text{Э}} \int_0^{t_2} D_s dt \quad (4)$$

где D_s , Бк/м2, плотность выпадения радионуклида на местности; B_s – дозовый фактор конверсии; $k_{\text{Э}}$ – коэффициент экранирования, исходя из консервативности прогноза равный по умолчанию 1,0, однако для долгосрочных прогнозов рекомендовано применять равным 0,4.

Доза внутреннего облучения за счет ингаляционного поступления радионуклидов от проходящего облака (5) рассчитывается как произведение проинтегрированной по времени концентрации $q_{\text{пвк}}$, скорости дыхания V_1 и дозового коэффициента V_{inh} :

$$H_{CL}^{inh}(x, y) \square \frac{q_{\text{пвк}} \square V_1 \square V_{inh}}{V} \quad (5)$$

Дозовые коэффициенты определены как максимальные для различных n групп растворимости частиц в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ по выбору коэффициентов при неизвестном составе выброса (по растворимости в легких).

Выработка рекомендаций по принятию контрмер

Результаты моделирования по переносу РВ в атмосфере и расчеты по дозиметрическим моделям служат исходными данными для выработки рекомендаций по тому или иному радиационному инциденту.

Санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы «Гигиенические требования к проектированию и эксплуатации атомных электростанций» [10], утвержденные постановлением Минздрава Республики Беларусь, являются регламентирующим в Республике Беларусь документом, который описывает проведение защитных мероприятий в случае аварии на АЭС.

Положения данного документа (приложения 4 и 12) послужили основой для определения критериев выработки рекомендаций по минимизации последствий радиационной аварии на раннем этапе.

Для определения критерия для принятия решений по дозе внешнего облучения было использовано приложение 12 СанПИН [10], в котором излагаются предельные уровни мощности дозы для принятия решения о проведении защитных мероприятий при радиационных авариях.

Критерии по защитным мероприятиям, описанные выше, используются в данной работе для поддержки принятия управленческого решения в условиях радиационной аварии.

Программная реализация ГИС

Схематично разработанную программную систему моделирования представлена на рисунке 1:

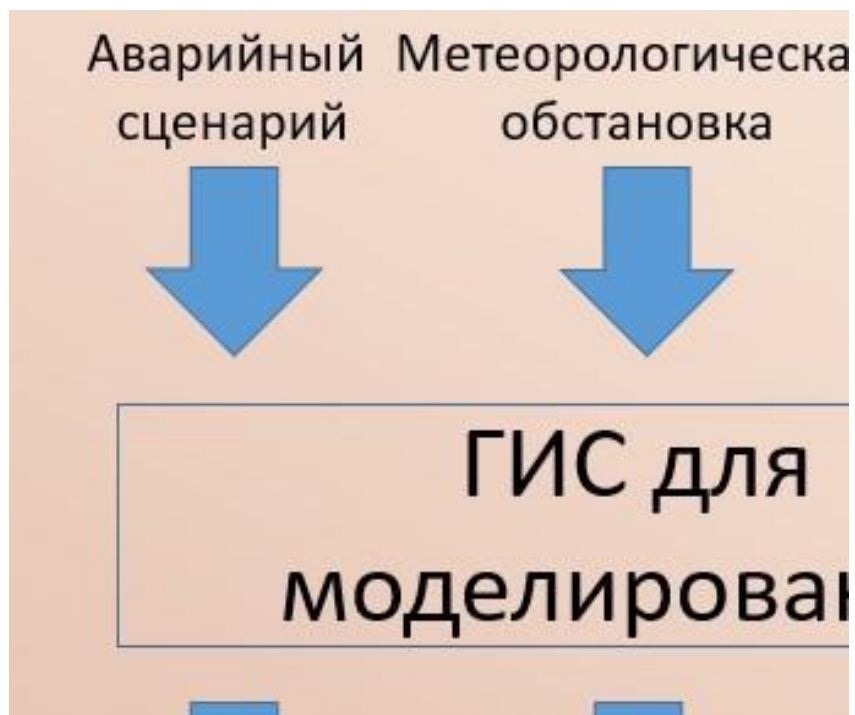


Рисунок 1 – Схематичное представление программной системы моделирования

Основными целевыми ОС, на которых предполагается эксплуатация программного средства, являются Windows 7 и выше. Было принято решение использовать для создания программного средства язык программирования С# и технологию проектирования пользовательского графического интерфейса WPF. Используемая среда разработки Visual Studio 2017.

Осуществление импорта данных с модулей, которые являются исходными для модели переноса РВ в атмосфере, осуществляется посредством протокола прикладного уровня HTTP (модуль рельефа и метеорологический модуль). Это сделано для возможности эксплуатации данных модулей на удаленных машинах.

Верификация на модельных экспериментах

В качестве исходного аварийного сценария был выбран самый негативный сценарий с точки зрения выброса РВ в окружающую среду – предельный аварийный выброс. На рисунке 2 изображен результат моделирования выпадения на подстилающую поверхность в случае реализации указанного сценария для аэрозолей I-131 в направлении 3-го румба, а на рисунке 3 изображен результат аналогичного моделирования в направлении 10-го румба.

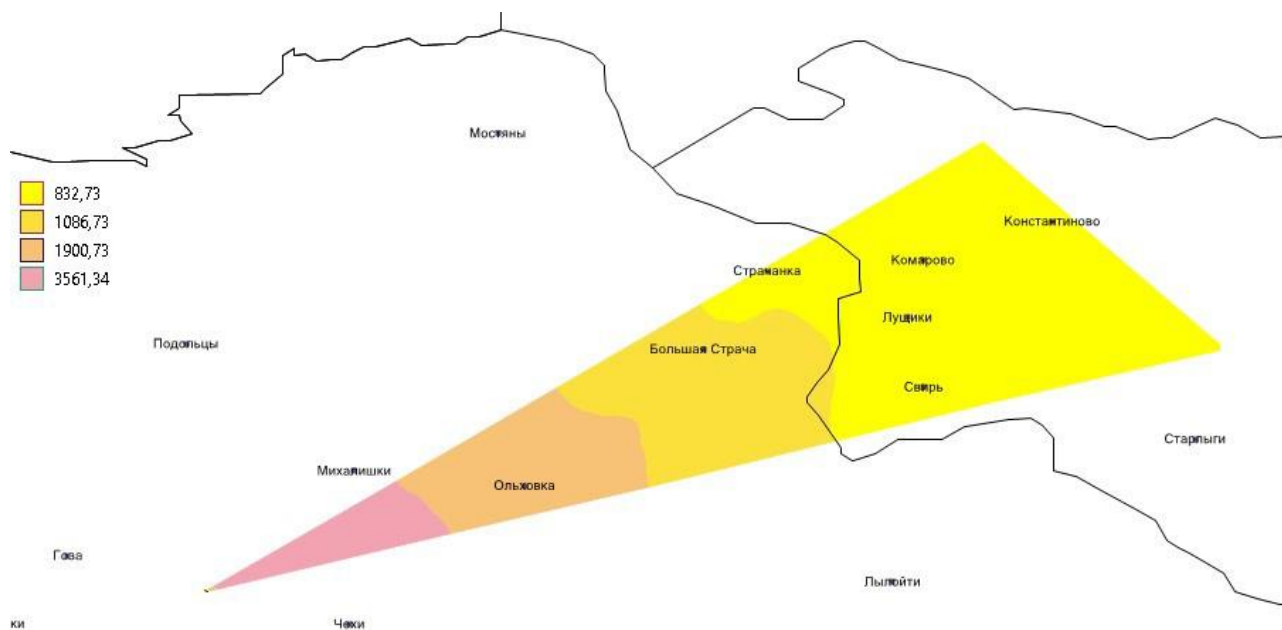


Рисунок 2 – Результат моделирования выпадения на подстилающую поверхность в случае предельного аварийной выброса для аэрозолей I-131 в направлении 3-го румба (Бк/М²)

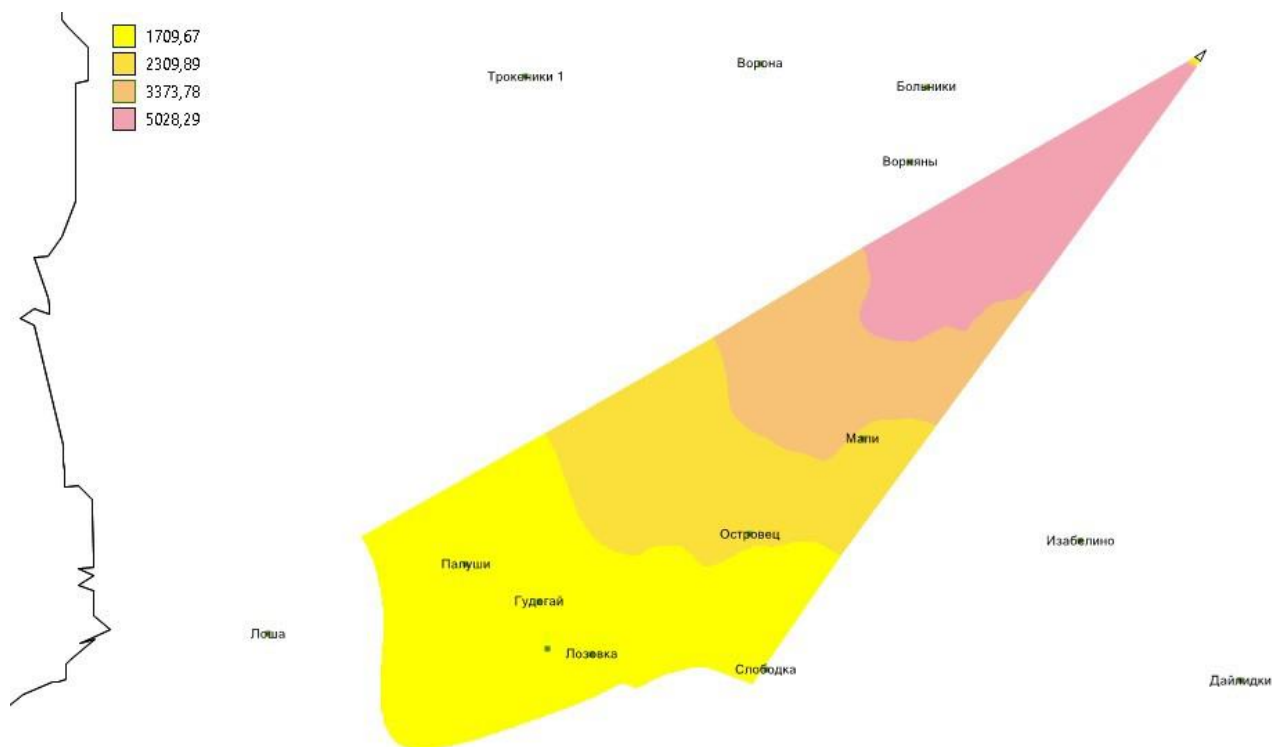


Рисунок 3 – Результат моделирования выпадения на подстилающую поверхность в случае предельного аварийной выброса для аэрозолей I-131 в направлении 10-го румба (Бк/М²)

Анализ расчетных данных выпадений ^{131}I за счет сухого выпадения в случае реализации выбранного аварийного сценария показывает, что максимальные уровни этого радионуклида наблюдаются на расстоянии 2-4-х километров от эпицентра выброса и составляют $0.5 \cdot 10^4$ Бк/м², что на два порядка выше контрольных уровней суммарной бета-активности, при превышении которых проводятся защитные мероприятия (для естественных выпадений из приземного слоя атмосферы эта величина составляет 110 Бк/м²сут). Более того, даже на расстоянии 40 км от АЭС будут наблюдаться уровни выпадений ^{131}I более 400 Бк/м², при которых необходимо проводить защитные мероприятия.

Заключение

В ходе работы была глубоко изучена проблематика исследования: нормативно-правовая база в области обеспечения радиационной безопасности населения в РБ, проектные описания АЭС, физические процессы, происходящие при аварийных ситуациях, моделирование распространения загрязняющих веществ в атмосфере и др.

Результаты, полученные в ходе исследования, могут быть использованы как для проведения исследований в данной области, так могут стать и частью системы аварийного реагирования при эксплуатации АЭС. Имеется перспектива интеграции данного средства моделирования с системами наблюдения (например, АСКРО) для уточнения начальных параметров моделирования. Кроме этого, имеется возможность импорта результатов моделирования исходного изотопного состава и удельных активностей радионуклидов из соответствующих систем.

Данная работа имеет большой потенциал для дальнейших исследований в проблемной области и расширения функциональности созданного программного средства. Возможны улучшения в части скорости проводимых вычислений, использования других моделей и оптимизации реализованных.

Список литературы

7. Белорусская АЭС. Блок 2. Предварительный отчет по обоснованию безопасности. Глава 15. Анализ аварий. Книга 7. БЛ-02065пм, ОАО «НИАЭП», 2013 г
8. Лабоха, А. К. Сравнительный анализ моделей прогнозирования погоды / А. К. Лабоха // Компьютерные системы и сети: 55-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22-26 апреля 2019 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2019. – С. 115 – 117.
9. National Centers for Environmental Prediction [Электронный ресурс]. – 2019 – Режим доступа: <https://www.ncep.noaa.gov/> – Дата доступа: 23.03.2019
10. Steven R. Hanna, Gary A. Briggs, Rayford P. Hosker, Jr. Handbook on atmospheric diffusion. Atmospheric Turbulence and diffusion laboratory National Oceanic and Atmospheric Administration. Technical information center US department of energy, 1982. – 110 с
11. Методы расчета распространения радиоактивных веществ в окружающей среде и доз облучения населения. МХО ИНТЕРАТОМЭНЕРГО, М., 1992
12. Шамына А. Ю. Разработка геоинформационной системы для прогнозирования распространения радионуклидов в окружающей среде / А. Д. Ардяко, Лабоха А.К., А. Ю. Шамына // Безопасность человека и общества: совершенствование системы реагирования и управления защитой от чрезвычайных ситуаций: сб. материалов II Международной очной научно-практической конференции. – Минск: УГЗ, 2018. – 199 – 200 с.

13. Методика расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах. РД 52.18.717-2009. Обнинск, ООО «ПРИНТ-СЕРВИС» – 2009
14. Шамына, А. Ю. Программное средство для моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде на основе гауссовой модели / А. Ю. Шамына, А. Д. Ардяко // Информационные технологии и системы 2018 (ИТС 2018) = Information Technologies and Systems 2018 (ITS 2018) : материалы международной научной конференции, Минск, Беларусь, 25 октября 2018 года. – Минск: БГУИР, 2018. – С. 182 – 183.
15. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1986, 224 с
16. Санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы «Гигиенические требования к проектированию и эксплуатации атомных станций», утвержденные постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь № 39 от 30 марта 2010 г

References

1. Belorusskaya AES. Blok 2. Predvaritel'nyj otchet po obosnovaniyu bezopasnosti. Glava 15. Analiz avarij. Kniga 7. BL-02065pm, ОАО «НИАЕР», 2013.
2. Laboha, A. K. Sravnitel'nyj analiz modelej prognozirovaniya pogody / A. K. Laboha // Komp'yuternye sistemy i seti: 55-ya yubilejnaya nauchnaya konferenciya aspirantov, magistrantov i studentov, Minsk, 22-26 aprelya 2019 g. / Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki. – Minsk, 2019. – p. 115 – 117
3. NCEP Data Products GFS and GDAS [Electronic resource] – 2019. – Access mode: <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>. – Access date: 10/07/2011
4. Steven R. Hanna, Gary A. Briggs, Rayford P. Hosker, Jr. Handbook on atmospheric diffusion. Atmospheric Turbulence and diffusion laboratory National Oceanic and Atmospheric Administration. Technical information center US department of energy, 1982. – p. 110
5. Metody rascheta rasprostraneniya radioaktivnyh veshchestv v okruzhayushchej srede i doz oblucheniya naseleniya. MHO INTERATOMENERGO, M., 1992
6. Shamyna A. Y. Razrabotka geoinformacionnoj sistemy dlya prognozirovaniya rasprostraneniya radionuklidov v okruzhayushchej srede / A. D. Ardyako, Laboha A.K, A. YU. SHamyna // Bezopasnost' cheloveka i obshchestva: sovershenstvovanie sistemy reagirovaniya i upravleniya zashchitoj ot chrezvychajnyh situacij: sb. materialov II Mezhdunarodnoj ochnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – Minsk: UGZ, 2018. – p. 199 – 200
7. Metodika rascheta rasseyaniya zagryaznyayushchih veshchestv v atmosfere pri avarijnyh vybrosah. RD 52.18.717-2009. Obninsk, ООО «ПРИНТ-СЕРВИС» -- 2009
8. Shamyna, A. Y. Software for modeling the distribution of radionuclides in the environment based on a Gaussian model / A. Y. Shamyna, A.D. Ardyako // Information Technologies and Systems 2018 (ITS 2018) = Information Technologies and Systems 2018 (ITS 2018): Proceedings of the international scientific conference, Minsk, Belarus, October 25, 2018. – Minsk: BSUIR, 2018. -- p. 182 – 183
9. Gusev N.G., Belyaev V.A. Radioaktivnye vybrosy v biosfere: Spravochnik. M.: Energoatomizdat, 1986, 224 s
10. Sanitarnye normy, pravila i higienicheskie normativy «Gigienicheskie trebovaniya k proektirovaniyu i ekspluatatsii atomnyh stancij», utverzhdennye postanovleniem Ministerstva zdavoohraneniya Respubliki Belarus' № 39 ot 30 marta 2010 g

Сведения об авторах

Information about the authors

Шамына А.Ю., аспирант и ассистент кафедры ПОИТ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ардяко А.Д., аспирант кафедры ПОИТ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Лабоха А.К., магистрант и ассистент кафедры ПОИТ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220005, Беларусь, Минск, ул. Гикало, 9,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. + 375 17 293-84-93;
e-mail: shamyna@bsuir.by
Шамына Артём Юрьевич

Shamyna A.Y., post-graduate student and assistant of Information Technologies Software sub-department, BSUIR.

A.D. Ardyako, post-graduate student of Information Technologies Software sub-department, BSUIR.

Labokha A.K., graduate student and assistant of Information Technologies Software sub-department, BSUIR.

Address for correspondence

220005, Belarus, Minsk, Gikalo st, 9,
Belarussian state university of informatics
and radioelectronics
tel. + 375 17 293-84-93;
e-mail: shamyna@bsuir.by
Artyom Shamyna