

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 551.51

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОГО ПЕРЕНОСА ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ
ПРИ ОЦЕНКАХ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ**

В. П. Корячко, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой САПР ВС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-0272-673X, e-mail: koryachko.v.p@rsreu.ru

В. А. Минаев, д.т.н., профессор, профессор кафедры специальных информационных технологий
МосУ МВД России, Москва, Россия;
orcid.org/0000-0002-5342-0864, e-mail: mlva@yandex.ru

Р. О. Степанов, к.т.н., доцент, директор Дирекции по Арктическим программам МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия;
orcid.org/0000-0001-9124-5924, e-mail: stepanovr@bmstu.ru

А. О. Фаддеев, д.т.н., доцент, главный научный сотрудник Дирекции по Арктическим программам
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;
orcid.org/0000-0002-7259-1693, e-mail: fao1@mail.ru

В рамках разработки и реализации метода оценки техногенного риска решались три ключевые задачи – построение траектории движения облака, насыщенного парами опасного химического вещества; моделирование диссипации этого облака; оценка техногенного риска вдоль траектории движения облака. Целью работы является построение нового численного метода оценки техногенного риска в результате ветрового переноса и диссипации опасных химических веществ. Показаны этапы реализации алгоритма расчета риска. Произведена имитация пространственного распространения опасных последствий условного техногенного события, произошедшего в Арктической зоне. Делается вывод, что предложенный подход может быть адаптирован к модельному описанию выбросов в атмосферу радиоактивных веществ, экологическому загрязнению местности в результате масштабных промышленных и геологических разработок, геодинамических катастроф.

Ключевые слова: техногенный риск, Арктическая зона, моделирование, оценка, опасное химическое вещество, ветровой перенос, поле скорости ветра, траектория движения облака.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-112-117

Введение

Арктическая зона России, простирающаяся от Мурманской области до Чукотки, является одним из последних сохранившихся с древнейших времен экорегионов Земли, наиболее чувствительных к негативным техногенным факторам, таким как масштабные воздействия при реализации нефтегазовых проектов, влияние стремительного развития транспортной, энергетической, промышленной и жилищной инфраструктуры, что требует новых подходов при разработке методов управления техногенными рисками.

В настоящей статье смоделирован условный сценарий – при заходе на посадку в арктический аэропорт потерпел катастрофу транспортный самолёт, перевозящий опасное химическое вещество, которое в разогретом состоянии было выброшено в атмосферу. Под действием ветра образовавшееся опасное облако начало перемещаться по территории арктического района, формируя по пути своего следования опасную зону техногенного риска.

В рамках разработки и реализации нового метода оценки техногенного риска, применительно к арктическим территориям, решались три ключевые задачи – построение траектории движе-

ния облака, насыщенного парами опасного химического вещества; моделирование диссипации этого облака; собственно оценка техногенного риска вдоль траектории движения облака.

Теоретические исследования

Рассмотрим задачу построения траектории движения облака. Пусть в начальный период времени некоторая фиксированная точка характеризует центр облака в пространстве с начальными координатами $M_0(\lambda_0, \varphi_0)$, где λ_0 – долгота, φ_0 – широта. Координаты центра облака вдоль траектории своего движения при этом задаются в соответствии с выражениями:

$$\begin{cases} \lambda_i = \lambda_{i-1} + \Delta\lambda_i, \\ \varphi_i = \varphi_{i-1} + \Delta\varphi_i, \end{cases} \quad (1)$$

где $\Delta\lambda_i$ и $\Delta\varphi_i$ – изменения координат центра облака вдоль траектории его движения под действием ветровых потоков; $i = 1; \dots; n$.

Для определения новых координат центра облака, спустя некоторый промежуток времени Δt , необходимо знать его предыдущие координаты и изменения координат за тот же промежуток. При практической реализации модели принято, что направление и скорость ветра за промежуток Δt не должны изменяться более, чем на 5%. Шаг сетки по долготе и широте принимается равным $0,01^\circ$. В таком случае координаты центра облака в некоторый момент времени t_i будут определяться в градусной мере в соответствии с соотношениями [1, 2]:

$$\begin{cases} \lambda_i(t_i) = \lambda_{i-1}(t_{i-1}) + \frac{0,01V_{\lambda}^{(i-1)}(t_{i-1})\Delta t}{\Delta\phi \cdot \cos\varphi_{i-1}}, \\ \varphi_i(t_i) = \varphi_{i-1}(t_{i-1}) + \frac{0,01V_{\varphi}^{(i-1)}(t_{i-1})\Delta t}{\Delta\phi}, \end{cases} \quad (2)$$

где $V_{\lambda}^{(i)}(t_i)$ и $V_{\varphi}^{(i)}(t_i)$ – скорости ветра в некоторый момент времени t_i в долготном и широтном направлениях, соответственно; $\Delta\phi = 1111,11$ метров.

Рассмотрим теперь задачу о диссипации облака.

В работах, посвящённых исследованиям опасных техногенных явлений и их последствий, приводятся соотношения, позволяющие оценить размеры облаков, например в [1]:

$$L(t) = 0,011 \left(\frac{Q_0 g (\rho_r - \rho_a)}{\rho_a} \right)^{0,25} \cdot t^{0,5}, \quad (3)$$

где Q_0 – начальный объём облака, вычисляемый по соотношению $Q_0 = \pi L_0^3 / 8$ (L_0 – первоначальный радиус облака); g – ускорение свободного падения; ρ_r – плотность облака; ρ_a – плотность атмосферы; t – время.

Вследствие процессов конвекции и диффузии облачные массы начинают диссипировать, облако «расползается» в пространстве [1, 2]. При этом оно ещё и подчиняется воздействиям ветровых потоков. Поэтому необходимо рассчитывать техногенные риски не только непосредственно вдоль траектории движения центра облака, но и на его границе.

Расчёт координат точек границы облака выполняется по формулам, аналогичным соотношениям системы (1), а вот для вычисления приращений долгот $\Delta\lambda_i^{(k)}$ и широт $\Delta\varphi_i^{(k)}$ необходимо вычислить величины проекций перемещения облака на оси $X - u_i^{(k)}$ и $Y - w_i^{(k)}$ в системе координат, связанной с траекторией его движения (рисунок 1):

$$\begin{cases} u_i^{(k)}(t_i) = \delta_i(t_i) \cdot \cos\theta_k, \\ w_i^{(k)}(t_i) = \delta_i(t_i) \cdot \sin\theta_k, \end{cases} \quad (4)$$

где δ_i – истинный радиус облака в некоторый момент времени t_i , определяемый в соответствии с выражениями $\delta_i(t_i) = S_i(t_i) + L_i(t_i)$; $S_i(t_i) = V_i(t_i)\Delta t$.

Переходя от системы координат XY , связанной с траекторией движения облака, к системе координат долгота – широта ($\lambda-\varphi$), учитываем величины проекций скорости ветра на ось долготы $V_\lambda^{(i)}$ и ось широты $V_\varphi^{(i)}$ посредством расчёта величины угла поворота α (для i -й точки):

$$\alpha_i(t_i) = \operatorname{arctg} \left| \frac{V_\lambda^{(i)}(t_i)}{V_\varphi^{(i)}(t_i)} \right|. \quad (5)$$

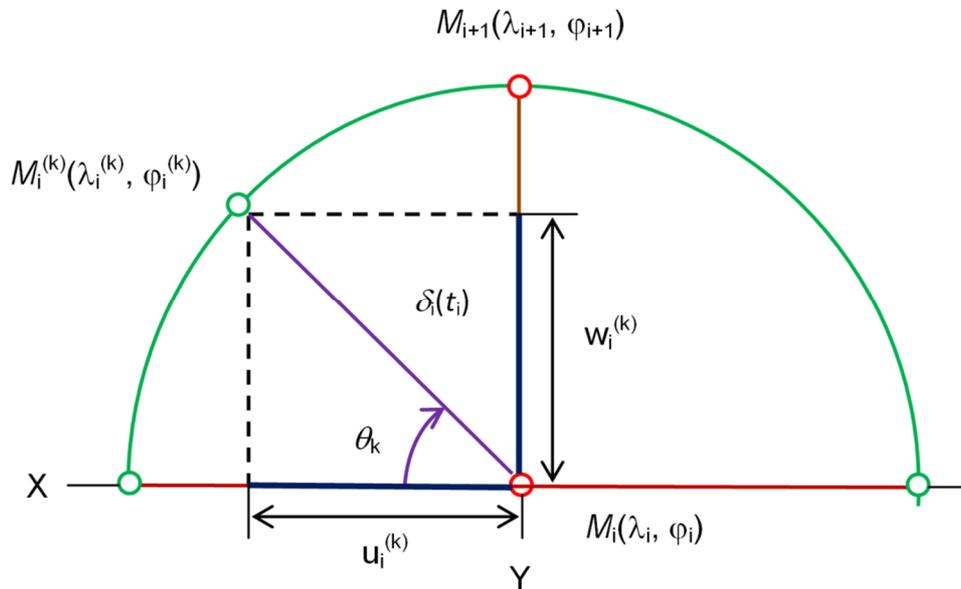


Рисунок 1 – Схема вычисления перемещений $u_i^{(k)}$ и $w_i^{(k)}$

Figure 1 – Displacement calculation scheme $u_i^{(k)}$ and $w_i^{(k)}$

Тогда в системе координат долгота – широта в момент времени t_i проекции смещений $\tilde{u}_i^{(k)}$ на ось долгот и $\tilde{w}_i^{(k)}$ на ось широт находятся из выражений:

$$\begin{cases} \tilde{u}_i^{(k)}(t_i) = u_i^{(k)}(t_i) \cdot \cos \alpha_i(t_i) + w_i^{(k)}(t_i) \cdot \sin \alpha_i(t_i), \\ \tilde{w}_i^{(k)}(t_i) = -u_i^{(k)}(t_i) \cdot \sin \alpha_i(t_i) + w_i^{(k)}(t_i) \cdot \cos \alpha_i(t_i). \end{cases} \quad (6)$$

Учитывая приращения по долготе $\Delta\lambda_i^{(k)}$ и широте $\Delta\varphi_i^{(k)}$ для момента времени t_i и диссипацию облака, получаем окончательные выражения для координат центра облака:

$$\begin{cases} \lambda_i(t_i) = \lambda_{i-1}(t_{i-1}) + \frac{0.01[V_{i-1}(t_{i-1})\Delta t + L_{i-1}(t_{i-1})]}{\Delta\phi \cdot \cos \varphi_{i-1}} \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \left| \frac{V_\lambda^{(i-1)}(t_{i-1})}{V_\varphi^{(i-1)}(t_{i-1})} \right| \right], \\ \varphi_i(t_i) = \varphi_{i-1}(t_{i-1}) + \frac{0.01[V_{i-1}(t_{i-1})\Delta t + L_{i-1}(t_{i-1})]}{\Delta\phi} \cdot \sin \left[\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \left| \frac{V_\lambda^{(i-1)}(t_{i-1})}{V_\varphi^{(i-1)}(t_{i-1})} \right| \right]. \end{cases} \quad (7)$$

Задача оценки техногенного риска вдоль траектории движения облака. В основу оценки изменения величины техногенного риска положено время существования облака η :

$$\eta = \frac{100L_0}{\sqrt{gh_0 \cdot (\rho_r - \rho_a) / \rho_r}}, \quad (8)$$

где L_0 – первоначальный радиус облака; g – ускорение свободного падения; h_0 – высота начального облака; ρ_r – плотность облака; ρ_a – плотность атмосферы [1, 2].

Формула для расчёта величины техногенного риска R_{T_i} (для его положительных значений) в момент времени t_i в точке с координатами (λ_i, φ_i) будет иметь вид [2]:

$$R_{T_i}(t_i) = R_{T_0} \cdot \left(1 - \frac{t_i}{\eta}\right), \quad (9)$$

где R_{T_0} – величина техногенного риска в начальный момент времени t_0 , соответствующий началу движения облака, образовавшегося при опасном техногенном событии; η – время существования облака, определяемое в соответствии с соотношением (8).

Для моделирования поля скорости ветра использована следующая система уравнений [2]:

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} = \ell V_y - R_\mu \cdot T'_x, \\ \frac{dV_y}{dt} = -\ell V_x - R_\mu \cdot T'_y, \end{cases} \quad (10)$$

где $T'_x = \frac{\partial T}{\partial x}$; $T'_y = \frac{\partial T}{\partial y}$; $R_\mu = \frac{R}{m_\mu}$; m_μ – молярная масса; R – универсальная газовая постоянная; T – температура атмосферного воздуха; V_x , V_y – проекции скорости ветра на координатные оси X , Y соответственно; ℓ – параметр Кориолиса, определяемый из соотношения $\ell = 2\omega \cdot \sin \varphi$; $\omega = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ – угловая скорость вращения Земли; φ – широта местности.

Запишем уравнения этой системы для некоторой точки (x, y) применительно к фиксированному моменту времени t_0 в виде малых приращений:

$$\begin{cases} \frac{\Delta V_x(t_0)}{\Delta t} + R_\mu T'_x(t_0) - \ell V_y(t_0) = \varepsilon_x(t), \\ \frac{\Delta V_y(t_0)}{\Delta t} + R_\mu T'_y(t_0) + \ell V_x(t_0) = \varepsilon_y(t), \end{cases} \quad (11)$$

где $\varepsilon_x(t)$ и $\varepsilon_y(t)$ – некоторые бесконечно малые величины.

Преобразовывая систему уравнений (11) и обозначая через $O_x(t) = \varepsilon_x(t)\Delta t$ и $O_y(t) = \varepsilon_y(t)\Delta t$, получаем:

$$\begin{cases} V_x(t_0 + \Delta t) = V_x(t_0) + [\ell V_y(t_0) - R_\mu T'_x(t_0)] \cdot \Delta t + O_x(t), \\ V_y(t_0 + \Delta t) = V_y(t_0) - [\ell V_x(t_0) + R_\mu T'_y(t_0)] \cdot \Delta t + O_y(t). \end{cases} \quad (12)$$

Согласно (12), если имеется информация о значениях скорости ветра и градиенте температур в некоторой точке (x, y) в начальный момент времени t_0 , то можно вычислить значение скорости ветра в момент времени $t = t_0 + \Delta t$.

Система уравнений, представляющая собой реализацию численного метода Эйлера [3, 4], является математической моделью поля скоростей ветра.

Экспериментальные исследования

Для имитации пространственного распространения опасных последствий техногенного события, произошедшего в Арктической зоне, использована реальная метеорологическая информация о скорости и направлении ветра в районе аэропорта Тикси для условного начального момента времени – 00 ч 00 мин 15.04.21.

Для расчёта значений проекций скорости ветра на оси долгот и широт в произвольный момент времени t_i использовался модифицированный вариант системы уравнений (12):

$$\begin{cases} V_\lambda(\lambda_i, \phi_i, t_{i+1}) = V_\lambda(\lambda_i, \phi_i, t_i) + [\ell V_\phi(\lambda_i, \phi_i, t_i) - R_\mu T'_\lambda(\lambda_i, \phi_i, t_i)] \cdot \Delta t + O_\lambda(t), \\ V_\phi(\lambda_i, \phi_i, t_{i+1}) = V_\phi(\lambda_i, \phi_i, t_i) - [\ell V_\lambda(\lambda_i, \phi_i, t_i) + R_\mu T'_\phi(\lambda_i, \phi_i, t_i)] \cdot \Delta t + O_\phi(t). \end{cases} \quad (13)$$

Численные оценки показали, что общее время существования опасного облака η составляет около 17 ч 30 мин. Кроме того, оценки, выполненные для всех трёхчасовых временных

интервалов в течение суток 15.04.21, привели к выводу, что за величину длительности промежуточных временных отсчетов следует принять $\delta t = 10$ мин.

На рисунке 2 представлены результаты оценки техногенного риска, возникающего из-за движения (в результате ветровых и диссипационных воздействий) над исследованной арктической территорией облака, насыщенного опасными химическими веществами.

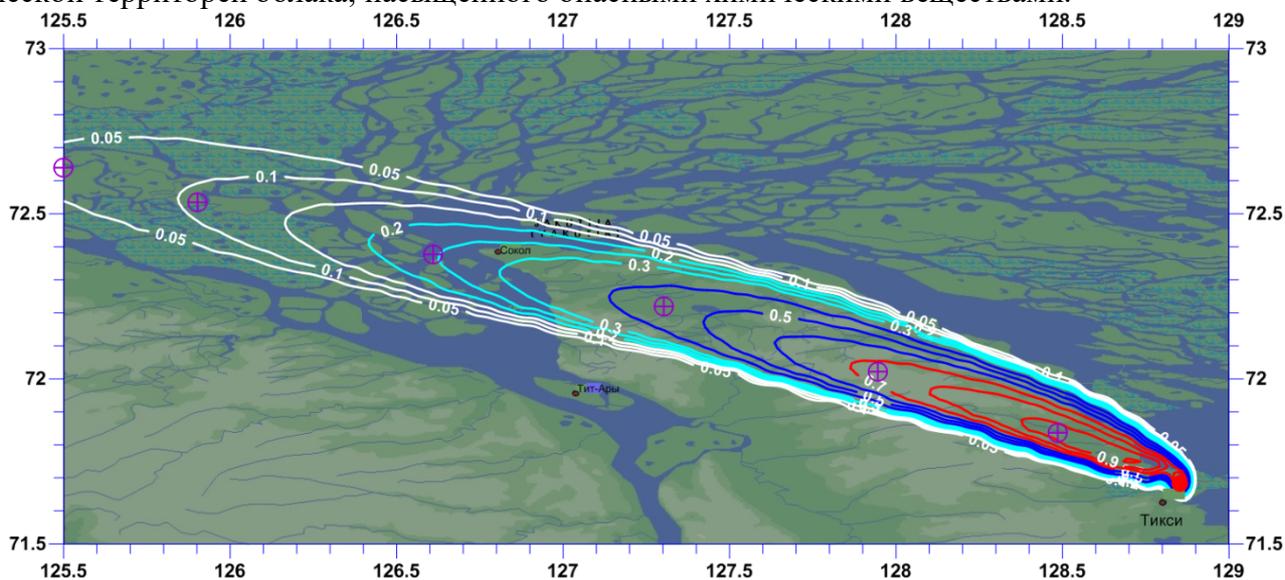


Рисунок 2 – Результаты реализации численного метода оценки техногенного риска для участка исследуемой территории Арктической зоны
Figure 2 – Results of the implementation of a numerical method for assessing technogenic risk for a section of the Arctic zone territory studied

Из рисунка 2 следует, что ядовитое химическое облако, образовавшееся в результате произошедшего опасного техногенного события, в процессе своего движения под действием ветра и диссипации оставляет след из выпадающих ядовитых осадков, протянувшийся в северо-западном направлении, формируя зону техногенного риска.

Окружностями с перекрестием обозначены положения центра облака с интервалами в 3 часа от момента формирования опасного облака. То есть через 3 часа и 6 часов, прошедших с момента формирования заражённого облака, техногенный риск вдоль траектории движения облака очень велик (зона, ооконтуренная линиями со значениями риска 0,7 – 0,9). Через 9 часов величина риска вдоль траектории движения спадает до величины примерно 0,45, через 12 часов от момента формирования облака техногенный риск уменьшается до величины 0,25 вдоль траектории его движения. Соответственно через 15 часов от момента реализации опасного техногенного события риск составляет величину всего 0,1, а ещё через 2 часа 20 минут и вовсе спадает до минимальных значений.

Заклучение

В статье рассмотрено построение нового численного метода оценки техногенного риска, возникающего в результате ветрового переноса и диссипации опасных химических веществ. Показаны этапы реализации алгоритма расчета риска и результаты имитационного моделирования пространственного распространения риска для ограниченной территории Арктической зоны Российской Федерации. Предложенный подход может быть достаточно легко адаптирован и к модельному описанию выбросов в атмосферу радиоактивных веществ, экологическому загрязнению местности любого региона в результате масштабных промышленных и геологических разработок, геодинамических катастроф [5].

Библиографический список

1. **Britter R. E.** Atmospheric dispersion of dense gases. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1989, vol. 21, pp.317-344.
2. **Газовая динамика.** Избранное. Издание второе, исправленное / Редактор-составитель А. Н. Крайко. М.: Физматлит, 2005. Т. 1. 720 с.
3. **Калиткин Н. Н.** Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
4. **Математическое моделирование** / Под ред. А. Н. Тихонова, В. А. Садовниченко и др. М.: Физматлит, 2005. 316 с.
5. **Минаев В. А., Степанов Р. О., Фаддеев А. О.** Арктические риски: моделирование, комплексная оценка, управление: монография. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. 538 с.

UDC 551.51

SIMULATION OF DANGEROUS SUBSTANCES WIND TRANSPORT WHEN ASSESSING TECHNOGENIC RISK IN ARCTIC ZONE

V. P. Koryachko, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0003-0272-673X, e-mail: koryachko.v.p@rsreu.ru

V. A. Minaev, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Moscow, Russia; orcid.org/0000-0002-5342-0864, e-mail: mlva@yandex.ru

R. O. Stepanov, Ph.D. (Tech.), associate professor, Director of the Directorate for Arctic Programs, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia; orcid.org/0000-0001-9124-5924, e-mail: stepanovr@bmstu.ru

A. O. Faddeev, Dr. Sc. (Tech.), associate professor, Directorate for Arctic Programs, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia; orcid.org/0000-0002-7259-1693, e-mail: fao1@mail.ru

As part of the development and implementation of technogenic risk assessment method, three key tasks were solved: constructing the trajectory of a cloud saturated with vapors of dangerous chemical substance; modeling the dissipation of this cloud; assessing the technogenic risk along the trajectory of cloud movement. The aim of the work is to construct a new numerical method for assessing technogenic risk as a result of wind transport and dissipation of hazardous chemicals. The stages of implementing risk calculation algorithm are shown. The simulation of spatial distribution of dangerous consequences of a conditional man-made event that occurred in the Arctic zone was carried out. It is concluded that the proposed approach can be adapted to the model description of radioactive substances emissions into the atmosphere, environmental pollution of the area as a result of large-scale industrial and geological developments, geodynamic disasters.

Key words: *technogenic risk, Arctic zone, modeling, assessment, hazardous chemical, wind transport, wind speed field, cloud movement trajectory.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-112-117

References

1. **Britter R.E.** Atmospheric dispersion of dense gases. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1989, vol. 21, pp.317-344.
2. *Gazovaya dinamika* (Gas dynamics). Izbrannoe. Izdanie vtoroje, ispravlennoe / Redaktor-sostavitel' **A. N. Krajko**. Moscow: Fizmatlit. 2005, vol. 1. 720 p. (in Russian).
3. **Kalitkin N. N.** *Chislennyye metody* (Numerical methods). Moscow: Nauka. 1978. 512 p. (in Russian).
4. *Matematicheskoe modelirovanie* (Mathematical modeling) / Edited by **A. N. Tikhonov, V. A. Sadovnichy** and others. Moscow: Fizmatlit. 2005. 316 p. (in Russian).
5. **Minaev V. A., Stepanov R. O., Faddeev A. O.** *Arkticheskie riski: modelirovanie, kompleksnaya ocenka, upravlenie* (Arctic risks: modeling, integrated assessment, management): monograph. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Baumana, 2022. 538 p. (in Russian).