С. В. Иванникова

*Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090, Россия*

s.ivannikova@g.nsu.ru

**РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАРИЯ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНОГО МЕГАПРОЕКТА
НА ПРИМЕРЕ ТРАНСКОНТИНЕНТАЛЬНОЙ МАГИСТРАЛИ
ЧЕРЕЗ БЕРИНГОВ ПРОЛИВ**

Основной целью данного исследования является развитие методического подхода к комплексному анализу экологического воздействия процессов, сопряженных со строительством и эксплуатацией транспортных магистралей, и разработка соответствующего инструментария. Рассматриваются возможности разрабатываемого инструментария для оценки следующих экологических воздействий, которые влияют на экологическую безопасность регионов: атмосферное, антропогенное, электромагнитное, воздействие на водные ресурсы, оценка объема выделяемого парникового газа и количества потребляемой энергии. Продемонстрированы возможности технологии машинного обучения для данного типа проблем на примере прогнозирования объема парникового газа и энергии, потребляемой высокоскоростной железной дорогой.

Ключевые слова: моделирование экологического ущерба, экологическая безопасность, уравнение турбулентной диффузии, моделирование океанических течений, машинное обучение.

Введение

Формирование глобальной железнодорожной сети сопряжено с рядом уникальных инфраструктурных проектов, одним из которых является проект трансконтинентальной магистрали (ТКМ) через Берингов пролив. В рамках этого проекта намечается строительство объектов, относящихся к разным инфраструктурным системам:

- 1) *энергетической* (линии электропередач);
- 2) *транспортной* (железнодорожные пути, автомобильные дороги);
- 3) *информационной* (телекоммуникационные связи);
- 4) *системе трубопроводов* (нефте- и газопроводы для экспорта углеводородов).

Само по себе сочетание таких сложных объектов порождает различные экологические воздействия, которые требуют тщательной экспертной оценки на предмет экологической безопасности еще на этапе проектирования. Все это обуславливает потребность уточнения методического подхода и разработки инструментария, позволяющего проводить опережающую оценку экологических последствий, которые могут сопровождать строительство и эксплуатацию транспортных магистралей.

Унифицированного подхода к решению задач оценки экологической безопасности подобных мегатранспортных проектов не существует в силу их сложности и уникальности. Полученное в ходе исследования решение применимо для оценок при строительстве и эксплуатации менее сложных проектов, так как множество учитываемых факторов покрывает большое

Иванникова С. В. Разработка инструментария для оценки экологического воздействия при реализации транспортного мегапроекта на примере ТКМ через Берингов пролив // Вестн. НГУ. Серия: Информационные технологии. 2017. Т. 15, № 2. С. 27–33.

количество возникающих на сегодняшний день задач. В перспективе предполагается расширить разработанную программную систему с целью использования на различных примерах, параметры которых заданы пользователем.

В результате анализа существующих проблем в качестве наиболее актуальных для оценки факторов были выявлены: расчет объема и моделирование распространения веществ, загрязняющих атмосферный воздух; поле влияния электромагнитного излучения от линий электропередач; смещение ареала обитания животных в связи с появлением магистрали; влияние эксплуатации ТКМ на водные ресурсы; парниковый эффект, возникающий в результате эксплуатации высокоскоростной железной дороги; а также оценка количества энергии, потребляемой высокоскоростной железной дорогой.

Моделирование осуществляется с помощью различных методов и их комбинаций. Полученные математические модели ориентированы на использование в составе автоматизированной системы управления процессом загрязнения окружающей среды в зоне ТКМ.

Компонентная модель программной системы

Для изучения и оценки негативных последствий воздействия строительства и эксплуатации ТКМ возникла необходимость организации специальной системы контроля (наблюдения) и анализа состояния окружающей среды, в первую очередь из-за различного рода загрязнений и эффектов, вызванных ими. Сказанное позволяет представить следующим общую структуру модели (см. рисунок).

Система состоит из 5 модулей:

- 1) модуль визуализации схемы рассеивания загрязняющих атмосферный воздух веществ;
- 2) модуль диагностики экологической безопасности водных ресурсов;
- 3) модуль оценки антропогенного воздействия на ареалы обитания животных и территории произрастания растений;
- 4) модуль визуализации зоны электромагнитного воздействия;
- 5) модуль прогнозирования объема парникового газа, выделяемого при эксплуатации высокоскоростной железной дороги, и количества потребляемой энергии.

Разработка программной системы велась с учетом следующих требований: а) проведение расчетов за период времени, задаваемый исследователем; б) формирование текстовых отчетов по всем факторам экологической безопасности; в) использование общепринятого формата данных при генерации протоколов; г) оперативный ввод данных, необходимых для проведения анализа и др.; д) контроль данных при вводе для исключения некорректных данных или данных, которые не подлежат обработке расчетными модулями программной системы; е) возможность проведения «усредненных» расчетов с использованием исключительно справочных значений без учета особенности региона; ж) «открытость» тех данных, на основании которых получают те или иные результаты.

Компонентная модель системы

Введение этих требований было обусловлено спецификой данного типа задач. Оперативный ввод данных пользователем позволяет избежать избыточности (пользователь вводит информацию, необходимую исключительно для работы определенного модуля), что также снижает трудоемкость процесса работы с программой и экономит время пользователя.

Это предопределило особенности разработки отдельных модулей. Так, модули расчета выбросов в атмосферный воздух, оценки антропогенного воздействия, модуль прогнозирования объема парникового газа и потребляемой энергии позволяют варьировать период, за который нужно произвести расчет. Протоколы расчета формируются в файлы с расширением *.html – общепринятый формат данных. Последнее позволяет открывать файлы отчетов с корректным отображением представляемой информации без использования специфического программного обеспечения.

Интерфейс программы не перегружен, это позволяет легко включиться в работу начинающему пользователю. Для облегчения работы с программой реализована функция «Помощник», благодаря которой пользователь на любом этапе работы с программой может ознакомиться с информацией о функциональных особенностях программной системы и методиках расчетов. Ввод данных организован таким образом, что пользователь не имеет возможности ввести заведомо некорректные данные

Модуль визуализации схемы рассеивания загрязняющих атмосферный воздух веществ

Данный модуль позволяет пользователю не только провести оценку ожидаемых показателей по объему и качественному составу выброса загрязняющих веществ, но и получить наглядную картографическую визуализацию результатов расчетов, помимо привычных таблиц.

При разработке этого модуля из различных типов используемых моделей было принято решение использовать комбинацию моделей на основе Гауссова распределения концентраций и «транспортных моделей», в основу которых положено уравнение турбулентной диффузии. Представляется, что эти методы оценки изменения состава воздушного бассейна на территории эксплуатации ТКМ позволяют более точно оценить изменение концентрации загрязняющих веществ и выявить источники, влияние которых существенно увеличивает риск нанесения вреда здоровью [3].

При расчетах было использовано аппроксимированное уравнение турбулентной диффузии. Таким образом, максимальная концентрация загрязняющего вещества ($C_{\max}$) определяется при помощи следующего аналитического выражения:

$$C_{\max} = \frac{1 + 0,45 \frac{L}{x'_{\max}}}{1 + 0,45 \frac{L}{x'_{\max}} + 0,1 \left(\frac{L}{x'_{\max}} \right)^2} \frac{AMF_{mn\eta}}{H^2 \sqrt[3]{V \Delta T}},$$

где

$C_{\max}$ – наибольшая концентрация вредной примеси (мг/м³),

L – длина линейного источника (м),

A – безразмерный коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы,

M – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени (г/с),

$F_{mn\eta}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе с учетом условий выхода газовой смеси из устья источника выброса и влияния рельефа местности,

H – высота источника выброса над уровнем земли (м),

ΔT – разность между температурой выбрасываемой газовой смеси и температурой окружающего атмосферного воздуха (°C),

$x'_{\max}$ – расстояние до проекции центра источника на земную поверхность (подставляется итеративно в зависимости от выбранного шага при построении изолиний),
 V – расход газовой смеси, определяемый по формуле:

$$V = \frac{\pi \left(\frac{2LV_1}{L^2 \omega_0 V_1} \right)}{4} \omega_0,$$

где V_1 – расход выбрасываемой в единицу времени газовой смеси ($\text{м}^3/\text{с}$), ω_0 – средняя скорость выхода газовой смеси.

Все вычисления выполнены в соответствии с государственной методикой [1].

Исходя из выбранных пользователем параметров (в программной системе также предоставляется возможность автоматической подстановки рекомендуемых справочных значений), производится расчет приземных концентраций и построение изолиний с указанием критических значений.

Модуль диагностики водных ресурсов

Данный модуль предназначен для выявления водных объектов, требующих дополнительных мер по защите и охране окружающей среды. Этот модуль также предназначен для визуализации контурных линий, описывающих новые направления океанических течений в зоне пролегания межконтинентального тоннеля, и расчета показателей интенсивности потока.

Для оценки негативного воздействия при эксплуатации тоннеля ТКМ на акваторию были выбраны такие параметры, как температура, шумовое воздействие и глубина воды. Предполагается, что в местах с наименьшей глубиной изменится направление или интенсивность океанических течений.

Задача моделирования океанических течений была сведена к задаче плоского течения [2]:

$$\sum_{i=0, \dots, I} \left\{ -\frac{Rn}{mH} \Phi_{\bar{\theta}} - \left[\frac{l}{H} \Phi_{\bar{\lambda}} \right] + Q_i \right\} = 0,$$

$$Q_1 = \frac{n}{\rho_0 m H} (\tau_1 + J_{\lambda}) - \frac{ng}{\rho_0} \int_0^1 \left(\frac{d}{d\lambda} H \int_0^z \rho dz - \frac{dH}{d\lambda} zp \right) dz,$$

$$Q_2 = \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_2 + J_{\theta}) - \frac{ng}{\rho_0} \int_0^1 \left(\frac{d}{d\theta} H \int_0^z \rho dz - \frac{dH}{d\theta} zp \right) dz,$$

где

R – газовая постоянная воздуха,

H – вспомогательная функция, описывающая поверхность дна океана (для простоты в данном исследовании было принято считать дно плоским),

$$l = -2\omega \cos \theta, \quad m = \frac{1}{r} \sin \theta, \quad n = \frac{1}{r},$$

где

ω – угловая скорость вращения Земли,

r – радиус Земли,

$\theta = \varphi + \frac{\pi}{2}$ (где φ – широта),

λ – долгота (географическая),

g – ускорение свободного падения,

z – расстояние по вертикали от невозмущенной поверхности океана,

Q – функция, для удобства разбитая на 2 части и зависящая от компонент напряжения трения ветра на поверхности океана и интегралов по вертикали от плотности,

τ – компоненты напряжения трения ветра соответственно по осям,

J – описание бароклинических составляющих горизонтального потока на плоскую циркуляцию:

$$J_{\lambda} = \int_0^1 \left[-\cos \theta u'v' - m \frac{\partial}{\partial \lambda} (H(u')^2) - n \frac{\partial}{\partial \theta} (Hu'v') \right] dz,$$

$$J_{\theta} = \int_0^1 \left[\cos \theta (u')^2 - m \frac{\partial}{\partial \lambda} (Hu'v') - n \frac{\partial}{\partial \theta} (H(v')^2) \right] dz.$$

Задача плоского течения является краевой задачей, имеющей обязательное условие:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Gamma_i} \frac{d\bar{\varphi}}{dn} d\Gamma_i + \int_{\Gamma_i} \left(\frac{R}{H} \frac{d\bar{\varphi}}{dn} + \frac{l}{H} \frac{d\bar{\varphi}}{ds} - Q_s \right) d\Gamma_i = 0,$$

где

$$\frac{d\bar{\varphi}}{dn} = \frac{n}{m} \cos(\nu, \theta) \frac{d\bar{\varphi}}{d\theta} + \frac{m}{n} \cos(\nu, \lambda) \frac{d\bar{\varphi}}{d\lambda},$$

ν, s – направления внутренней нормали и касательной к контуру Γ_i ,

Q_s – касательная к Γ_i компонента вектора $Q = (Q_1, Q_2)$.

Данное условие является ключевым для описания океанических течений в области островов и материков.

Модуль оценки антропогенного воздействия на ареалы обитания животных и территории произрастания растений

Данный модуль разработан для построения на карте границ зоны угнетения флоры и фауны, а также расчета возможной численности популяций видов, занесенных в Красную книгу.

Территории строительства ТКМ, расположенные в зонах заповедников и заказников, были исследованы на предмет выявления путей миграции наиболее редких диких животных, птиц и обитателей водной среды. При помощи экспертных оценок были построены предполагаемые пути миграции в изменившихся условиях.

Также проведен анализ антропогенных и абиотических факторов, возникающих при строительстве и эксплуатации ТКМ, вследствие чего определен набор лимитирующих параметров. Кроме того, в результате поиска критических значений лимитирующих параметров, превышение которых ведет к вымиранию исследованных популяций, выявлена экологическая валентность территории по окончании строительства.

Диапазон экологического воздействия ТКМ на растения был выявлен также при помощи оценки крайних пороговых значений (точек минимума и максимума) данного фактора, при которых возможно существование организма. Таким образом, определены зоны угнетения популяций растений.

Модуль визуализации зоны электромагнитного воздействия

Оценка воздействия была проведена в некотором приближении по существующим государственным методикам. В результате работы программной системы на карте графически выделены водные объекты на суше, для которых требуются дополнительные меры контроля и защиты.

Линии электропередач, предусмотренные проектом строительства, будут оказывать на окружающую среду магнитное и гальваническое влияние. В работе исследована сила электрического поля, создаваемого многоцепными коридорами линий, проходящими на территории строительства ТКМ, в результате выявлены зоны с наиболее высоким значением, оказывающие негативное воздействие на здоровье человека.

Модуль прогнозирования объема парникового газа, выделяемого при эксплуатации высокоскоростной железной дорогой, а также количества потребляемой ей энергии

При разработке данного модуля были применены технологии машинного обучения, так как данная подзадача исследования относится к классу задач регрессии.

В начале этой части исследования были собраны данные о пассажирских и грузовых железнодорожных перевозках в Канаде, после чего было выбрано оптимальное представление информации и осуществлена обработка данных в соответствии с этим представлением. Аналогичные признаки были выявлены и для территории РФ. Предполагается, что с помощью методов машинного обучения, примененных на множественных данных Канады и значениях исследуемых параметров для России, можно получить прогноз объема парникового газа и энергии, потребляемой высокоскоростной железной дорогой. В результате была получена необходимая информация.

На примере полученного набора данных выделен ряд признаков, с помощью которых были применены следующие методы машинного обучения: обучена нейронная сеть, использованы различные ансамбли решающих деревьев и линейные методы – линейная регрессия; алгоритм ридж-регрессии (англ. ridge regression), также называемый гребневой регрессией; градиентный бустинг над решающими деревьями и метод главных компонент¹. После этого было произведено сравнение полученных моделей по метрике среднеквадратичной ошибки (Mean Squared Error, MSE) и выявлено, что алгоритм градиентного бустинга над решающими деревьями дал наиболее приемлемый результат, который и был использован при разработке программной системы.

Таким образом, при помощи разработанной программной системы можно определить границу санитарной зоны для проектирования местоположения жилых районов; выявить области, где требуется искусственная поддержка численности популяций растений и животных; выявить области, где требуются дополнительные меры по очистке атмосферного воздуха; предположительно определить водные объекты, расположенные на территориях, для которых требуется установить статус водоохранных зон.

Заключение

В результате исследования была разработана программная система, предназначенная для визуализации моделей экологического влияния ТКМ через Берингов пролив. Данное программное средство может быть использовано как дополнительный инструмент при разработке документации экологического характера. Программная система также готова к расширению. Таким образом, в перспективе она может применяться для транспортных магистралей различного рода.

Список литературы

1. Госкомгидромет. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. Л.: Гидрометеиздат, 1987.
2. Марчук Г. И., Дымников В. П., Залесный В. Б., Лыкосов В. Н., Галин В. Я. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 320 с.
3. Соляник Н. А., Кушников В. А. Математическое моделирование процесса загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния промышленных предприятий // Вестн. СГТУ. 2009. № 1.

Материал поступил в редколлегию 12.04.2017

¹ Подходы и методы машинного обучения. URL: http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Machine_Learning.html

S. V. Ivannikova

*Novosibirsk State University
1 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

s.ivannikova@g.nsu.ru

**DEVELOPMENT OF TOOL FOR ENVIRONMENTAL IMPACT EMISSION
OF REALIZATION OF TRANSPORT MEGAPROJECTS BASED
ON AN EXAMPLE OF INTERCONTINENTAL TRANSPORT CORRIDOR
VIA THE BERING STRAIT**

The aim of this study is investigating of a new methodological approach to a comprehensive analysis of the environmental impact made by processes associated with the construction and operation of transport highways. The article is devoted to the research of the methods for assessment of environmental pollution, which were used to develop a software intended for experts in the field of ecology, in particular, to modeling and calculating key parameters affecting the environmental safety of regions. Machine learning algorithms are using to predict the GHG emissions and the energy consumed by the high-speed railway.

Keywords: ecological damage simulation, ecological safety, equation of turbulent diffusion, modeling of ocean currents, machine learning.

References

1. The State Committee for Hydrometeorology. Method for calculating the concentrations in the air of harmful substances contained in the emissions of enterprises. OND-86. Publisher: Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987.
2. Marchuk G. I., Dymnikov V. P., Zalesny V. B., Lykossov V. N., Galin V. Y. Mathematical modelling of general circulation of the atmosphere and ocean. L.: Gidrometeoizdat, 1984. 320 p.
3. Solyanik N. A., Kushnikov V. A. The mathematical simulation of air pollution in industrial zone of influence // Vestnik SSTU. 2009. № 1.