

УДК [551.58:504.1: 621.039.5](292.58)

*М.Е. Баранова, А.С. Гаврилов, Н.Ф. Донг*

## **КЛИМАТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕРРИТОРИИ ИНДОКИТАЯ**

Российский государственный гидрометеорологический университет,  
masha111280@mail.ru

*M.E. Baranova, A.S. Gavrilov, N.F. Dong*

## **CLIMATOLOGICAL ASPECTS ENSURE THE SAFETY OF NUCLEAR FACILITIES IN RELATION TO THE TERRITORY OF INDOCHINA**

В статье рассматриваются современные требования к обеспечению безопасности функционирования атомных электростанций, которые предполагают еще на стадии их проектирования всесторонний анализ последствий возможных аварийных выбросов. Эти последствия определяются также и условиями рассеяния радионуклидов в атмосфере. В настоящей работе на примере Индокитая показана методика расчета и построения климатической карты некоторого индикатора условий такого рода рассеяния, которая позволяет выделить наиболее безопасные с этой точки зрения участки территории для последующего размещения атомных электростанций.

**Ключевые слова:** климат Индокитая, рассеяние радионуклидов, безопасность атомных электростанций.

The article considers current requirements for the safety of nuclear power plants, which at the beginning of the design process presuppose a comprehensive consequence analysis for possible emission events. These consequences are also determined by the conditions for atmospheric dispersions of radionuclides. In this study, we propose a methodology for estimating and building a climatic map of conditions for such radioactive dissemination that allows to select the safest areas for further establishing nuclear power plants in the future (on the example of Indochina).

**Keywords:** the climate of Indochina, the dispersion of radionuclides simulation, safety of nuclear plants.

Несмотря на последствия радиационных аварий последних десятилетий (в первую очередь, аварий на Чернобыльской АЭС в 1986 г. и АЭС Фукусима в 2011 г.), а также отказ ряда стран от программ развития ядерной энергетики, оказывается, что пока адекватной замены этого направления энергетики

на альтернативные не наблюдается: в настоящее время в 30 странах мира насчитывается 195 действующих атомных электростанций (АЭС) с 438 энергоблоками, 71 энергоблок находится на стадии сооружения.

Особое внимание этому вопросу уделяется в развивающихся странах, не обладающих собственными источниками углеводородов, в которых благодаря развитию промышленности и росту уровня жизни населения потребление электроэнергии неуклонно возрастает. В последние годы исследования по оценке возможности размещения на своей территории АЭС начали такие страны, как Турция, Египет, Иордания, Индия, Иран, ЮАР, Бангладеш и Вьетнам. Процесс этот длительный и предполагает комплексное геофизическое обследование той или иной территории, направленное на минимизацию возможных будущих рисков воздействия на окружающую среду и население при эксплуатации АЭС.

В этой связи возникает потребность в создании единой методологии предварительного климатологического анализа условий переноса и рассеяния радионуклидов в атмосфере от газообразных аварийных выбросов источников АЭС, которые, в отличие от жидких и твердых отходов, в силу своей природы не могут тем или иным способом улавливаться непосредственно на промплощадке АЭС.

Условия распространения и рассеяния аварийного выброса в атмосфере характеризуются, как известно, так называемыми факторами разбавления и осаждения [1], представляющими собой величины интеграла концентрации радионуклидов и интенсивности их осаждения на поверхность при единичной мощности аварийного выброса.

Согласно требованиям Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) и российских нормативных документов [1, 2, 7], оценка радиационной обстановки при проектных и запроектных авариях на АЭС должна выполняться для наименее благоприятных метеорологических условий, характерных для района размещения АЭС. Понятие «неблагоприятные метеорологические условия» подразумевает в этом случае определение на различных расстояниях от АЭС максимальных значений факторов разбавления и осаждения с процентной обеспеченностью до 99,5 %. Получение статистических характеристик столь высокого уровня обеспеченности (так называемых редких событий) требует в свою очередь наличия весьма длительных наблюдений (5–8 лет) на площадке АЭС, которые, однако, на стадии проектирования, по понятным причинам, отсутствуют. Именно поэтому расчетные (прогностические) методы оценки подобных величин становятся единственно возможными.

Для расчета факторов разбавления и осаждения примеси широкое распространение на практике в силу своей простоты и прозрачности результатов получила Гауссова модель атмосферной диффузии для параметров рассеяния как функций расстояния от источника и категории устойчивости атмосферы по классификации Пэскуилла–Гиффорда (Pasquill–Gifford). Данная модель рекомендована для практического применения для расстояний не более 30 км от источника всеми международными организациями, включая Всемирную метеорологическую организацию (ВМО), Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), Научный комитет по действию атомной радиации (НКДАР) ООН, Всемирную организацию здравоохранения (ВОЗ).

Алгоритмы [5] предполагают использование специальной системы декартовых координат, где ось  $x$  направлена вдоль вектора ветра на уровне геометрической высоты источника выброса, ось  $y$  – в поперечном направлении, а ось  $z$  – вертикально вверх.

Зависимость от времени объемной активности  $C_{V,r}^o(x,t)$ , Бк/м<sup>3</sup>, выбрасываемого радионуклида  $r$  в атмосфере на оси траектории движения облака (поперечная координата  $y=0$ ) на уровне подстилающей поверхности (высота  $z=0$ ) и на расстоянии  $x$  от точечного источника мгновенного выброса рассчитывается по формуле:

$$C_{V,r}^o(x,t) = Q_{o,r} G'_{o,r}(x,t), \quad (1)$$

где  $Q_{o,r}$  – величина мгновенного выброса радионуклида  $r$ , Бк.

При этом  $G'_{o,r}(x,t)$  – так называемый фактор разбавления мгновенного выброса в атмосфере:

$$G'_{o,r}(x,t) = \frac{2}{(2\pi)^{3/2}} \frac{F_r(x)}{\sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-Ut)^2}{2\sigma_x^2}\right] \exp\left[-\frac{h^2(x)}{2\sigma_z^2}\right], \quad (2)$$

где  $h(x)$  – высота центра облака выброса над поверхностью Земли на расстоянии  $x$  от точки выброса;  $U$  – скорость ветра на высоте выброса;  $F_r(x)$  – так называемый фактор истощения облака выброса для радионуклида  $r$  на расстоянии  $x$  по ветру (безразмерная величина, описывающая изменение интегрального количества выброшенного количества радионуклида  $r$  с расстоянием от места выброса, уменьшающегося за счет радиоактивного распада, сухого осаждения и вымывания его из облака осадками);  $\sigma_x = \sigma_y$  и  $\sigma_z$  – зависящие от расстояния стандартные отклонения частиц облака выброса в направлении движения облака по ветру  $x$ , в горизонтальном направлении поперек ветра  $y$  и в вертикальном направлении  $z$ .

Формулы (1) и (2) дают динамику изменения объемной активности в точке  $x$ , расположенной на траектории движения центра облака выброса. Для оценки же радиационных последствий прохождения такого облака (интеграла ингаляционного поступления в организм человека, выпадений на почву, дозы от внешнего излучения прошедшего облака) необходимо знать временной интеграл концентрации в этой точке. Его находят, интегрируя формулу (2) по времени  $t$ . В результате для временного интеграла концентрации  $C_{v,r}(x)$ , Бк·с/м<sup>3</sup>, получается следующее соотношение:

$$C_{v,r}(x) = \int_0^{\infty} Q_{o,r} G'_{o,r}(x,t) dt = Q_{o,r} G_{o,r}(x), \quad (3)$$

где

$$G_{o,r}(x) = \int_0^{\infty} G'_{o,r}(x,t) dt = \frac{F_r(x)}{\pi \sigma_y \sigma_z U} \exp\left[-\frac{h^2(x)}{2\sigma_z^2}\right] \quad (4)$$

– так называемый временной интеграл от мгновенного фактора разбавления,  $\text{с}/\text{м}^3$ , далее для простоты именуемый «фактор разбавления». Формула (3) дает максимально возможные в данных условиях значения интеграла концентрации на расстоянии  $x$  от места выброса (на оси траектории движения облака выброса).

Таким образом, для расчета характеристик рассеивающей способности атмосферы предусматриваем использование следующих исходных данных:

- средней скорости ветра на одном уровне в приземном слое по данным стандартных измерений на метеостанции;
- направления ветра (румбы, количеством 16 и штиль) на высоте 10 м над земной поверхностью;
- дистанционных зависимостей  $\sigma_y, \sigma_z(x)$ .

Для расчета последних, в свою очередь, требуются: уровень шероховатости подстилающей поверхности и категории устойчивости Пэскуилла–Гиффорда.

В отличие от шероховатости, категории устойчивости Пэскуилла–Гиффорда остаются неизвестными. Особенность этих параметров состоит в том, что они зависят в первую очередь от вертикальных градиентов температуры и скорости ветра, которые не входят в перечень стандартных метеорологических наблюдений на метеостанции и, следовательно, могут быть определены лишь косвенными методами на основе доступной метеоинформации. Всего используется семь таких категорий, имеющих традиционно литеральные обозначения: *A* (свободная конвекция), *B* (конвекция), *C* (вынужденная конвекция), *D* (нейтральная стратификация), *E* (слабая устойчивость), *F* (умеренная устойчивость), *G* (сильная устойчивость).

Метод определения этих параметров по косвенной информации предложен в работе [1], где обоснована возможность восстановления вертикальной структуры атмосферного пограничного слоя (АПС) по данным измерений на метеостанции и данным реанализа атмосферных процессов (значений скорости и направления ветра, а также температуры и влажности в узлах регулярной сетки на изобарических поверхностях 850 и 700 гПа). Вся эта информация в настоящее время широко доступна на интернет-ресурсах. Разработанная для этих целей численная модель АПС используется здесь в качестве так называемого пространственно-временного интерполянта и ориентирована на проведение массовых расчетов по обработке синхронизированных по времени рядов наблюдений метеорологической и аэро-синоптической информации реанализа в точках нахождения метеостанций.

Применительно к расчету характеристик рассеяния радионуклидов эта численная модель была применена в работе [2], причем вся технология подобного рода была реализована в форме специализированного программного комплекса RiskZone V. 1.0, прошедшего верификацию и аттестацию в соответствии с требованиями Росатома РФ [4]. Возможность привлечения подобной технологии также и для тропической зоны Индокитая обоснована в работе [3]. Подобная унификация и стандартизация расчетов параметров атмосферы, определяющих условия рассеяния радионуклидов, только на основании широкодоступной исходной информации открывают возможность проведения сравнительных расчетов для различных территорий и перехода, таким образом, к построению специализированных климатологических карт.

В данной работе в качестве индикатора для анализа радиационных последствий аварий в проектах новых АЭС используются результаты расчетов максимальных за период 2005–2015 гг. значений факторов разбавления [формула (4)] обеспеченности 95 % для единичного источника выбросов ( $Q_{o,r} = 1$ ) высотой 50 м на удалении 10 км от источника. Пример подобного расчета представлен на рис. 1.

Как можно видеть, карта демонстрирует выраженную пространственную изменчивость выбранного индикатора условий рассеяния. Его величина варьирует в интервале от  $10^{-5}$  до  $10^{-4}$  с/м<sup>3</sup>, причем вполне отчетливо выделяются зоны низких (менее  $2 \times 10^{-5}$  с/м<sup>3</sup>), средних (от  $2 \times 10^{-5}$  до  $8 \times 10^{-5}$  с/м<sup>3</sup>) и высоких (свыше  $8 \times 10^{-5}$  с/м<sup>3</sup>) значений.

Сопоставляя топографию Индокитая с данными рис. 1, можно сделать вывод, что низкие значения используемого индикатора совпадают, преимущественно, с расположением долин со сравнительно незначительной высотой рельефа. Особенно это проявляется на юге области (Вьентьян, Бангкок и Хошимин), а также на севере Индокитая и в южных районах Китая (Байсэ и Гуанчжоу). Климат местности характеризуется здесь наличием выраженной муссонной циркуляции, обилием инсоляции и высокой температурой с весьма незначительной суммой осадков за год (в пределах 900–1500 мм).

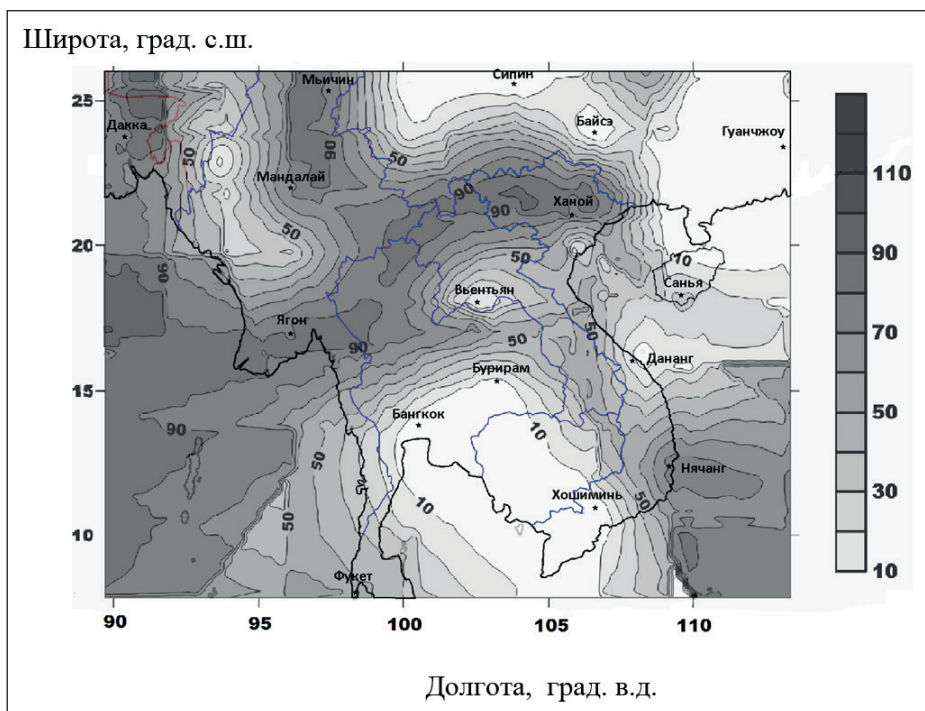


Рис. 1. Пример климатологической карты Индокитая расчета максимальных факторов разбавления с обеспеченностью 95 % (умноженного на 106, с/м<sup>3</sup>) для высоты вентиляционной трубы 50 м на удалении 10 км от источника

Зона средних значений находится в невысоких горных местностях или в долинах. В этой зоне преобладает, в основном, субэкваториальный климат. Для него характерны жаркий влажный сезон с апреля по ноябрь и прохладный сухой сезон в декабре – марте. Среднее количество осадков от 1500–2500 мм.

Что касается зоны высоких значений, то, как видно из рисунка, она располагается главным образом в северной и центральной частях Индокитая, где находятся сравнительно высокие горные массивы. В пределах Лаоса и Мьянмы имеется Шанское нагорье, которое образует труднодоступный горный район с высотами 2000–2500 м. В северной части Вьетнама на границе с Китаем, а также на крайнем западе области располагаются горные массивы высотой до 3000 м. Эти области помимо специфических особенностей в поле ветра характеризуются еще и высокими уровнями годовых сумм осадков (около 2500–3000 мм). Зона средних значений индикатора занимает, как можно видеть, промежуточные территории с переходными формами климата.

Все эти особенности отчетливо проявляются и в расчетных повторяемостях категорий устойчивости Пэскуилла–Гиффорда (рис. 2). В зоне низких значений

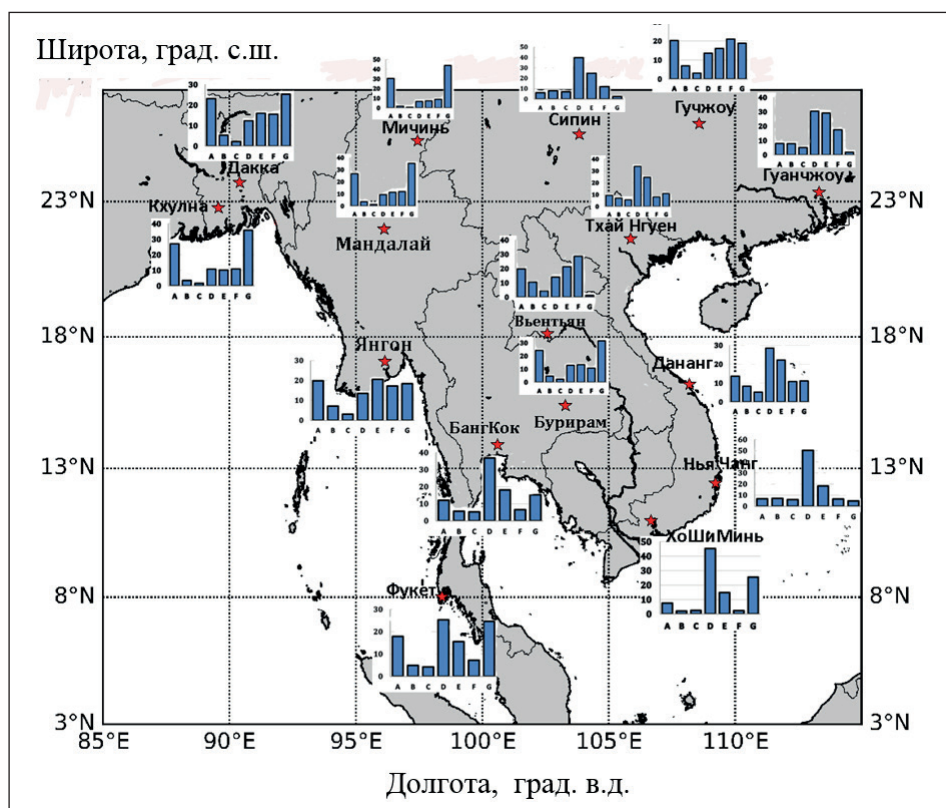


Рис. 2. Сопоставление гистограмм повторяемости категорий устойчивости Пэскуилла–Гиффорда, рассчитанных за период 2005–2015 гг. на территории Индокитая

индикатора превалируют в основном условия нейтральной или слабоустойчивой стратификации (категории *D* и *E*). Основной причиной здесь является высокое значение скорости ветра на равнинах.

Для высоких уровней значений индикатора характерны, наоборот, очень низкие уровни повторяемостей нейтральной и слабоустойчивой стратификации, но зато резко возрастают вероятности условий конвекции (категории *A* и *B*), а также умеренной и сильной устойчивости (категории *F* и *G*), так что гистограммы повторяемости в этих областях становятся бимодальными. Причины подобного явления – наличие сравнительно слабого ветра в горных долинах и выраженный суточный ход температуры воздуха.

### Выводы

Первый опыт построения специализированных климатологических карт для характеристик рассеяния радионуклидов от гипотетических аварийных выбросов АЭС, по мнению авторов, оказался вполне удачным. Распространение подобного опыта на различные регионы мира позволит уже на начальном этапе проектирования таких опасных ядерных объектов, как атомные электростанции, выбирать наиболее безопасные области их размещения.

### Литература

1. *Василенко С.В., Гаврилов А.С., Мханна А., Липовицкая И.Н.* Метод климатологического анализа вертикальной структуры атмосферного пограничного слоя с использованием численной модели // Учен. зап. РГГМУ, 2006. № 2. – С. 53–65.
2. *Гаврилов А.С., Харченко Е.В., Донг Н.Ф., Хи Н.Д.* Управление рисками при авариях на атомных электростанциях с использованием математических моделей переноса и рассеяния нуклидов в атмосфере // Естеств. и техн. науки, 2015. № 3. – С. 247–250.
3. *Гаврилов А.С., Донг Н.Ф., Хи Н.Д.* О возможностях использования геострофического соотношения в тропической зоне // Учен. зап. РГГМУ, 2016. № 39. – С. 99–108.
4. *Гаврилов А.С., Баранова М.Е., Карасева М.А., Фролов А.С., Харченко Е.В.* ПС «RiskZone v.1.0.» Св-во о гос. регистрации № 2015611710 от 04.02.2015 г. Аттестационный паспорт № 368 от 18.03.2015 г.
5. *Методические указания по расчету радиационной обстановки в окружающей среде и ожидаемого облучения населения при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу (МПА-98).* – М.: Минатом России, 1999. – 207 с.
6. *Учет дисперсионных параметров атмосферы при выборе площадок для атомных станций.* Рук-во по без-ти // Серия изданий по безопасности МАГАТЭ, №50-SG-S3. – Вена, 1982. – 105 с.
7. *NRC Regulatory Guide 1.145 – Atmospheric Dispersion Models for Potential Accident Consequence Assessments at Nuclear Power Plants.* Rev.1. 1982, 132 с.