

# Оценка воздействия и взаимного влияния территориальных систем на базе функциональных геотаксонов

В. С. Брызгало

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
verabryzgalo@mail.ru

**Аннотация.** В докладе рассматривается применение геоинформационных технологий для оценки степени взаимодействия развивающихся территорий, воздействия на окружающую среду техногенных производств и для расчета выбросов загрязняющих веществ в связи с необходимостью формализации получения и анализа данных, описывающих эти процессы. Рассматривается структура информационно-измерительной системы (ИИС) контроля воздействия промышленных производств на окружающую среду. Проводится оценка степени воздействия анализируемой территории на окружающую среду и оценка взаимного воздействия прилегающих территорий.

**Ключевые слова:** карбоновое воздействие; карбоновый след; геотаксон; районирование территории; классификация геотаксонов; административное районирование; функциональное районирование; цифровая модель

## I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема поддержания экологической безопасности с каждым годом становится всё более актуальной. Вследствие развития и роста экономики, которая стимулирует интенсивное использование энергии, увеличивается количество как производственных мощностей, так и объектов инфраструктуры и транспорта, что, в свою очередь, приводит к увеличению эмиссии парниковых газов.

Парниковые газы, такие как углекислый газ  $\text{CO}_2$ , метан  $\text{CH}_4$  и оксид азота, играют значительную роль в изменении климата и имеют серьезное влияние на экологию. Эти газы улавливают тепло в атмосфере, что приводит к повышению температуры на Земле и вызывает изменения в климатических условиях. Изменение климата, вызванное парниковыми газами, может привести к ряду негативных последствий для экосистем. Это может включать в себя увеличение частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений, таких как засухи, наводнения и ураганы, что может привести к разрушению экосистем и потере биоразнообразия.

По данным Росгидромета увеличение концентрации в России как  $\text{CO}_2$ , так и  $\text{CH}_4$  продолжается – по данным фоновых станций, в прошлом году темпы роста концентрации  $\text{CO}_2$  возросли по сравнению с 2020 и 2021 годами. Увеличение концентрации за последний истекший год составило 3,4–3,5 частицы на миллион, что

существенно выше среднеглобальной скорости роста за предыдущие десять лет. Это также значительно выше показателя глобального прироста за 2021-й (2,5 частицы на миллион). [1]

Одним из инструментов борьбы с изменением климата и загрязнением окружающей среды является введение Евросоюзом углеродного налога, который взимается с административных территорий. Исходя из этого, при формировании суммарной оценки загрязняющих веществ в атмосфере необходимо также учитывать административную принадлежность территории.

В соответствии с [2. Федеральный закон от 28 апреля 2023 г. N 177-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и Федеральный закон «О проведении эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части снижения загрязнения атмосферного воздуха»] промышленные производства должны иметь систему контроля – информационно-измерительные системы (ИИС) контроля воздействия на окружающую среду в реальном времени, регистрирующие количество выбросов в атмосферу, превышение нормативов и передающих данные для анализа в сервер центральной информационной системы.

Современные ИИС представляют собой распределенные измерительные системы, в структуру которых входят локальные подсистемы, размещенные в местах выброса, сброса, и других видов воздействия на окружающую среду, которые обеспечивают контроль всех параметров в соответствии с российскими и международными стандартами.

На рис. 1 показана обобщенная структура такой ИИС, которая включает в себя:

- локальные информационные системы (ИС) контроля сбросов в окружающую среду;
- локальные ИС контроля выбросов в атмосферу;
- локальные ИС контроля ливневых воздействий на основе цифровой модели территориального объекта.

Передача данных между сервером и локальными ИИС осуществляется как по оптоволоконной, так и по беспроводной связи.



Рис. 1. Обобщенная структура ИИС

Кроме непосредственных измерений физических величин в современных ИИС используются данные дистанционного зондирования земли (ДДЗЗ), а также цифровые модели территориальных объектов. Цифровые модели обеспечивают получение оценки степени воздействия на территориальный объект косвенным путем, используя геоинформационные технологии.

Задачи оценки распространения загрязнений с моделированием разовых концентраций требуют наличия алгоритмического и программного обеспечения, работающего в связке с геоинформационными системами, что позволило бы автоматизировать задачу оценки суммарного выброса парниковых газов.

Геоинформационные технологии широко используются для экологического учета, мониторинга изменения климата, регистрации природных ресурсов, изучения влияния различных видов экономической деятельности на окружающую среду и оценки риска стихийных бедствий.

Они являются эффективным инструментом для получения оценок степени взаимодействия развивающихся территорий, воздействия на окружающую среду техногенных производств.

Создание геоинформационных проектов связано с необходимостью формализации получения и анализа данных, описывающих эти процессы. Построение геоинформационных проектов связано автоматизацией функций районирования, оценки показателей производства и поглощения территориальными объектами выбрасываемых в атмосферу газов, степени их взаимного влияния. В статье «Классификация геотаксонов по степени карбонового воздействия» EIcon2022 [3] показано, что для формализованного описания поставленной задачи удобно использовать понятие геотаксона.

Геотаксон – это территориальная единица, обладающая определенными характеристиками, информативными для решаемой задачи оценки степени воздействия на окружающую природную среду. Например, для производительности карбона, различные территориальные системы имеют различное

математическое описание (цифровую модель) в соответствии с приведенной классификацией [4] постоянное значение или функциональные зависимости.

## II. ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ГЕОТАКСОНА ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА

Наиболее опасное воздействие на окружающую природную среду (ОПС) оказывают выбросы промышленных предприятий и транспорта. Характеристики выбросов определяются технологическим процессом предприятия, его структурой, а транспортные выбросы – характеристиками автомобильного потока (состав, интенсивность и др.). То есть характеристики территориального геотаксона (ТГ) могут быть описаны цифровой моделью объектов, которые на нем находятся (промышленное предприятие, транспортная инфраструктура).

Рассмотрим принципы построения цифровой модели функционального территориального геотаксона (ЦМФГ).

Основным информативным параметром ЦМФГ в соответствии с международным стандартом являются:

- количество CO<sub>2</sub> за год:

$$M_{CO_2NE} = \iiint_{NET} c_{ne}(t) dndedt, \text{ т} \quad (1)$$

- средняя производительность CO<sub>2</sub>:

$$C_{CO_2NE} = M_{CO_2NE} / \left( \iint_{NE} s_{ne} dnde \right) = \iiint_{NET} c_{ne}(t) dndedt / \left( \iint_{NE} s_{ne} dnde \right), \text{ т/год} \quad (2)$$

где NE – множества географических координат, принадлежащих анализируемому геотаксону; T – время анализа;  $s_{ne}$  – площадь территориальной единицы;  $rc_{ne}$  – производительность территориальной единицы.

Цифровая модель функционального геотаксона (ЦМФГ), на территории которого находится промышленное предприятие, может быть представлена как оценка приземной концентрации газа, рассчитывается в условиях максимального воздействия выбрасываемых газов на ОПС

$$C_{ip}(x, y, z) = F(V_d, H, D, V_v, M_{id}, T_d), \quad (3)$$

где:  $C_{ip}$  – приземная концентрация газа;  $V_d$  – скорость выхода дымового газа из трубы;  $H$  – высота трубы;  $D$  – диаметр трубы;  $V_v$  – скорость ветра;  $M_{id}$  – количество выбрасываемого газа;  $T_d$  – температура дымового газа.

Результат расчета показан на рис. 2.

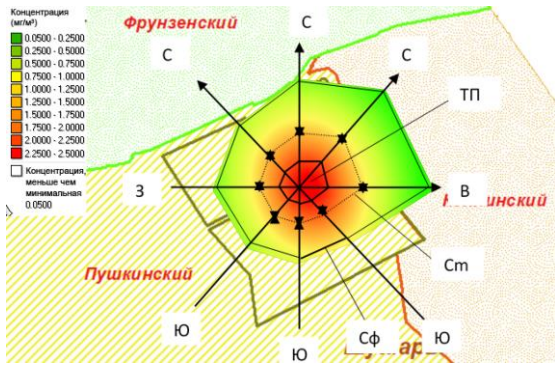


Рис. 2. Воздействие выбрасываемых газов на ОПС

Расчет производится относительно точки выброса газа в атмосферный воздух, на основе данных, описывающих технологический процесс, или результатов контрольных измерений.

При этом вычисляется значение максимального возможного воздействия  $C_{рmax}$  или значение степени воздействия (количества выбросов) данным технологическим процессом как результат интегрирования за заданный временной период, например, за год

$$M_{дmax} = F(V_d, D, C_{рmax}, t=год). \quad (4)$$

Если производство имеет несколько точек выброса, для каждой точки (трубы) производится расчет, и результаты суммируются как обобщенная характеристика ФГ

$$\sum_i M_{дmax} = \sum_i F(V_d, D, C_{рmax}, t=год), \quad (5)$$

где  $i$  – количество источников. [5]

Данная оценка соответствует наихудшему случаю. Для получения оптимистической оценки, необходимо воспользоваться выражение (2).

В рассмотренном случае производительность  $CO_2$  промышленного геотаксона равна

$$P_{ппрNE} = \sum_{ппрNE} P_{cne}, \quad \text{где } P_{cne} = \sum_{ппрNE} P_{фгтne}, \text{ } ne \in \cap(S_{фгт1}, S_{фгт2}, S_{фгт3}, \dots). \quad (6)$$

При этом формируется множества данных (кортежи), описывающие слои функциональных промышленных геотаксонов, покрывающих территорию рассматриваемого административного геотаксона.

Так как для построения «полной» ЦМФГ необходимо произвести расчет всех направлений распространения загрязнения в соответствии с розой ветров, которая также представлена на рис. 2. Роза ветров определяет направление и границы расчета. Расчет проводится в единицах международного стандарта – тонн в год и по Российской методике – максимальная приземная концентрация.

Все расчеты сохраняются в БД и результирующая характеристика (площадь покрытия) образуется путем наложения площадей в геоинформационной технологии:

$$S_{ппрNE} = \sum_{ппрNE} g_{ne}, \quad \text{Где } g_{ne} = \sum_{ппрNE} S_{фгтne}, \quad ne \in \cap(S_{фгт1}, S_{фгт2}, S_{фгт3}, \dots) \quad (7)$$

Степень воздействия промышленного предприятия определяется путем пиксельного суммирования всех слоев расчета производительности карбона. В результате формируется функциональный геотаксон промышленного района в виде базы геоданных.

Расчеты производятся в режиме формирования геоинформационного проекта в интерактивном режиме цифрового моделирования.

Если оценку необходимо проводить за определенный интервал времени, основными характеристиками расчета будут:

количество  $CO_2$  за период времени  $T$ :

$$M_{CO2NE} = \iiint_{NET} (c_{net} = f(tp(\dots), n, e, t)) dndedt, T \quad (8)$$

средняя производительность  $CO_2$ :

$$C_{CO2NE} = \frac{M_{CO2NE}}{\iint_{NE} S_{ne} dnde} = \frac{\iiint_{NET} (c_{net} = (tp(\dots), n, e, t)) dndedt}{\iint_{NE} S_{ne} dnde}, \text{ Т/ГОД.} \quad (9)$$

### III. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Когда речь идет о контроле воздействия вредных веществ на окружающую среду, ответственность за воздействия на охраняемую природную систему возлагается на административные органы, поэтому районирование анализируемой территории целесообразно производить на основе административных кадастровых территориальных единиц.

Таким образом, контролируемый район полностью покрывается административными геотаксонами –  $G_{адмNE}$ , каждый из которых обладает своей структурой и характеристиками,  $NE$  – множество координат территориальных единиц (территориальная единица  $g_{ne}$  (единичный геотаксон) – это один пиксель площади, имеющий заданный размер, определенный алгоритмом анализа:  $1 \text{ м}^2, 10^2 \text{ м}^2, 10^4 \text{ м}^2, \dots$ ), описывающих заданный геотаксон;  $ne \in S_{NE}$ , где  $S_{NE}$  – площадь геотаксона, которая в свою очередь равна  $S_{NE} = \sum_{NE} g_{ne}$ .

В этом случае площадь административного района будет равна

$$S_{адмNE} = \sum_{адмNE} g_{ne}, \text{ } ne \in S_{адмNE}.$$

Однако, административное районирование не отражает качественную организацию существующего карбонового баланса, производство и поглощение карбона, степени взаимодействия производственных, промышленных, жилых и природных территорий. Поэтому районирования целесообразно проводить геоинформационными слоями, объединяя в виде слоя геотаксоны одного функционального класса – функциональные геотаксоны (ФГТ).

Оценка степени воздействия анализируемой территории определяется характеристиками геотаксонов, описывающих эту территорию. Основой анализа является административный геотаксон, площадь которого определяет пространство анализа. Анализ

заключается в объединении на основе административного геотаксона ( $g_{ne0} \in G_{admNE}$ ) всех слоев описывающих данную территорию:

- промышленные предприятия – ( $g_{ne1} \in G_{прпNE}$ ),
- сельскохозяйственные предприятия – ( $g_{ne2} \in G_{схпNE}$ ),
- транспортные системы – ( $g_{ne3} \in G_{трсNE}$ ),
- жилые зоны – ( $g_{ne4} \in G_{жзNE}$ ),
- природные комплексы – ( $g_{неК} \in G_{пркNE}$ ),

где  $g_{nek}$  – единичные геотаксоны соответствующего слоя  $k = 0, \dots, K$ ;  $K$  – количество слоев.

Степень карбонового воздействия на территорию может быть оценена величиной производительности карбона

$$PC_{NE} = \sum_{NE \in G_{NE}} \sum_{k=1, \dots, K; g_{ne} \in \cap(G_{NE0}, G_{NEk})} (pc \ g_{nek}) \quad (10)$$

Данное выражение показывает, что степень воздействия определяется путем пиксельного суммирования на основе административного геотаксона производительности карбона всех слоев, описывающих анализируемую территорию.

#### IV. ОЦЕНКА ВЗАИМНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

В результате реализации процедуры районирования вся территория покрывается административными геотаксонами, каждый из которых описывается множеством функциональных геотаксонов, территориально привязанных с ним

$$G_{admNE} = \{G_{прпNE}, G_{схпNE}, G_{трсNE}, G_{жзNE}, \dots, G_{пркNE}\}.$$

Схему расположения административных районов можно представить как на рис. 1.

Взаимодействие территорий удобно описывать в виде матрицы взаимного влияния.

ТАБЛИЦА I.

	$G_{admNE}$	$G_{admN+1,E}$	$G_{admN,E-1}$	etc
$G_{admNE}$	$PC_{N,E}$	$PC_{(N,E) \cap (N+1,E)}$	$PC_{(N,E) \cap (N,E-1)}$	
$G_{admN+1,E}$	$PC_{(N,E) \cap (N+1,E)}$	$PC_{N+1,E}$	0	
$G_{admN,E-1}$	$PC_{(N,E) \cap (N,E-1)}$	0	$PC_{N,E+1}$	
etc				...

Для каждой ячейки матрицы может быть определена степень карбонового воздействия на территорию анализируемого административного геотаксона прилегающими территориями административных районов. Степень воздействия может быть оценена величиной производительности карбона – выражение типа (10).

Так, воздействие на территориальный геотаксон техногенных производств, входящих в зону ответственности этого ТГ, может быть описано как:

$$PC_{N,E} = \sum_{NE \in G_{NE}} \sum_{k=1, \dots, K; g_{ne} \in \cap(G_{NE}, G_{NEk})} (pc \ g_{nek});$$

$$PC_{(N+1),E} = \sum_{NE \in G_{N+1,E}} \sum_{k=1, \dots, K; g_{ne} \in \cap(G_{N+1,E}, G_{N+1,Ek})} (pc \ g_{nek});$$

$$PC_{N,E+1} = \sum_{NE \in G_{N,E+1}} \sum_{k=1, \dots, K; g_{ne} \in \cap(G_{N,E+1}, G_{N,E+1k})} (pc \ g_{nek});$$

$$PC_{N-1,E} = \sum_{NE \in G_{N-1,E}} \sum_{k=1, \dots, K; g_{ne} \in \cap(G_{N-1,E}, G_{N-1,Ek})} (pc \ g_{nek});$$

$$PC_{N,E-1} = \sum_{NE \in G_{N,E-1}} \sum_{k=1, \dots, K; g_{ne} \in \cap(G_{N,E-1}, G_{N,E-1k})} (pc \ g_{nek});$$

$$PC_{N+1,E-1} = \sum_{NE \in G_{N+1,E-1}} \sum_{k=1, \dots, K; g_{ne} \in \cap(G_{N+1,E-1}, G_{N+1,E-1k})} (pc \ g_{nek}).$$

Взаимное влияние (воздействие) геотаксонов друг на друга, описано в виде следующих алгоритмов:

$$PC_{(NE),(N+1,E)} = \sum_{NE \in \cap(G_{NE}, G_{N+1,E})} \sum_{k=1, \dots, K; g_{ne} \in \cap(G_{N+1,E}, G_{N+1,Ek})} (pc \ g_{nek});$$

$$PC_{(NE),(N,E-1)} = \sum_{NE \in \cap(G_{NE}, G_{N,E-1})} \sum_{k=1, \dots, K; g_{ne} \in \cap(G_{N,E-1}, G_{N,E-1k})} (pc \ g_{nek});$$

$$PC_{(NE),(N-1,E)} = \sum_{NE \in \cap(G_{NE}, G_{N-1,E})} \sum_{k=1, \dots, K; g_{ne} \in \cap(G_{N-1,E}, G_{N-1,Ek})} (pc \ g_{nek});$$

$$PC_{(NE),(N,E+1)} = \sum_{NE \in \cap(G_{NE}, G_{N,E+1})} \sum_{k=1, \dots, K; g_{ne} \in \cap(G_{N,E+1}, G_{N,E+1k})} (pc \ g_{nek});$$

$$PC_{(NE),(N+1,E-1)} = \sum_{NE \in \cap(G_{NE}, G_{N+1,E-1})} \sum_{k=1, \dots, K; g_{ne} \in \cap(G_{N+1,E-1}, G_{N+1,E-1k})} (pc \ g_{nek});$$

$$PC_{(N+1,E) \cap (N,E+1)} = \sum_{NE \in \cap(G_{N+1,E}, G_{N,E+1})} \sum_{k=1, \dots, K; g_{ne} \in \cap(G_{N+1,E0}, G_{N,E+1k})} (pc \ g_{nek}).$$

$$PC_{(N+1,E) \cap (N+1,E-1)} = \sum_{NE \in \cap(G_{N+1,E}, G_{N+1,E-1})} \sum_{k=1, \dots, K; g_{ne} \in \cap(G_{N+1,E-1}, G_{N+1,E-1k})} (pc \ g_{nek});$$

$$PC_{(N,E-1) \cap (N+1,E-1)} = \sum_{NE \in \cap(G_{N,E-1}, G_{N+1,E-1})} \sum_{k=1, \dots, K; g_{ne} \in \cap(G_{N,E-1}, G_{N+1,E-1k})} (pc \ g_{nek});$$

$$PC_{(N-1,E) \cap (N,E+1)} = \sum_{NE \in \cap(G_{N-1,E}, G_{N,E+1})} \sum_{k=1, \dots, K; g_{ne} \in \cap(G_{N-1,E}, G_{N,E+1k})} (pc \ g_{nek});$$

$$PC_{(N,E-1) \cap (N-1,E)} = \sum_{NE \in \cap(G_{N,E-1}, G_{N-1,E})} \sum_{k=1, \dots, K; g_{ne} \in \cap(G_{N,E-1}, G_{N-1,Ek})} (pc \ g_{nek}).$$

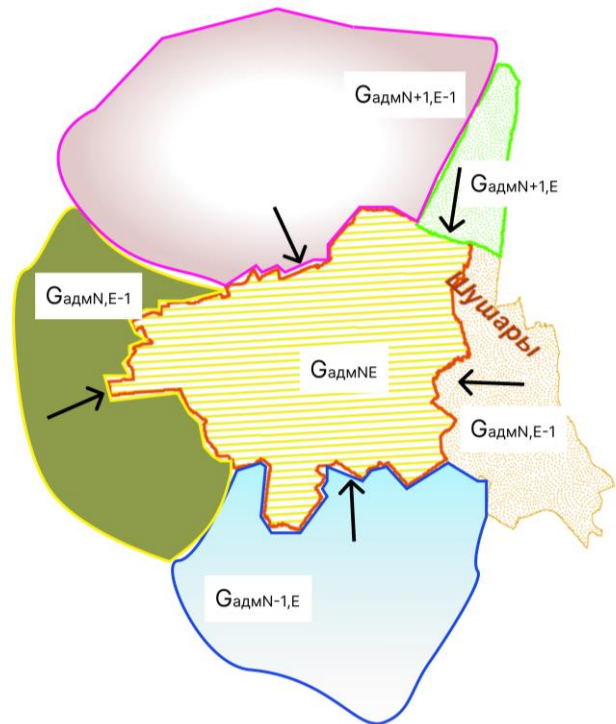


Рис. 3. Слой административных районов

Модель трансграничного переноса может быть описана производительностью карбона, описывающей характеристики переноса – моделью атмосферных

процессов, с определением корреляционными связями, учитывающими розу ветров анализируемого региона и характеристики глобальных атмосферных переносов.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, создание системы (библиотеки) цифровых моделей функциональных геотаксонов промышленных, сельскохозяйственных и иных районов обеспечивает геоинформационную базу для автоматизации задачи оценки степени воздействия на природные системы хозяйств различного вида, степени взаимодействия территорий между собой, оценки существующего карбонового баланса, проектирования развивающихся территорий.

Библиотека цифровых моделей функциональных геотаксонов служит основой для создания алгоритмической базы ИИС получения оценок степени воздействия на природную систему при проектировании территориальных систем, степени возможного воздействия от планируемых промышленных, сельскохозяйственных и других техногенных производств, оценок степени риска.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Новостной портал РБК от 27.03.2023/ В России ускорилось накопление парниковых газов / <https://www.rbc.ru/economics/27/03/2023/641d57ef9a794746fceeff72>
- [2] Федеральный закон от 28 апреля 2023 г. N 177-ФЗ "О внесении изменений в Федеральный закон "Об охране окружающей среды" и Федеральный закон "О проведении эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части снижения загрязнения атмосферного воздуха».
- [3] Алексеев В.В., Орлова Н.В., Вавилов Р.Е., Брызгалов В.С. Классификация геотаксонов по степени карбонового воздействия // Межд. конф. по мягким вычислениям и измерениям по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2022). СПб. 2022 г. С. 215-217.
- [4] Алексеев В.В., Орлова Н.В., Саранцева В.А., Брызгалов В.С. Анализ показателей выбросов парниковых газов для системы контроля воздействия на окружающую среду // Межд. конф. по мягким вычислениям и измерениям по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2023). СПб. 2023 г. 366-368.
- [5] Методы расчета рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе / Министерство природных ресурсов и экологии РФ, 6 июня 2017 г. № 273.