

## **ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА УЧАСТКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**МОРОЗОВ В.Н., БУРОВ И.Ю., ТАТАРИНОВ В.Н.**

Геофизический центр Российской Академии Наук

Молодежная 3, Москва, 117296, Россия

### *Аннотация*

*Рассмотрены вопросы выбора участков земной коры для размещения и захоронения экологически опасных отходов, в том числе радиоактивных отходов высокой степени активности. Представлены экспертные оценки природных факторов, определяющих изоляционные свойства пород и стабильность структурно-тектонических блоков земной коры, а также условия разделения участков на благоприятные и неблагоприятные с точки зрения риска распространения опасных материалов в окружающую среду. Методический подход позволяет формализовать первый этап выбора участков для размещения отходов и использовать при этом разноплановые базы данных о свойствах, строении и процессах в земной коре.*

Степень надежности изоляции отходов от окружающей среды при их захоронении обуславливается естественными изоляционными свойствами геологической среды и стабильностью природных факторов, определяющих сохранность этих свойств во времени. Проблема выбора на территории отдельных стран наиболее стабильных геологических блоков для захоронения в них экологически опасных отходов, в том числе радиоактивных отходов высокой степени активности, включает в себя решение ряда фундаментальных задач из области наук о Земле, в частности - геологии, геомеханики и информатики и др. Ниже рассмотрены разработанные нами принципы выбора участков земной коры для размещения в них экологически опасных отходов промышленности. Основные ее положения безусловно можно использовать и для выбора участков для свалок и захоронения обычных отходов.

Во многих работах, посвященных данной проблеме говорится, что на первом этапе необходимы исследования по районированию территории и выделения участков куда при приемлемых транспортных расходах могут быть доставлены отходы. В основе этих работ должен лежать детальный анализ фондовых геолого-геофизических и картографических материалов. Естественно, без формализации большого объема накопленной информации разнопланового характера из различных областей знаний исследователю невозможно ее эффективно использовать при принятии решения о степени экологической пригодности того или иного участка. Несмотря на то, что качественные геологические характеристики являются объективными и прошли апробирование специалистами, без численных критериев оценки свойств и стабильности структурно-тектонических блоков и компьютерной технологии, позволяющей быстро проанализировать большое количество вариантов и выбрать экологически наименее опасный вариант, невозможно решить поставленную задачу.

Существующие в настоящее время общие подходы к выбору участков для размещения экологически опасных объектов основаны на рассмотрении блоков земной коры, расположенных в тектонически слабоактивных районах, обладающих малой проницаемостью, тектонической активностью и сейсмичностью. В качестве критериев оценки используются описательные характеристики массива (геологический тип пород, морфология и мощность толщи водоупоров, глубина их залегания, и т. д.). При этом в большинстве случаев при выборе регионов для размещения экологически опасных отходов не учитывается такое важное свойство геологической среды как неоднородность распределения свойств и протекающих процессов.

Оценку стабильности структурно-тектонических блоков, учитывая накопленный за рубежом и в стране опыт, целесообразно производить в несколько этапов, используя известный принцип последовательного уменьшения размеров анализируемых участков коры. Первый этап заключается в оценке регионального рейтинга территории и включает в себя анализ карт, архивного материала и результатов других исследований в масштабе 1:1 000 000 - 1:10 000 000 и районирование по трем категориям:

1. Участки, где размещение отходов приведет к негативным экологическим последствиям и строительство могильника отходов невозможно;
2. Участки, где размещение отходов возможно при выполнении дополнительных условий;
3. Участки потенциально пригодные для строительства могильников отходов;

При этом основополагающим является вопрос о граничных (критериальных) параметрах отнесения тех или иных участков в указанные группы. Многие авторы для ранжирования территорий пользуются экспертными оценками, оценивая состояние районов в баллах.

Так, в работе [1] приводится результат анализа специальных карт на основе геоинформационных технологий для целей предупреждения чрезвычайных ситуаций. При построении карты использованы 50 характеристик (синематических слоев). Состояние каждой переменной оценивается по пятибалльной шкале по отношению к нестабильности. Общая нестабильность определяется как отношение суммы баллов для данной территории к сумме, соответствующей условиям наибольшей нестабильности. Затем, при необходимости, вводится корректирующий коэффициент на основе тестирования по контрольным точкам с использованием весовых коэффициентов.

В работе [2], посвященной районированию городской территории по степени устойчивости к динамическому воздействию, функция неустойчивости сконструирована в виде суммы нелинейных функций отдельных факторов:

$$\Phi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x_i) \quad (1)$$

где  $\varphi_i(x_i)$  нелинейная функция вида

$$\varphi_i(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{для } x \leq f_{gn1} \\ f_1(x) & \text{для } f_{gn1} < x < f_{gn2} \\ f_2(x) & \text{для } x \geq f_{gn2} \end{cases}$$

Необходимо отметить, что этот подход более объективен, но его главный недостаток заключается в том, что зачастую невозможно установить вид функции  $f_i(x_i)$  для факторов  $F_n$ . Существуют и другие подходы.

По нашему мнению, на данном этапе исследований, на котором, как уже отмечено, анализируются разноплановые параметры в довольно мелком масштабе, экспертная оценка стабильности геологической среды является наиболее понятной для принятия решения о выборе участков для размещения отходов.

Из массы природных факторов выбраны те из них, от которых зависят изоляционные свойства пород, гидрогеологические и тектонические процессы и с которыми связана динамика распространения экологически опасных материалов и разрушение горного массива. С другой стороны, их количество ограничено, отсутствием надежного картографического материала и большим объемом работ по его переводу в машиночитаемую форму.

Все факторы, определяющие стабильность геологического блока, можно объединить в 3 группы:

- факторы, характеризующие внутренние свойства пород;
- факторы, характеризующие внешнее активное воздействие;
- факторы, определяющие динамику процессов протекающих.

Предположим, что на первом этапе было выбрано для анализа  $\{ J \}$  - количество блоков земной коры, являющихся потенциально пригодными для размещения отходов. Число значимых факторов, характеризующих изоляционные свойства и стабильность блоков равно  $N$ . Каждый фактор ( $F_n$ ) характеризует некоторое свойство, состояние или параметры процесса в конкретном структурном блоке и является статистической характеристикой, которая описывается гистограммой распределения вероятностей данной случайной величины.

Диапазон изменений значений фактора  $F_n$  разобьем на 3 интервала. Граничные интервальные значения ( $f_{gn1}$ ,  $f_{gn2}$ ) фактора  $F_n$  устанавливаются на основе экспертной оценки и являются критериями отнесения рассчитанного среднего значения  $F_n$  по анализируемому участку в группу 1, 2 или 3. Если  $F_n$  попадает в группу 1, то считаем, что по данному фактору участок неблагоприятен для размещения отходов, в третью - благоприятен, во вторую - участок удовлетворяет требованиям с некоторыми дополнительными условиями. В соответствии с этим фактору  $F_n$  присваивается экспертная оценка равная - 1, 2, 3 баллам.

Влияние каждого фактора неодинаково, поэтому установим весовой коэффициент - цену фактора  $C_n$ , величину характеризующую его значимость в интервале от 0 до 1. Цены факторов безусловно требуют более конкретного обоснования, однако их изменение не может повлиять на относительное значение экспертной оценки.

Определение граничных значений  $f_{gn1}$ ,  $f_{gn2}$  для разделения факторов по группам выполнено на основе сравнения величин  $F_n$  в наиболее стабильных участках земной коры (платформы, щиты) с аномальными зонами (зоны современной тектонической активизации) по картографическому материалу, а также путем анализа литературных источников, нормативных материалов и опроса экспертов. Не имея возможности в рамках данной работы подробно описать весь процесс выбора критериев экспертной оценки, остановимся коротко на некоторых общих принципах.

Наиболее крупной характеристикой земной коры в региональном плане является тип геодинамической системы литосферы. Отнесение участков земной коры в группы 1, 2 и 3 проводилось исходя из следующих соображений. Вначале рассматривалась дифференцированность земной коры, связанная с возрастом ее образования, затем - морфологический тип геодинамической системы, а также преимущественный тип геодинамических движений. Участки стабилизированной земной коры были оценены в 3 балла, стабилизирующиеся - в 2 и переходные - в 1 балл. Кроме этого, для участков, имеющих морфологический тип с резко выраженной линейностью, экспертная оценка снижалась на 1 балл. Полигональный морфологический тип с преобладающими вертикальными перемещениями был оценен в 3 балла. Учитывался также тип геодинамических движений - балл снижался для систем, испытывающих растяжение и поднятие, так как растяжение приводит к образованию зон мантийной конвенции, разломам и т.п., а поднятие - к увеличению скорости эрозии породного массива, с возможными вероятностью выхода могильника на поверхность и изменением гидрогеологического режима.

Интрузивные породы и соли были отнесены к группе 3, метаморфические - к 2, а осадочные к группе 1. В дальнейшем предполагается более подробная дифференциация пород по каждому литологическим разновидностям. Большую роль играют факторы характеризующие изоляционные свойства пород, такие как: плотность региональных разломов, мощность коры выветривания, мощность региональных водоупоров и петроплотностная характеристика пород. Разделение на группы по плотности региональных разломов было выполнено на основе сравнения участков, обладающих по мнению геологов мощной разломной тектоникой, где заведомо нельзя размещать отходы (плотность разломов более 13 на км<sup>2</sup>), и "идеальных" районов, где плотность разломов составляет величину менее 6 на км<sup>2</sup>. Разделение по плотности горных пород основывалось на многочисленных натуральных определениях плотности для различных литологических разновидностей горных пород, приведенных в справочниках.

Кроме этого, были учтены такие региональные факторы как плотностная дифференциация мантийно-коровых блоков, т.е. отклонение плотности от нормы в условных единицах, глубинные аномалии силы тяжести, глубина залегания поверхности фундамента и мощность консолидированной земной коры. Они косвенно связаны с региональными зонами разуплотнения и тектонической активностью районов и в меньшей мере определяют изоляционные свойства горных пород, что было учтено в уменьшении их весового коэффициента -  $C_n$ . Разделение на группы проводилось путем сравнения показателей указанных факторов в крайне неблагоприятных районах, например горный район Тянь-Шаня, и тектонически спокойных, например, щиты Русской платформы.

Во вторую группу условно были отнесены факторы, от которых зависит внешнее воздействие на структурно-тектонические блоки. Это объединение несколько условно, так как здесь представлено и техногенное воздействие и природное. Граничные значения сейсмических параметров приняты на основе карты сейсмического районирования и требований СНиПов, регламентирующих, что сооружения подобного типа должны выдерживать семибалльное землетрясение. Повышенный уровень естественных напряжений характеризует с одной стороны тектоническую активность района, а с другой связан с образованием повышенной естественной нарушенности породного массива и с

техногенной нарушенностью, образуемой при проходке подземных выработок. Из геомеханики известно, что напряжения в массиве выше 20 МПа уже могут привести к образованию локальных зон разрушения в зависимости от размеров подземных сооружений и типа пород. Поэтому, участки массива, где напряжения превышают 20 МПа отнесены к 2 группе, а при превышении 40 МПа - в первую. Амплитуда и градиент скорости вертикальных движений оценивались на основе экспертного опроса специалистов. Кроме этого к неблагоприятной группе отнесены районы, где плотность населения превышает 10 чел/км<sup>2</sup>, и имеются крупные охранные объекты (заповедники, аэродромы, АЭС, химические заводы и т.д.).

В третьей группе представлены природные факторы, характеризующие гидрогеологические и тепловые процессы в структурно-тектоническом блоке. Первые ответственны за скорость переноса радионуклидов, в случае возможного их проникновения за искусственные барьеры, а вторые связаны, согласно кинетическим представлениям о процессах разрушения, со скоростью деструкции горных пород. Разделение на группы проводилось на основе оценки картографического материала. Диапазон максимального изменения этих характеристик на территории СНГ и условно разбивался на три интервала. Более строгая экспертная оценка этих параметров возможна на основе физического моделирования в подземных лабораториях и их характеристики могут быть уточнены.

В табл. 1 представлены: классификация указанных факторов, диапазон их изменения на территории СНГ, цены, граничные условия отнесения  $F_n$  в группы 1, 2, 3 [3].

После распределения каждого фактора по группам и присваивания им экспертной оценки следующий шаг - комплексная оценка суммы всех факторов и принятие решения о степени пригодности структурных блоков для размещения в них экологически опасных отходов промышленности. Основой для оценки является предположение о независимости влияния отдельных факторов друг на друга (действительно, трудно установить зависимость, например, между водопроницаемостью и интенсивностью землетрясений). Многими исследователями, в том числе в работе [2] допускается, что оцениваемые природные факторы независимы друг от друга. В тоже время, авторы видят в этом допущение, вызванное отсутствием в текущей литературе установленных видов зависимостей для большинства факторов, используемых нами.

Для суммарной экспертной оценки состояния структурно-тектонического блока введем понятие рейтинга структурного блока ( $Re$ ). Рейтинг структурно-тектонических блоков земной коры это сумма произведений экспертных оценок отдельных факторов на их весовые коэффициенты (цены), на основе которого блоки дифференцируются по степени пригодности отдельных территорий. Он определяется по формуле:

$$Re = \sum_{n=1}^N F_n C_n, \quad (2)$$

где  $F_n$  - экспертная оценка фактора в баллах от 1 до 3;  $C_n$  - цена фактора в относительных единицах от 0 до 1;  $N$  - количество анализируемых факторов.

Для того чтобы определить  $Re$  некоторого района необходимо: 1) Установить некоторое постоянное количество анализируемых факторов; 2) Определить диапазон

изменения этих факторов в каждой группе; 3) Присвоить каждому фактору цену -  $C_n$  и подсчитать  $Re$  по (1).

Оценить полученную величину рейтинга можно выбрав два эталонных района. Первый (идеализированный) такой, где все значения факторов попадают в группу 3; второй (нестабильный), где значения  $F_{n\text{ ср}}$  попадают в группу 1, (например, район Тянь-Шаня). Для этих участков определяются рейтинги  $Re_1$  и  $Re_2$ . Они будут соответствовать максимальному и минимальному значению  $Re$  на территории, а рейтинг всех структурно-тектонических блоков будет заключен в интервале от  $Re_1$  до  $Re_2$ . Установив  $Re$  конкретного блока, можно определить приведенный рейтинг -  $Re_p$ , характеризующий величину рейтинга в долях относительно "идеального" структурного блока.

Таблица 1

Факторы оценки рейтинга структурно-тектонических блоков земной коры

№ п/п	Название	Единица измерения	Пределы изменения	Рекомендуемые значения для отнесения в группу:			Цена фактора, $C_n$
				1 (1 балл)	2 (2 балла)	3 (3 балла)	
1	2	3	4	5	6	7	8
1. Оценка свойств геолого-структурного блока							
1	Геологический тип пород, занимающий основную площадь	тип	1-3	1	2	3	1,0
2*	Плотность региональных разломов	1/км <sup>2</sup>	-	$\geq 13$	6-13	$\leq 6$	0,6
3*	Плотностная дифференциация мантийно-коровых блоков (N-норма)	усл.ед	N-2E N+2E	$< N-1,5E$	N-E-N- 1,5E	$> N-E$	0,3
4	Мощность региональных водоупоров	м	0-2000	$\leq 50$	50-100	$\geq 100$	0,5
5*	Мощность консолидированной земной коры	км	10-50	$\leq 25$	25-42	$\geq 42$	0,3
6	Геодинамическая система	тип	1-3	1	2	3	0,5
7	Мощность коры выветривания	м	0-300	$\geq 100$	50-100	$\leq 50$	0,5
8*	Глубина залегания поверхности фундамента	км	0-(-10)	$\leq (-3)$	(-1)-(-3)	$\geq (-1)$	0,3
9*	Глубинные аномалии	мГал	(-100)-	$\geq 100$	50-100	(-100)-50	0,3

	силы тяжести		150				
10*	Глубина поверхности Мохо	км	(-20)-(-70)	$\geq(-35)$	(-35)-(-40)	$\leq(-40)$	0,2
11*	Петроплотностная характеристика пород	г/см <sup>3</sup>	1,9-3,0	$\leq 2,25$	2,25-2,70	$\geq 2,70$	0,4
12*	Средняя высота над уровнем моря	м	0-8000	$\geq 2500$	0-100, 1600-2500	100-1600	0,4

## 2. Оценка внешнего воздействия на блок

13	Интенсивность вероятных землетрясений	баллы (шкала MSK-64)	0-9	$\geq 7$	5-7	$\leq 5$	0,4
14	Повторяемость землетрясений	раз/100 лет	$> 0$	$\geq 1$	1-0,01	$\leq 0,01$	0,3
15*	Амплитуда вертикальных неотектонических движений	м	(-7000)-7000	$> 5000$	(-500)-0, 500-5000	0-500	0,5
16*	Градиент скорости вертикальных неотектонических движений	10 мм/мм год	(-2000)-800	$\geq 1500$	800-1500, $< (200)$	(-200)-800	0,4
17	Уровень естественных напряжений	МПа	0-70	$\geq 40$	20-40	$\leq 20$	0,5
18	Плотность населения	чел/км <sup>2</sup>	0-150	$\geq 10$	1-10	$\leq 1$	0,4
19	Наличие охраняемых объектов	да, нет	-	да	да	нет	0,2
20	Количество осадков	мм/м <sup>2</sup>	0 - $> 2000$	$\geq 800$	500-800	0-500	0,2

## 3. Оценка процессов в блоке

21	Средний годовой подземный сток	мм	0-200	$\geq 1500$	800-1500	$\leq 800$	0,3
22	Среднемноголетняя величина подземного стока	%	0-60	$\geq 50$	40-50	$\leq 40$	0,3
23	Водопроницаемость	(1 км м)/сут	0-1500	$\geq 1000$	200-1000	$\leq 200$	0,5
24	Средний годовой	л/(с км <sup>2</sup> )	0-35	$\geq 25$	20-25	$\leq 20$	0,4

	поверхностный сток рек						
25	Максимальный модуль дождевого стока	м <sup>3</sup> /(с км <sup>2</sup> )	0-3,5	<=2,5	2,0-2,5	<=2,0	0,2
26*	Геотермический градиент	С <sup>0</sup> /1000м	5-70	<=50	30-50	<=30	0,2
27*	Тепловой поток	Вт/м <sup>2</sup>	10-70	>=50	40-50	<=40	0,2

\* - параметры для которых использованы оцифрованные карты

В табл. 2 приведены рассчитанные значения Re и Re<sub>p</sub> для некоторых территорий СНГ.

Таблица 2  
Значения относительного и приведенного рейтингов территорий СНГ

Район	Re	Re <sub>p</sub>	Район	Re	Re <sub>p</sub>
1. Идеализированный	29,5	1,0	5. Район Хабаровска	20,7	0,70
2. Район Москвы	21,6	0,73	6. Район Тянь-Шаня	10,1	0,41
3. Район Красноярска	25,5	0,86	7. Район Сев. Кавказа	15,0	0,51
4. Район Челябинска	22,4	0,76			

Из нее следует, что экспертная оценка Re изменяется от 10,1 до 29,5, а Re<sub>p</sub> от 1,0 до 0,4. Таким образом, появляется возможность районирования территории отдельных стран на основе применения геоинформационных технологий. Все регионы СНГ по значениям Re и Re<sub>p</sub> можно условно разделить на 3 категории:

1. 18,0 > Re >= 10,1    0,61 > Re<sub>p</sub> >= 0,4    неблагоприятные районы
2. 24,0 >= Re >= 18,0    0,8 >= Re<sub>p</sub> >= 0,61    переходные районы
3. 29,5 >= Re > 24,0    1,0 >= Re<sub>p</sub> > 0,8    благоприятные районы.

После выбора структурного блока следующий логический шаг должен заключаться в оценке ошибки выбора блоков на основе анализа законов распределения случайных величин F<sub>n</sub> для конкретных территорий. Это можно сделать на основе известных положений теории статистического анализа вероятностей распределения случайных величин [4, 5 и др.]. В общем случае, в качестве оценки ошибок отрицательного и положительного решений по одному фактору F<sub>n</sub> можно воспользоваться следующим выражением [5],

$$R_n = (p_{+n} C_{ан} \alpha_n + p_{-n} C_{вп} \beta_n), \quad (3)$$

где p<sub>+n</sub>, p<sub>-n</sub> - вероятности положительной и отрицательной гипотез отнесения фактора F<sub>n</sub> в группы экспертной оценки 1,2,3; α<sub>n</sub>, β<sub>n</sub> - ошибки первого и второго рода, C<sub>ан</sub>, C<sub>вп</sub> - цены ошибок первого и второго рода.



Для того чтобы обоснованно применить этот критерий необходимо знать  $p_{-n}$ ,  $p_{+n}$  и  $C_{ан}$ ,  $C_{вп}$ , нахождение которых представляет серьезные трудности и требует дальнейших исследований, а также обоснования зависимости факторов оценки друг от друга.

Поэтому, чтобы оценить ошибку по всем факторам воспользуемся суммарной оценкой величины  $R_n$ , считая эту оценку не строгой в статистическом смысле, а полуколичественной экспертной оценкой ошибок выбора блоков. Тогда алгоритм оценки можно представить следующим образом.

1. На основе применения геоинформационных систем (ГИС) устанавливается распределение факторов  $F_1, F_2, \dots, F_n$  в виде гистограмм вероятностей распределения  $F_n$  в растре  $200 \times 200$  км с окном  $< 0,5$  км<sup>2</sup>.

2. Допустив, что распределение факторов для групп 1 и 2 по форме аналогичны  $F_n$  конкретного района, строятся гистограммы граничных распределений на уровне порогов  $f_{gn1}$  и  $f_{gn2}$ .

3. Для каждого фактора подсчитываются значения ошибок первого ( $\alpha$ ) и второго родов ( $\beta$ ).

4. Определяются риски ( $R_n$ ) экспертной оценки факторов по отдельным факторам.

5. Проводится экспертная оценка общего суммарного риска ( $R$ ) структурно-тектонического блока по  $N$  факторам.

В заключение необходимо отметить следующее. Используемые нами положения статистического анализа требуют в дальнейшем строгого обоснования и доработки, вместе с тем, уже сегодня существует объективная необходимость анализа большого объема данных и принятия оперативных решений по выбору участков для размещения экологически опасных отходов. Поэтому, авторами и сделана попытка разработки представленных методических основ для прогнозной экспертной оценки состояния участков земной коры при проектировании размещения в них отходов промышленности с наименьшим риском загрязнения окружающей среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Борунов А.К., Пузаченко Ю.Г., Сорокин А.Д. и др. Картографическая основа геоинформационной системы предупреждения чрезвычайных ситуаций //Изв. РАН. Сер. географ., 1993, N5. С.90-97
2. Лихачева Э.А., Гитис В.Г. и др. Комплексное районирование город-ской территории по степени устойчивости к динамическому воздействию //Геоморфология. 1993. N4. С.41-47
3. Морозов В.Н., Татаринов В.Н. Методика выбора участков земной коры для размещения экологически опасных отходов. Геоэкология. М. 1996. №6 . С.109-120
4. Morozov V.N., Tatarinov V.N. Formalizing regional kartographical information in designung ecologically dangerous installations in the earth's crust. 1st European Congress of Regional Geological Cartography and Information Systems. Italy, Bologna, 1994.
5. Никитин А.А. Статистические методы выделения геофизических аномалий. М., Недра, 1979. 280с