

Ч.К. Нгуен, И.К. Фоменко, В.В. Пендин, К.Т. Нгуен

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ПРИ РЕГИОНАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ (НА ПРИМЕРЕ РАЙОНА СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ЛАОКАЙ, ВЬЕТНАМ)

Информационные классы

Введение

Научно-обоснованный прогноз реакций литосферы на различные виды естественных и искусственных взаимодействий и составление на этой основе карты оползневой опасности дает возможность правильно спланировать мероприятия по управлению состоянием региональных, локальных и элементарных литотехнических систем (ЛТС), обосновать пространственно-временную структуру мониторинга ЛТС, создать инженерно-геологическую основу для разработки плана народно-хозяйственного освоения территорий [1].

За последние годы в разных странах и разными исследователями были разработаны новые методы комплексного анализа ЛТС с целью прогнозирования развития оползней различного генезиса. Так как большинство методов прогнозирования оползневой опасности требуют комплексного анализа значительных массивов данных, все большее применение находят методики, основанные на использовании геоинформационных систем (ГИС). С внедрением ГИС моделирование оползневой опасности стало доступным, удобным и возможным как при научном анализе, так и при экономической оценке прогнозного освоения территорий [8].

В России наибольшее распространение получил метод «оползневого потенциала» [3], относящийся к группе методов взвешенных произведений. Он основан на определении вероятности возникновения оползней в зависимости от величин вероятностей воздействия факторов оползнеобразования ($P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$). Исходную вероятность определенного фактора P_k авторы метода принимали равной отношению площади активных оползней к площади распространения фактора (данная методика была усовершенствована И.О. Тихвинским [14]. Предложенное им усовершенствование заключалось в следующем: если будет установлена величина для какого-либо определенного фактора оползнеобразования, то вероятность P_k для любого другого

k -го фактора следует находить с учетом условной вероятности).

В последнее время в практике региональной оценки оползневой опасности начал активно применяться метод анализа иерархий [12], например, с определенными упрощениями он был использован в работе [13].

Целью данного исследования являлась региональная оценка оползневой опасности региона северо-западный Лаокай с использованием модифицированного метода анализа иерархий.

1. Краткая информация об условиях района исследований

Район исследования расположен в северо-западной части провинции Лаокай (север Вьетнама) на границе с Китаем и удален от Ханоя на 300 км. Он занимает площадь около 1950 км² и образован тремя административными единицами: городом Лаокай и округами Шапа и Батсат (рис. 1).

Рельеф региона – сильно расчлененный. Высота над уровнем моря изменяется от 200 м в долине Реки Тхао до 3000 м и выше в пределах горного хребта Хоанг Льен Сын, а гора Фансипан высотой в 3143 метра считается самым высоким пиком на полуострове Индокитай.

Годовое количество осадков в предгорьях хребта Хоанг Льен Сын составляет 2000-3600 мм, при этом 80-85% от их общего количества приходится на летний период.

2. Методика исследований

2.1. Подходы к анализу оползневых факторов

Региональная оценка оползневой опасности выполняется на основе разделения изучаемой территории на группы участков (зон), отличающихся между собой по природным условиям формирования оползней, а также по интенсивности и характеру влияния инженерно-хозяйственной деятельности. При этом в обязательном порядке должны учитываться: основные

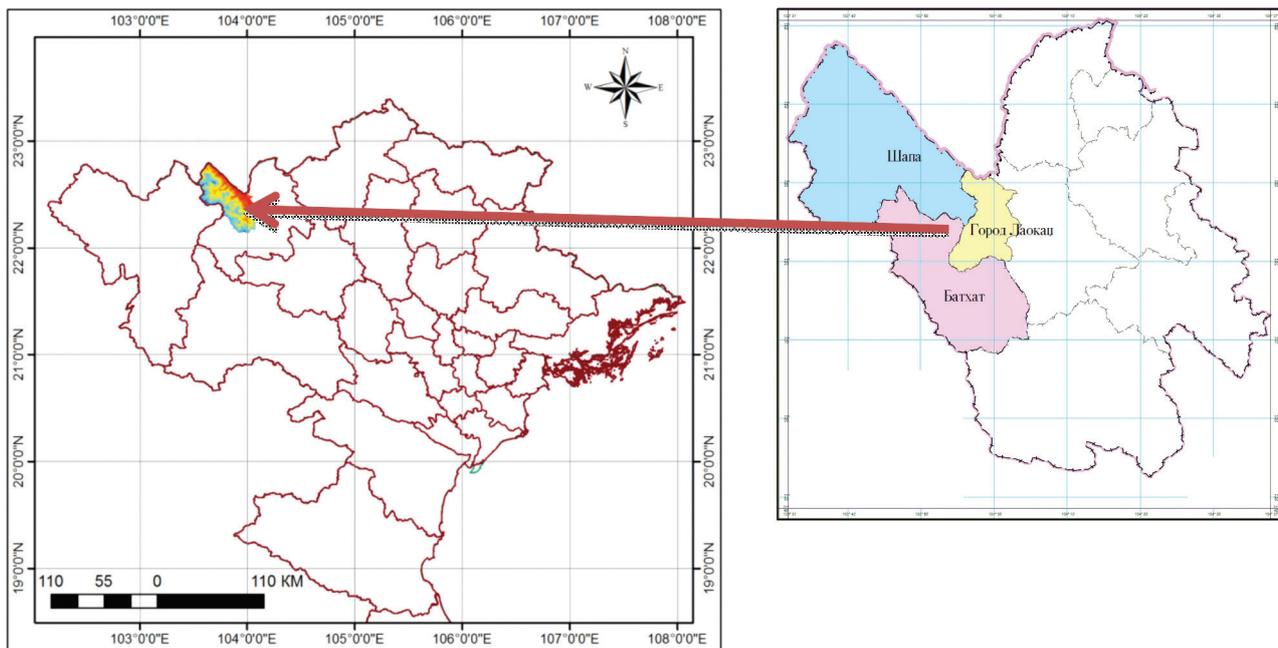


Рис. 1. Расположение района исследований

литолого-генетические комплексы пород, слагающих склоны; крутизна склонов, интенсивность основных природных оползнеобразующих процессов и др. [16].

Анализ оползневых факторов может проводиться с использованием либо способа взвешенных сумм, либо посредством взвешенных произведений [19, 21]. Каждый подход имеет свои достоинства и ограничения, поэтому на практике рекомендуется использовать их комплексно, а затем окончательное распределение совокупных значений сравнивать для установления соответствия.

Способ взвешенных сумм в классической формулировке может быть определен следующим образом:

$$S = w_1 x_{i1} + w_2 x_{i2} + \dots + w_j x_{ij} + \dots + w_n x_{in}, \quad (1)$$

где S – интегрированный показатель восприимчивости территории к оползневому процессу; w_j – вес фактора j ; x_{ij} – вес класса i фактора j ; n – количество независимых факторов.

Способ взвешенных произведений определяется выражением следующего вида:

$$S = (w_1 x_{i1} \times w_2 x_{i2} \times \dots \times w_j x_{ij} \times \dots \times w_n x_{in}) / 1\,000\,000, \quad (2)$$

где S – интегрированный показатель восприимчивости территории; w_j – вес фактора j ; x_{ij} – вес класса i фактора j ; n – количество независимых факторов.

2.2. Алгоритм классической формулировки МАИ для оценки региональной оползневой опасности

Метод анализа иерархий (МАИ) [12] предоставляет экспертам относительно простой и эффективный способ измерения объективных и субъективных факторов

посредством попарных относительных сравнений и вычисления соответствующих приоритетов шкалы отношений. Он, в классическом понимании, находится на стыке метода экспертных и балльных оценок.

Первый шаг МАИ – построение иерархической структуры, объединяющей цель выбора, критерии, альтернативы и другие факторы, влияющие на выбор решения.

Иерархическая структура МАИ (рис. 2) – это графическое представление проблемы в виде перевернутого дерева, где каждый элемент, за исключением самого верхнего, зависит от одного или более выше расположенных элементов. Система представляет собой строгую иерархию, если допустимы связи только между соседними уровнями от верхнего к нижнему.

Приоритеты – это числа, которые связаны с узлами иерархии. Они представляют собой относительные веса элементов в каждой группе. Подобно вероятностям, приоритеты – безразмерные величины, которые могут принимать значения от нуля до единицы. Чем больше величина приоритета, тем более значимым является соответствующий ему элемент. Сумма приоритетов элементов, подчиненных одному элементу выше лежащего уровня иерархии, равна единице. Приоритет цели по определению равен 1,0.

Шкала или масштаб сравнения значимости факторов, предложенная Т. Саати в рамках МАИ, состоит из словесных определений «одинаковая значимость», «слабая значимость», «сильная значимость» и т.д. Интенсивность этих определений может быть выражена числовыми значениями 1, 3, 5, 7 и 9 соответственно (табл. 1).

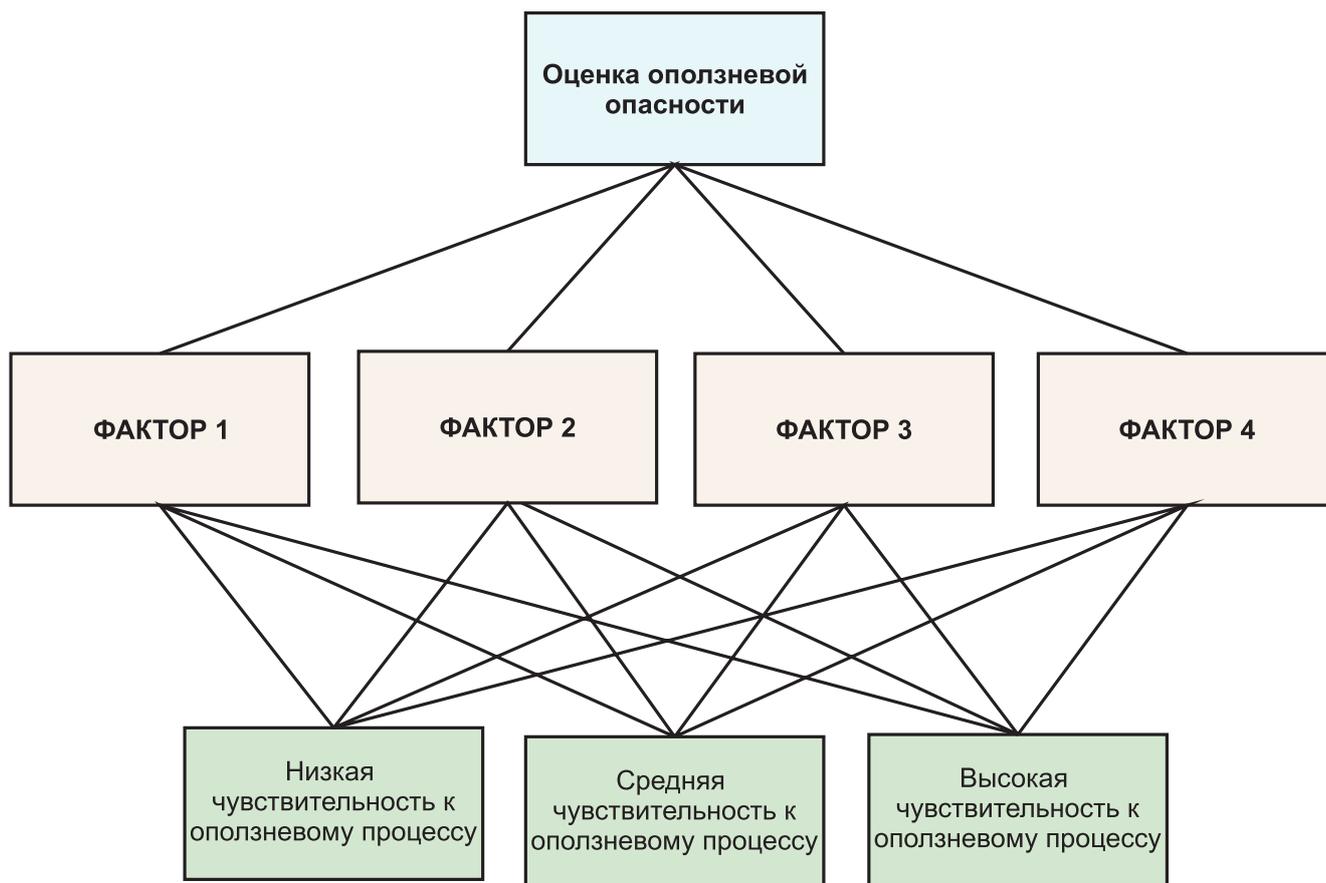


Рис. 2. Простейшая иерархия МАИ при оценке оползневой опасности

Таблица 1

Шкала сравнения значимости факторов по Т. Саати

Степень важности	Определение значимости	Пояснения
1	Одинаковая значимость	Два действия вносят одинаковый вклад в достижение цели
3	Некоторое преобладание значимости одного действия перед другим (слабая значимость)	Опыт и суждение дают легкое предпочтение одному действию перед другим
5	Существенная или сильная значимость	Опыт и суждение дают сильное предпочтение одному действию перед другим
7	Очень сильная или очевидная значимость	Предпочтение одного действия перед другим очень сильно. Превосходство практически явное.
9	Абсолютная значимость	Свидетельство в пользу предпочтения одного действия другому в высшей степени предпочтительны
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения между соседними значениями шкалы	Ситуация, когда необходимо компромиссное решение
Обратные величины приведенных выше чисел	Если действию <i>i</i> при сравнении с действием <i>j</i> приписывается одно из приведенных выше чисел, то действию <i>j</i> при сравнении с <i>i</i> приписывается обратное значение	Обоснованное предположение

На основе описанной выше шкалы строится матрица парных коэффициентов корреляции (табл. 2).

Таблица 2

Матрица парных коэффициентов корреляции

	A ₁	A ₂	A ₃	A _n
A ₁	1	a ₁₂	a ₁₃	a _{1n}
A ₂	a ₂₁	1	a ₂₃	a _{2n}
A ₃	a ₃₁	a ₃₂	1		a _{3n}
...
A _n	a _{n1}	a _{n2}	a _{n3}		1

Величина парных коэффициентов корреляции определяется следующим образом:

$$a_{ij} = \frac{I_i}{I_j}, \tag{3}$$

где I – уровень значимости (определяемый по шкале Т. Саати). Соответственно:

$$a_{11} = \frac{I_1}{I_1} \tag{4}; \quad a_{12} = \frac{I_1}{I_2} \tag{5}; \quad a_{13} = \frac{I_1}{I_3} \tag{6}; \quad a_{nn} = \frac{I_n}{I_n} \tag{7}$$

В свою очередь, веса факторов могут быть найдены из следующего выражения:

$$W_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \tag{8}$$

где W_i – вес фактора A_i; m_i – среднее геометрическое значение i строки, определяемое согласно следующим формулам:

$$m_1 = \sqrt[n]{\frac{I_1}{I_1} \times \frac{I_1}{I_2} \times \frac{I_1}{I_3} \times \dots \times \frac{I_1}{I_n}} = I_1 \times \sqrt[n]{\frac{1}{I_1 \times I_2 \times I_3 \times \dots \times I_n}}; \tag{9}$$

$$m_2 = \sqrt[n]{\frac{I_2}{I_1} \times \frac{I_2}{I_2} \times \frac{I_2}{I_3} \times \dots \times \frac{I_2}{I_n}} = I_2 \times \sqrt[n]{\frac{1}{I_1 \times I_2 \times I_3 \times \dots \times I_n}}; \tag{10}$$

.....

$$m_n = \sqrt[n]{\frac{I_n}{I_1} \times \frac{I_n}{I_2} \times \frac{I_n}{I_3} \times \dots \times \frac{I_n}{I_n}} = I_n \times \sqrt[n]{\frac{1}{I_1 \times I_2 \times I_3 \times \dots \times I_n}}. \tag{11}$$

Веса факторов оползнеобразования (оценка вектора приоритетов) соответственно будут равны:

$$W_1 = \frac{I_1 \times \sqrt[n]{\frac{1}{I_1 \times I_2 \times I_3 \times \dots \times I_n}}}{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n) \times \sqrt[n]{\frac{1}{I_1 \times I_2 \times I_3 \times \dots \times I_n}}} = \frac{I_1}{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n)}, \tag{12}$$

$$W_2 = \frac{I_2 \times \sqrt[n]{\frac{1}{I_1 \times I_2 \times I_3 \times \dots \times I_n}}}{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n) \times \sqrt[n]{\frac{1}{I_1 \times I_2 \times I_3 \times \dots \times I_n}}} = \frac{I_2}{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n)}, \tag{13}$$

$$W_n = \frac{I_n \times \sqrt[n]{\frac{1}{I_1 \times I_2 \times I_3 \times \dots \times I_n}}}{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n) \times \sqrt[n]{\frac{1}{I_1 \times I_2 \times I_3 \times \dots \times I_n}}} = \frac{I_n}{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n)}. \tag{14}$$

$$\text{При этом } W_1 + W_2 + \dots + W_n = 1, \tag{15}$$

а интегрированный показатель восприимчивости территории к оползневому процессу (**по способу взвешенных сумм**):

$$S = \frac{I_1}{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n)} \times X_1 + \frac{I_2}{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n)} \times X_2 + \dots + \frac{I_n}{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n)} \times X_n. \tag{16}$$

$$\text{При этом, полагая, что } X_i = \frac{A_{ij}}{A_{ij \max}} \tag{17}, \text{ если}$$

$$X_i \leq 1, \text{ и } X_i = \frac{A_{ij}}{A_{ij \max}} \times N, \text{ если } X_i > 1 \text{ (где } N \text{ – любое}$$

натуральное число, отличное от 0), окончательно получаем:

$$S = \frac{I_1}{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n)} \times \frac{A_{1j}}{A_{ij \max}} + \frac{I_2}{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n)} \times \frac{A_{2j}}{A_{ij \max}} + \dots + \frac{I_n}{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n)} \times \frac{A_{nj}}{A_{ij \max}}, \tag{19}$$

$$S = \frac{I_1 \times A_{1j} + I_2 \times A_{2j} + \dots + I_n \times A_{nj}}{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n) \times A_{ij \max}} \tag{20}$$

(если X_{ij} ≤ 1),

$$S = \frac{I_1 \times A_{1j} + I_2 \times A_{2j} + \dots + I_n \times A_{nj}}{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n) \times A_{ij \max}} \times N \tag{21}$$

(если X_{ij} > 1).

2.3. Модифицированный алгоритм формулировки МАИ для оценки региональной оползневой опасности

Основным недостатком классической формулировки МАИ, является необходимость использования экспертных оценок, что вносит определенный субъективизм в результат оценки региональной оползневой опасности.

Целью модификации описанного выше алгоритма являлась ликвидация субъективизма экспертных оценок. Дополнительным требованием, по отношению к классической формулировке МАИ, в нем является построение карты инвентаризации оползней.

С этой целью был использован следующий подход [4] основным критерием для определения значимости фактора является форма функции распределения выявленных оползней по информационным классам рассматриваемого фактора. В качестве примера на рис. 3 показаны две возможных функции распределения. Фактор 1, имеющий большую дисперсию, является менее значимым в сравнении с фактором 2. Отметим, что кривая распределения строится по количеству проявлений оползневых процессов в каждом классе фактора (например, в факторе «геологическое строение» выделено 3 класса, в каждом из которых выявлено определенное количество проявлений оползневых процессов).

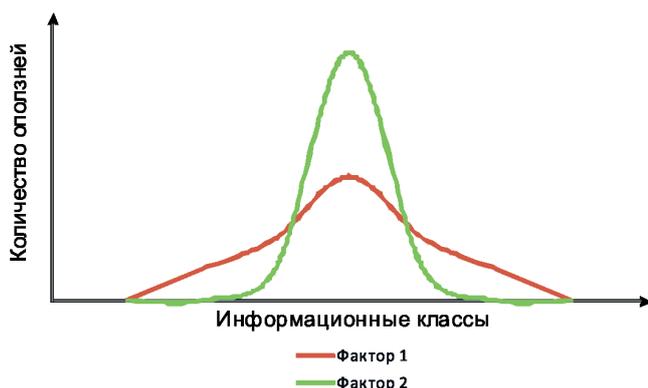


Рис. 3. Пример функции распределения выявленных оползней по информационным классам

Таким образом, стандартное отклонение функции распределения выявленных оползней по информационным классам рассматриваемого фактора является основой для определения I (уровня значимости).

Веса x_{ij} информационных классов нормируются относительно количества выявленных оползней таким образом, чтобы их сумма для каждого фактора составляла 1:

$$x_{ij} = \frac{\text{плотность оползней в данном информационном классе}}{\text{плотность оползней на исследуемой территории}}. \quad (22)$$

В остальном описываемый алгоритм ничем не отличается от классической постановки МАИ. Интегрированный показатель восприимчивости территории к оползневому процессу (по способу взвешенных сумм) определяется по формуле:

$$S = \frac{I_1}{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n)} \times X_1 + \frac{I_2}{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n)} \times X_2 + \dots + \frac{I_n}{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n)} \times X_n. \quad (23)$$

На основе приведенного алгоритма может быть построена карта оползневой опасности.

Для оценки степени оползневой опасности авторы использовали принцип «светофора». В соответствии с этим подходом, вся территория региона по величине интегрального показателя восприимчивости территории к оползневому процессу S была разделена на три зоны:

1. Первая зона – характеризуется низкой восприимчивостью геологической среды к оползневому процессу и, как следствие, низкой оползневой опасностью.
2. Вторая зона – характеризуется средней восприимчивостью геологической среды к оползневому процессу и, соответственно, умеренной оползневой опасностью.
3. Третья зона – характеризуется высокой восприимчивостью геологической среды к оползневому процессу и высокой оползневой опасностью.

Региональная оценка оползневой опасности района северо-западный Лаокай на основе модифицированного МАИ

Основой для оценки региональной оползневой опасности района северо-западный Лаокай послужила карта инвентаризации оползней, на которой отражены 340 мест их активизации [20].

Главной задачей при проведении анализа региональной оползневой опасности является определение условий оползнеобразования. Под условиями оползнеобразования следует понимать всю совокупность природных и антропогенных факторов, нарушающих равновесие масс горных пород. В качестве «основных», для района северо-западный Лаокай, на основе опыта региональных оценок оползневой опасности территории Вьетнама были выбраны следующие восемь факторов:

1. Крутизна склонов.
2. Горизонтальное расчленение рельефа.
3. Вертикальное расчленение рельефа.
4. Литологические различия грунтов.
5. Расстояние от активных разломов.
6. Гидрогеологические условия.
7. Количество осадков.
8. Тип растительности.

В свою очередь, каждый фактор представлен тремя информационными классами. Разделение факторов на классы приведено в табл. 3, рассчитанные веса факторов W_j ($j = 1, 2, 3, \dots, 8$) приведены в табл. 4.

В качестве исходных данных была использована информация, полученная по результатам дистанционного зондирования, в сочетании с материалами традиционных полевых исследований.

Общая схема оценки региональной оползневой опасности методом анализа иерархий представлена

на рис. 4, необходимый для анализа набор карт, построенный в ARCGIS 10.3 – на рис. 5.

Районирование территории района северо-западный Лаокай по оползневой опасности было выполнено как с применением способа взвешенных сумм (рис. 6а), так и посредством взвешенных произведений (рис. 7а).

Таблица 3

Разделение основных факторов, обуславливающих активизацию оползневых процессов в районе северо-западный Лаокай, на информационные классы и вес этих классов

Фактор W_j	Классы	Количество выявленных оползней	Площадь (км ²)	x_{ij}
1. Крутизна склонов (градусы)	<15	92	382,1883	0,451
	15-35	203	1207,622	0,315
	>35	45	360,4799	0,234
	Сумма	340	1950	1
2. Горизонтальное расчленение рельефа (км/км ²)	<0,3	42	546,25	0,150
	0,3-0,78	254	1207,618	0,412
	>0,78	44	196,426	0,438
	Сумма	340	1950	1
3. Вертикальное расчленение рельефа (км/км ²)	<600	69	287,698	0,470
	600-1250	249	1436,242	0,340
	>1250	22	226,362	0,190
	Сумма	340	1950	1
4. Литологические разности грунтов	Глинистые сланцы, песчаники и алевролиты	37	204,4368	0,325
	Биотитовые сланцы, двуслюдяные сланцы, графитовые сланцы, амфиболиты	106	478,1887	0,397
	Интрузивные породы: диориты, гранодиориты, граниты, субщелочные граносиениты	197	1267,818	0,278
	Сумма	340	1950	1
5. Расстояние от активных разломов (м)	>3000	175	1166,928	0,257
	<3000	67	428,982	0,268
	Зона разлома	98	354,36	0,475
	Сумма	340	1950	1
6. Гидрогеологические условия	Мало обводненные массивы грунтов	146	747,06	0,398
	Среднеобводненные массивы грунтов	161	933,883	0,352
	Сильно обводненные массивы грунтов	33	269,355	0,250
	Сумма	340	1950	1
7. Количество осадков (мм/1 год)	<2000	168	854,275	0,389
	2000-2800	111	592,301	0,371
	>2800	61	503,714	0,240
	Сумма	340	1950	1
8. Тип растительности	Лесные массивы и с лесопосадки	60	581,663	0,201
	Земли хозяйственного назначения	147	665,73	0,430
	Растительность практически отсутствует	133	702,754	0,369
	Сумма	340	1950	1

Таблица 4

Рассчитанные веса фактора оползнеобразования W_i

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Фактор	Стандартное отклонение (σ_i)	$1/\sigma_i$	Уровень значимости (I)	Вес W_i
Литологические разности грунтов	0,060	16,67	12	0,300
Гидрогеологические условия	0,076	13,16	8	0,200
Количество осадков	0,081	12,35	7	0,175
Крутизна склонов	0,110	9,09	4	0,100
Тип растительности	0,119	8,40	3	0,075
Расстояние от активных разломов	0,123	8,13	3	0,075
Вертикальное расчленение рельефа	0,140	7,14	2	0,050
Горизонтальное расчленение рельефа	0,159	6,29	1	0,025

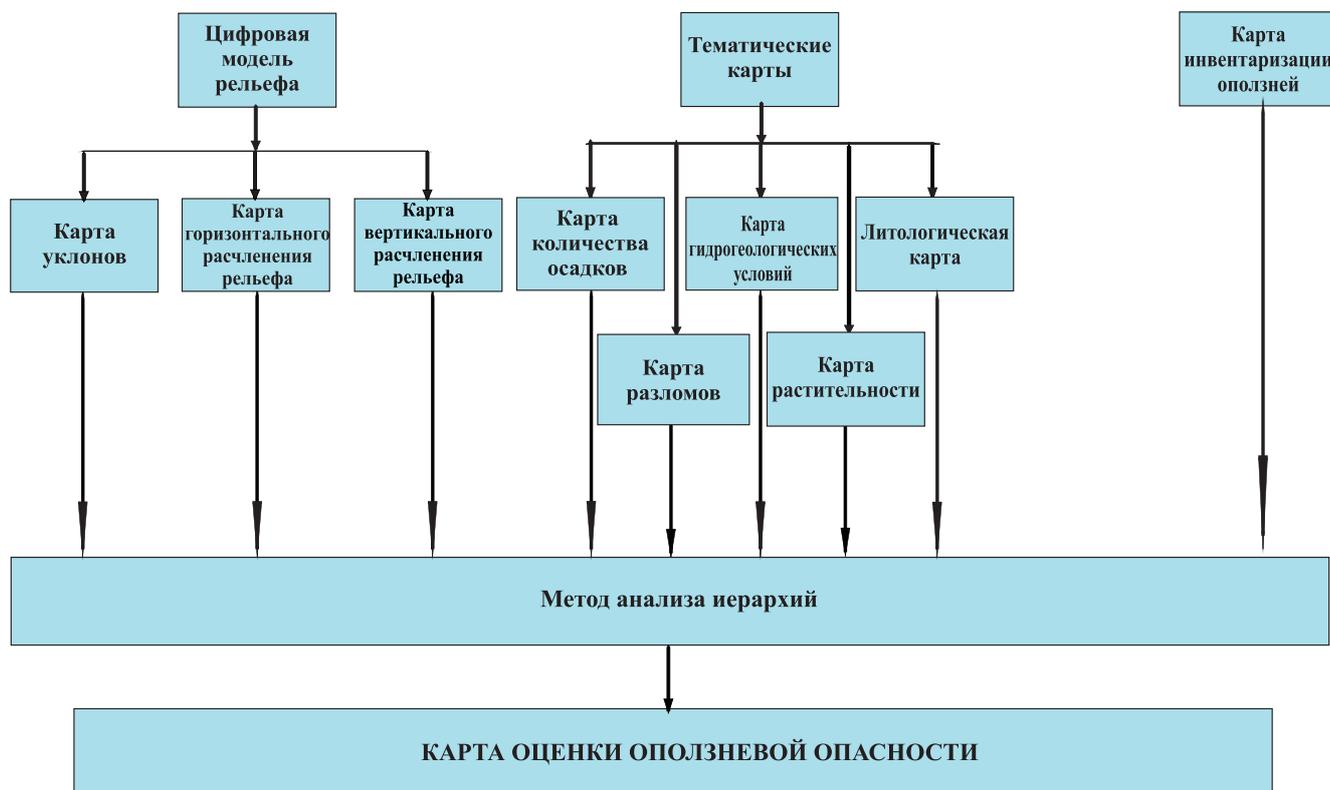
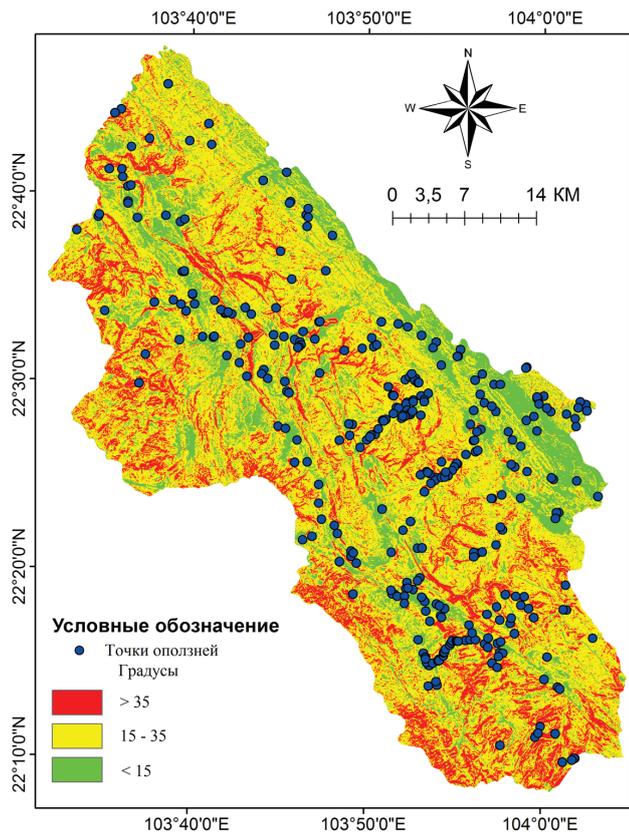
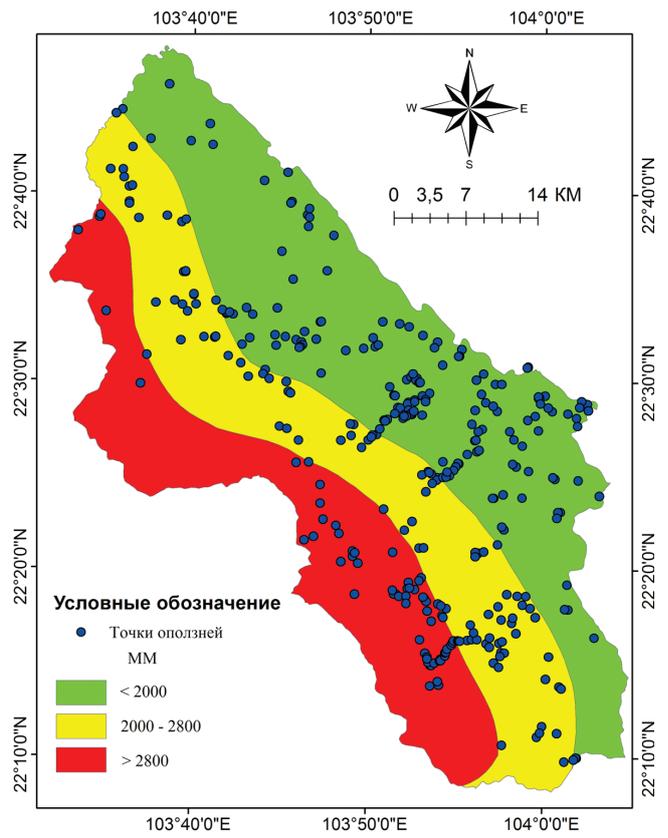


Рис. 4. Общая схема оценки региональной оползневой опасности методом анализа иерархий

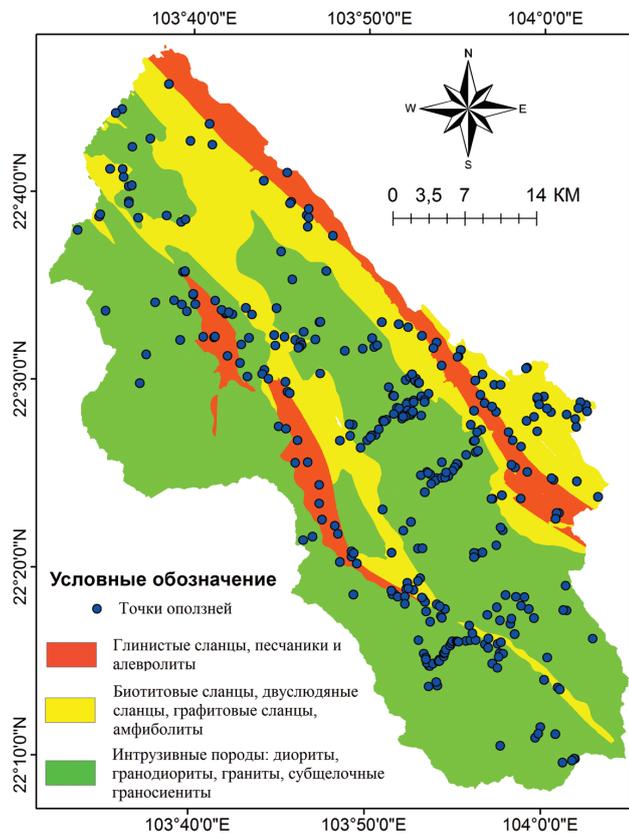
Геозкология



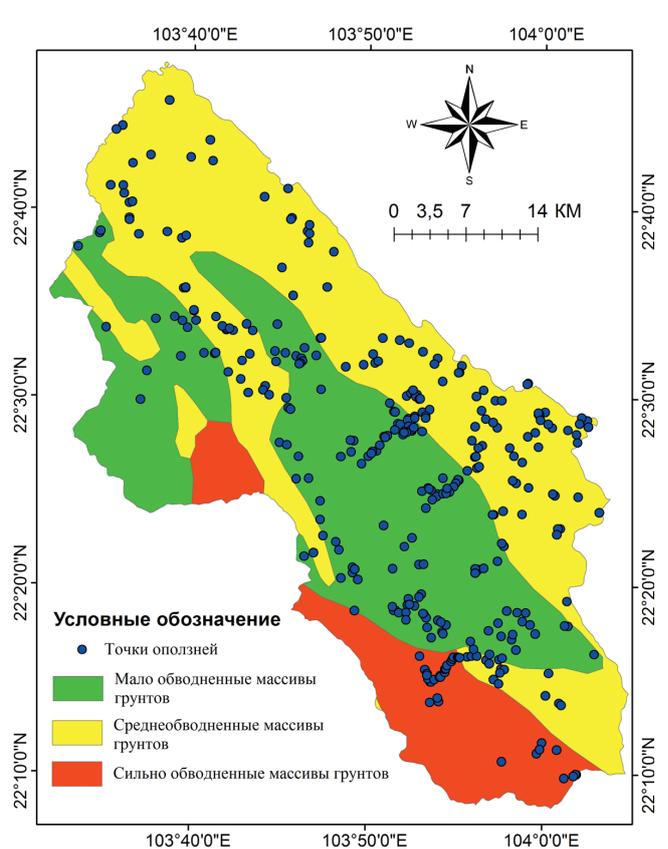
а) Карта уклонов



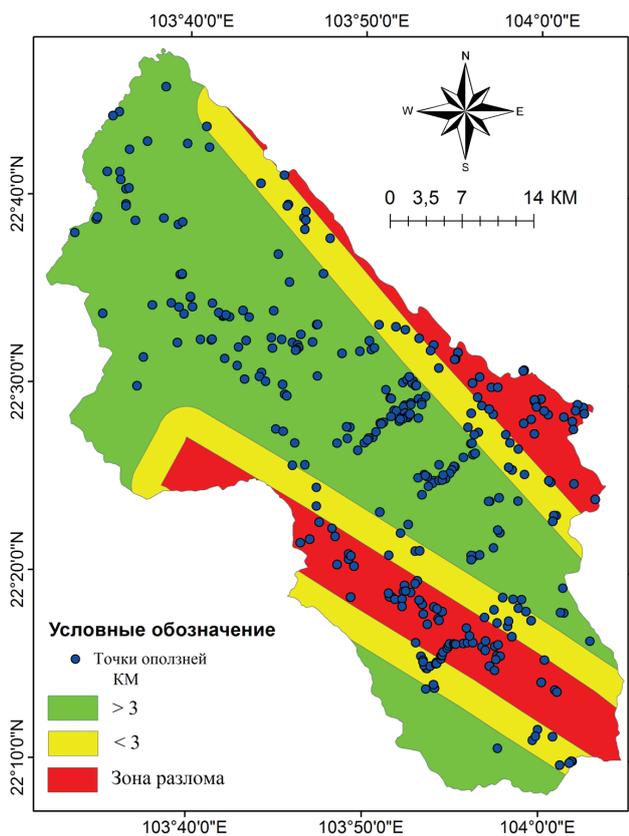
б) Карта количества осадков



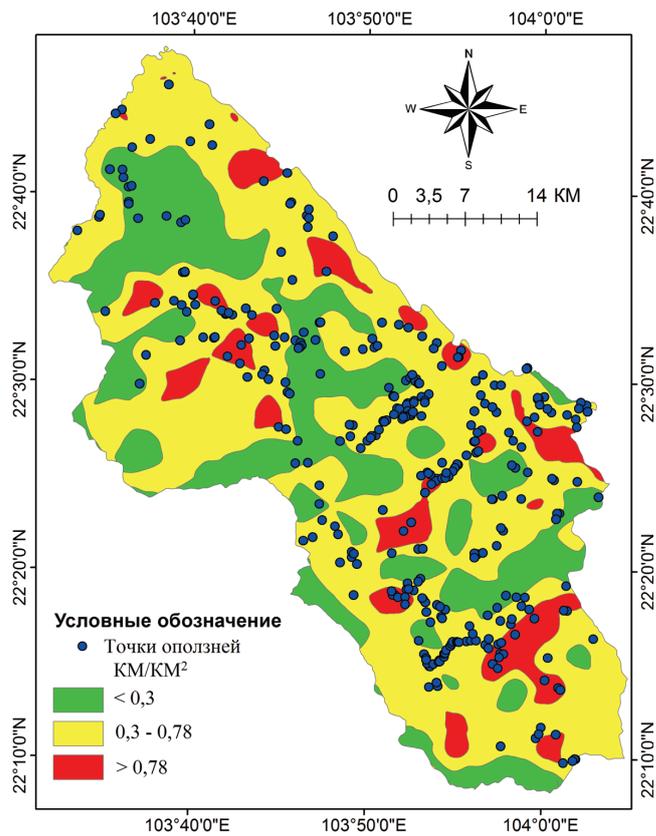
в) Карта литологического состава грунтов



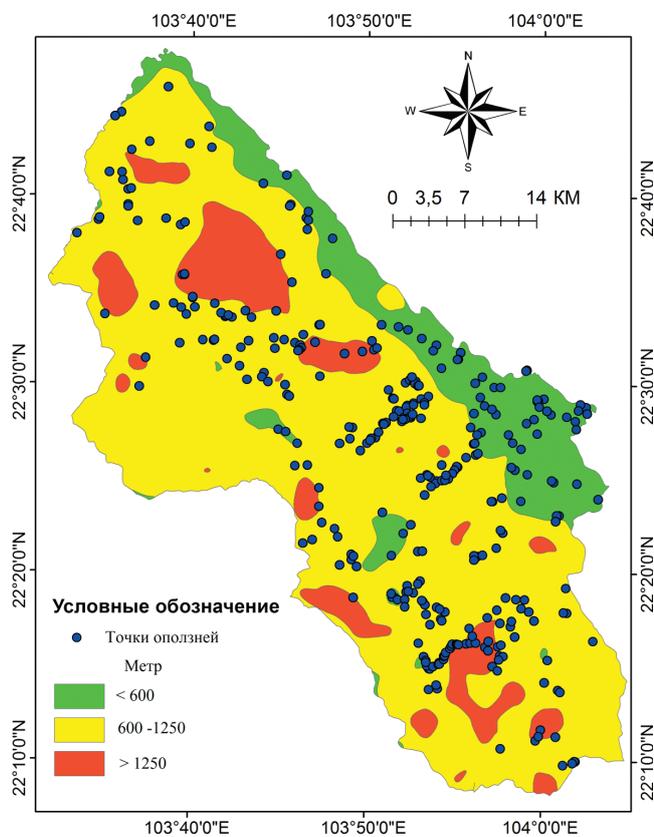
г) Карта гидрогеологических условий



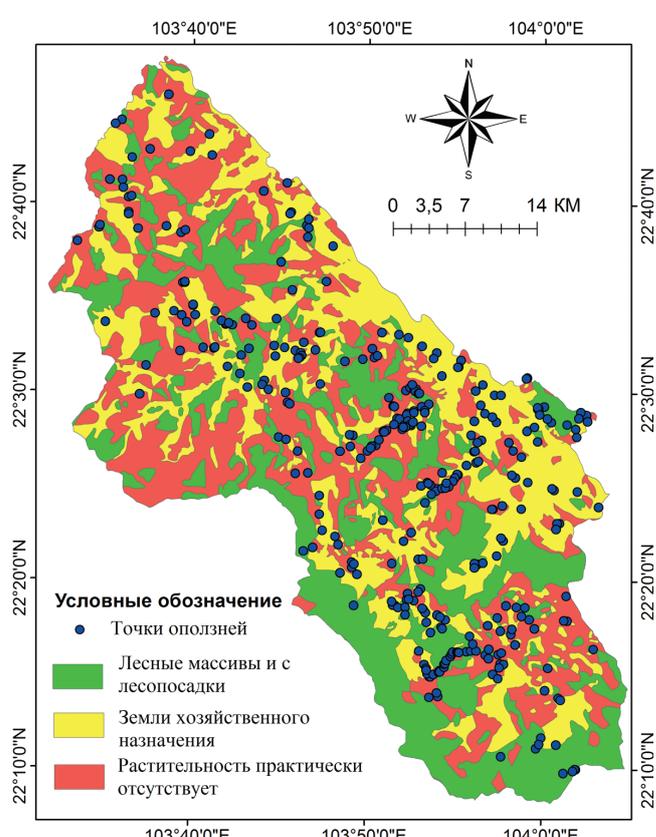
д) Карта удаленности от активных разломов



е) Карта горизонтальной расчлененности рельефа

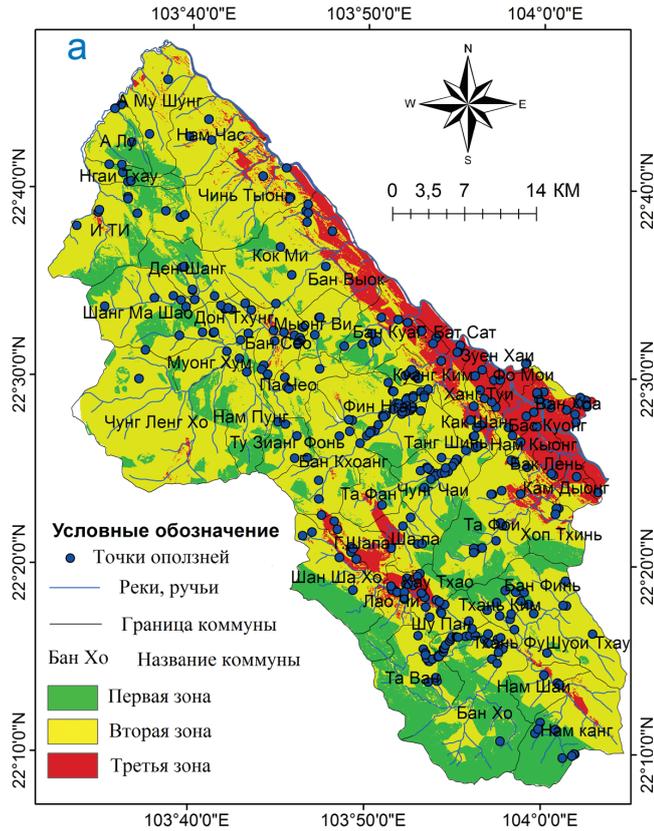


е) Карта вертикальной расчлененности рельефа



ж) Карта растительности

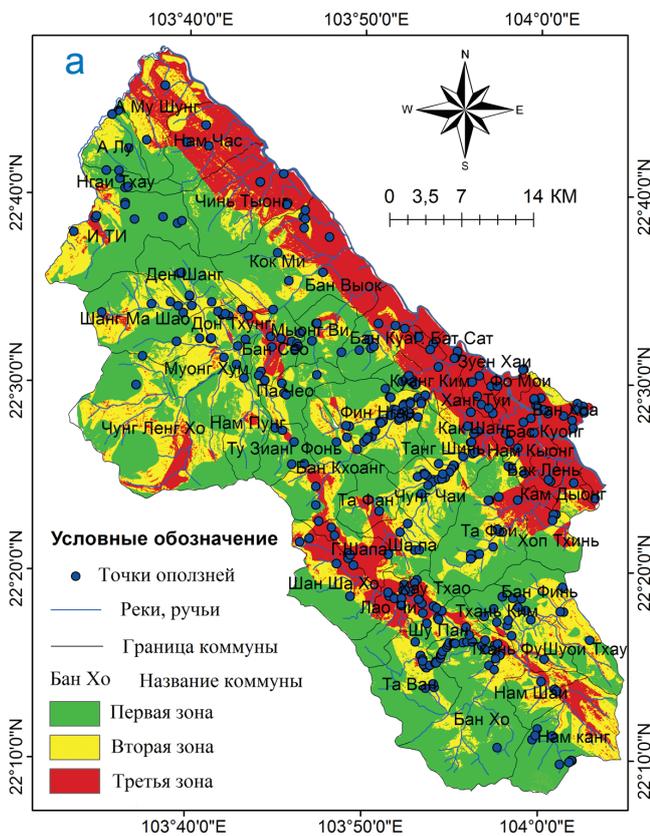
Рис. 5. Набор карт, использованный для оценки региональной оползневой опасности района северо-западный Лаокай



б



Рис. 6. Карта районирования оползневой опасности (а) и график распределения интегрированного показателя восприимчивости территории к оползневому процессу (S) на основе способа взвешенных сумм (б)



б

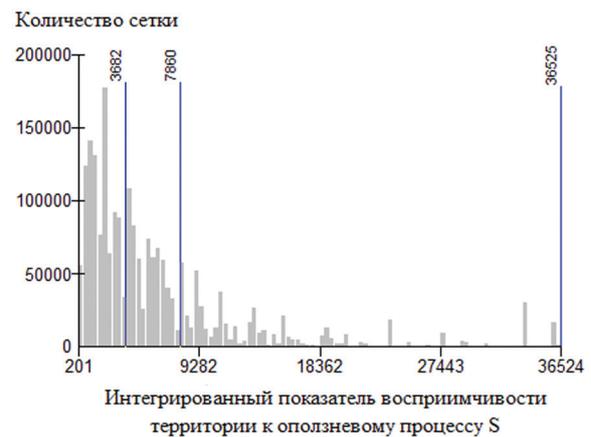


Рис. 7. Карта районирования оползневой опасности (а) и график распределения интегрированного показателя восприимчивости территории к оползневому процессу (S) на основе способа взвешенных произведений (б)

Важным моментом при построении карты являлся выбор разумных уровней классификационного показателя S .

В данном исследовании уровни восприимчивости территории к оползневому процессу были определены на основе анализа распределения S (рис. 6б, 7б) с использованием классификации по методу естественных границ.

В результате для способа взвешенных сумм были определены следующие зоны:

- первая зона: $S = 0,23-0,3$; характеризуется низкой оползневой опасностью;
- вторая зона: $S = 0,3-0,37$; характеризуется умеренной оползневой опасностью;
- третья зона: $S = 0,37-0,42$; характеризуется высокой оползневой опасностью.

Аналогичные зоны при районировании способом взвешенных произведений имеют следующие интервалы изменений:

- первая зона: $S = 200-3682$; характеризуется низкой оползневой опасностью;
- вторая зона: $S = 3682-7860$; характеризуется умеренной оползневой опасностью;
- третья зона: $S = 7860-36525$; характеризуется высокой оползневой опасностью.

Анализ полученных карт районирования показал, что наиболее высокая оползневая опасность характерна для восточных участков исследуемой территории, включая коммуны Бат Сат, Бан Куа, Бан Вьок, Чинь Тьонг, Лао Чи и городские округа Лаокай, и Шапа. В геологическом отношении зона высокой оползневой опасности приурочена к массивам грунтов, сложенных глинистыми сланцами, песчаниками и алевролитами, находящихся в зоне влияния активных разломов. Основными факторами активизации оползневого процесса в рассматриваемой зоне являются низкие прочностные свойства массивов грунтов, их нарушенность разрывными нарушениями, а также высокая энергия рельефа.

Низкая оползневая опасность характерна для западных районов, включая коммуны А Лу, Нгаи Тхау, Та Ван, Бан Хо, Нам Канг. В геологическом отношении зона низкой оползневой опасности приурочена к массивам грунтов, сложенных прочными интрузивными породами.

Визуальное сравнение карт районирования оползневой опасности, построенных различными способами, показывает большую «контрастность» карты, созданной на основе взвешенного произведения. Очевидно, это связано с тем, что распределение S является нормальным по «способу взвешенных сумм» и логнормальным «по способу взвешенных произведений».

4. Оценка надежности полученных результатов, на основе отношения правдоподобия

Отношение правдоподобия (ОП) позволяет оценивать неизвестные параметры, основанные на известных результатах. В рамках рассматриваемой проблемы, на основе известного распределения оползней выполним оценку интегрированного показателя восприимчивости территории к оползневому процессу или, иными словами, оценим адекватность выделенных зон при районировании оползневой опасности. Для этого воспользуемся следующей формулой [24]:

$$ОП = \frac{\%оползней}{\%площади} \quad (24)$$

Согласно [24], данное отношение правдоподобия для оценки S , по своей сути представляет выражение условной вероятности. Таким образом, случай, когда ОП больше 1, означает высокую вероятность нахождения оползня на рассматриваемом участке территории, и наоборот, если это отношение меньше 1, то вероятность нахождения оползня низкая. Результаты оценки ОП приведены на рис. 8, а также в табл. 5 (для способа взвешенных сумм) и в табл. 6 (для способа взвешенных произведений).

Как видно из рис. 6, для зоны с высокой оползневой опасностью ОП больше 1 в обоих случаях. Однако для второй зоны ОП при районировании по способу взвешенных сумм меньше 1, а по способу взвешенных произведений больше 1. Также стоит отметить значительные различия в площади зон, полученных разными способами (табл. 5 и 6). Так при районировании по способу взвешенных произведений почти половина территории отнесена к зоне с низкой оползневой опасностью (44,67%), при этом к зоне с высокой оползневой опасностью отнесено 25,43% площади, что практически в три раза больше, чем получено способом взвешенных сумм (8,93%). На карте, созданной по способу взвешенных сумм, большая часть территории (67,94%) характеризуется умеренной оползневой опасностью, в то время как на карте с использованием взвешенных произведений данная зона занимает только 29,9%. Таким образом, можно сделать вывод о том, что способ взвешенных произведений позволил получить при районировании более равномерное распределение зон с различной оползневой опасностью по площади исследуемой территории.

Заключение

В результате исследования была выполнена региональная оценка оползневой опасности района северо-западный Лаокай, с использованием модифицированного метода анализа иерархий.

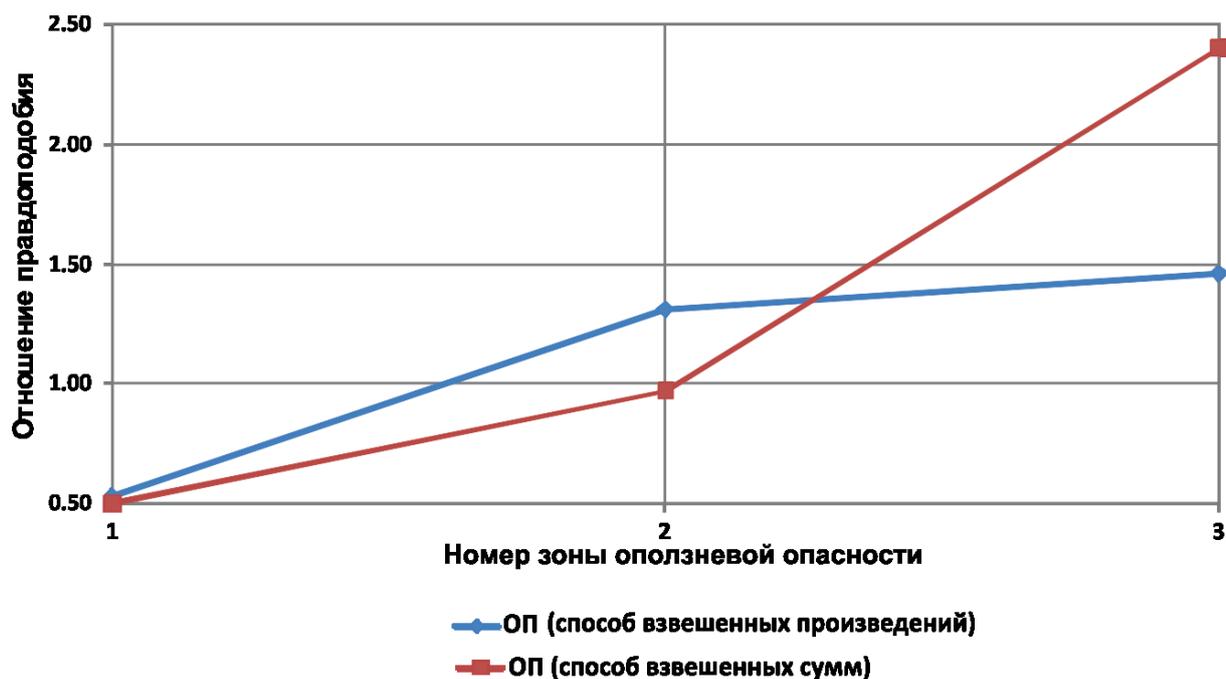


Рис. 8. Отношение правдоподобия для выделенных зон оползневой опасности

Таблица 5

Оценка отношения правдоподобия (районирование по способу взвешенных сумм)

Зона оползневой опасности	Площадь зоны	Количество оползней	% оползней	% площади	ОП
Первая	416	36	10,59	21,33	0,5
Вторая	1306	231	67,94	69,74	0,97
Третья	228	73	21,47	8,93	2,4

Таблица 6

Оценка отношения правдоподобия (районирование по способу взвешенных произведений)

Зона оползневой опасности	Площадь зоны	Количество оползней	% оползней	% площади	ОП
Первая	871	81	23,82	44,67	0,53
Вторая	583	133	39,12	29,9	1,31
Третья	496	126	37,06	25,43	1,46

Основные результаты и выводы заключаются в следующем:

- Предложенная модификация МАИ, позволяет избавиться от субъективности экспертных оценок при оценке региональной оползневой опасности территорий.
- Выполненное районирование позволило разделить территорию исследования на зоны с различной степенью оползневой опасности, при этом выявлено, что самой высокой оползневой опасностью обладают склоны, сложенные тектонически нарушенными глинистыми сланцами, песчаниками и алевролитами, самой низкой – ненарушенными интрузивными породами.
- Оценка отношения правдоподобия показала надежность полученных результатов.
- Анализ результатов районирования, полученных с использованием различных подходов (способа взвешенных сумм и способа взвешенных произведений) показал, что способ взвешенных произведений позволяет получить более равномерное распределение зон с различной оползневой опасностью по площади исследуемой территории.

При внедрении МАИ в практику инженерно-геологических исследований необходимо учитывать следующие моменты [11]:

- Данный метод не учитывает специфические условия отдельных оползневых участков, например, процесс подготовки и зарождения оползня рассматривается исходя из статистических данных, а не на основе инженерно-геологической информации.
- Принципиальным допущением является предположение о том, что будущие активизации оползневого процесса вероятнее всего произойдут при условиях, которые стали причиной потери устойчивости склонов в прошлом и настоящем, хотя факторы, инициирующие оползни, могут со временем изменяться, и главным образом это связано с техногенным воздействием.
- Некоторые факторы оползнеобразования могут не являться независимыми друг от друга, и поэтому существует возможность их автокорреляции или «двойного учета».
- Вероятно, выбранная классификация уровней оползневой опасности на основе метода естественных границ не является оптимальной, следствием чего является большое различие в площадях зон, полученных способами взвешенных сумм и взвешенных произведений. Данный вопрос нуждается в дополнительном изучении.

Однако основным выводом является признание эффективности использования МАИ при районировании территорий, подверженных воздействию оползневого процесса, а полученные данные по оползневой опасности не только можно, но и необходимо учитывать при планировании хозяйственного освоения территории.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-05-00577 А «Методология оценки и прогноза оползневой опасности».

Ключевые слова: оползень, оползневая опасность, метод анализа иерархий, региональная оценка оползневой опасности, дистанционное зондирование Земли, географические информационные системы (ГИС).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярг Л.А. Инженерная геодинамика. – М. : КДУ, 2007. – 440 с.
2. Ву Т.Т., Ле К.Т., Фам Х.Т., Дам Н., Нгуен С.Н., Нгуен Д.Т., Фам В.Х. Исследование геологически катастроф в некоторых ключевых областях на северо-востоке Северного Вьетнама с целью планирования социально-экономического развития этого региона : доклад (на вьетнамском языке) / Институт геологических наук и минеральных ресурсов Вьетнама ; Министерство природных ресурсов и окружающей среды Вьетнама. – Ханой, 2007. – С. 111-169.
3. Гулакян К.А., Кюнтцель В.В., Постоев Г.П. Прогнозирование оползневых процессов. М. : Недра, 1977. – 135 с.
4. Зыонг М.Х., Фоменко И.К., Пендин В.В. Региональный прогноз оползневой опасности для района Ха Лонг – Кам Фа на северо-востоке Вьетнама // Инженерная геология. – 2013. – № 1. – С. 46-54.
5. Ле К.Т., Ву Т.Т., Нгуен С.Н., Хоанг А.В., Доан Т.А., Фам В.Х., Нгуен Д.Т. Исследование геологических катастроф на основе приложений моделей и ГИС (например, в Донг Данг-Ланг Шон) (на вьетнамском языке) // Горные науки и технологии. Геология / Горно-геологический университет Ханоя. – Ханой, 2006. – № 16/10.
6. Ле К.Х. Исследование, оценка и районирование прогноз оползневой опасности в горах Вьетнама (на вьетнамском языке) : Проект на уровне государства, 2015.
7. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика : учебник. – Л. : Недра, 1977. – С. 273-276.
8. Нгуен Н.Т., Нгуен Т.З., Нгуен М.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы приложений (на вьетнамском языке) / Институт естественных наук – Вьетнамский нацио-

- нальный университет. – Ханой, 2003. – С. 259-270, 274-278, 294-301 и 371-378.
9. Нгуен Т.И. Оценка оползней и селей в некоторых горных районах Вьетнама и рекомендации противооползневых мероприятий (на вьетнамском языке) : Государственный проект, 2006.
10. Пендин В.В. Комплексный количественный анализ информации в инженерной геологии. – М. : КДУ, 2009. – С. 167-169.
11. Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. – М. : ЛЕНАНД, 2015.
12. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М. : Радио и связь, 1989. – 316 с.
13. Спасская С.К. Критерии выбора варианта направления трассы железной дороги, учитывающие развитие оползневых процессов [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Науковедение». – 2014. – № 3 (22). – С. 123. – <http://naukovedenie.ru/PDF/92TVN314.pdf> (дата обращения 16.01.2017).
14. Тихвинский И. О. К вопросу об использовании метода оползневого потенциала // Разработка методов прогнозной оценки развития оползневых явлений в условиях горно-складчатых областей альпийского орогена : материалы научно-технической конференции. – Тбилиси : Мецниереба, 1978. – С. 52-56.
15. Фам В.Т. Теоретические основы методики инженерно-геологических исследований (на вьетнамском языке) / Горно-геологический университет Ханоя. – Ханой, 2000. – С. 2-19 и 26-30.
16. Фам В.Т. Геологические риски во Вьетнаме и необходимость их решения (на вьетнамском языке) // Геологические риски и меры их профилактики : материалы научных национальных научно-практических конференций. – Ханой : Строительное издательство, 2008. – С. 9-14.
17. Чан Т.Х. Исследование и оценка геологических опасностей на территории Вьетнама и рекомендации противооползневых мероприятий. Фаза II: Исследование Северных горных провинций Вьетнама (на вьетнамском языке) : Государственный проект, 2004.
18. Чан Т.Х. Анализ взаимосвязи между морфологическими характеристиками и оползнями в провинции Лаокай (на вьетнамском языке) // Науки о Земле и окружающая среда. – 2013. – № 3. – С. 35-44.
19. Barredo J.I., Benavides A., Hervás J. and van Westen C.J. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2000. – 2.
20. Bui T.D, Tran A.T, Hoang D.N, Nguyen Q.T, Nguyen B.D, Ngo V.L, Biswajeet P. Spatial prediction of rainfall-induced landslides for the Lao Cai area (Vietnam) using a hybrid intelligent approach of least squares support vector machines inference model and artificial bee colony optimization // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2016. – P. 1-12.
21. Komac M. A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in peri-alpine Slovenia // Geomorphology. – 2006. – 74. – P. 17-28.
22. Lulseged A, Hiromitsu Y. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan // Geomorphology. – 2005. – 65 (1-2). – P. 15-31.
23. Saaty T.L. Fundamentals of Decision Making with the Analytic Hierarchy Process, 4922 Ellsworth Avenue, Pittsburgh, PA 15213 : RWS Publications, 2000.
24. Saro L. Application of Likelihood Ratio and Logistic Regression Models to Landslide Susceptibility Mapping Using GIS // Environmental Management. – 2004. – Vol. 34. – No. 2. – P. 223-232.
25. Tarboton D.G, Pack R.T., Goodwin C.N, Prasad A. Sinmap user's Manual. Sinmap 2: A stability index approach to terrain stability hazard mapping : Version for ArcGIS 9.x and Higher / Utah state university ; Teratech consulting Ltd. ; Canadian forest products Ltd. ; C.N. Goodwin fluvial system consulting, 2005. – P. 1-39.
26. Witold Z, Nguyen Q.C, Jerzy Z, Nguyen T.Y., Late Cenozoic tectonics of the Red River Fault Zone, Vietnam, in the light of geomorphic studies // Journal of Geodynamics. – 2011. – 69. – P. 11-30.