

ISSN 1993-5056 (Print)
ISSN 2587-8247 (Online)

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

• Vol. XVI • Том XVI • 2/2021 •

ENGINEERING GEOLOGY WORLD

При поддержке:



Саморегулируемая организация



Ассоциация
«Инженерные изыскания
в строительстве» —
Общероссийское отраслевое
объединение работодателей



ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Международный научный журнал

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Издаётся с мая 2006 г.
Выходит 4 раза в год.

ISSN: 1993-5056 (Print), ISSN: 2587-8247 (Online)
Префикс DOI: 10.25296

В журнале публикуются статьи ведущих специалистов в различных отраслях инженерной и экологической геологии. Основные темы — история, теория и методология инженерной и экологической геологии, грунтоведение, инженерная геодинамика, региональная инженерная геология, механика грунтов, техническая мелиорация грунтов, инженерная геология криолитозоны, гидрогеологические исследования, инженерная геофизика, сохранение памятников культуры и многие другие вопросы.

УЧРЕДИТЕЛЬ

ООО «Геомаркетинг», 115088, РФ,
Москва, ул. Машиностроения 1-ая, д. 5

ИЗДАТЕЛЬСТВО

ООО «Геомаркетинг», 115088, РФ,
Москва, ул. Машиностроения 1-ая, д. 5

РЕДАКЦИЯ

Кондратьева Екатерина Андреевна
Генеральный директор

Звонарева Наталья Викторовна
Заместитель генерального директора

Аверкина Татьяна Ивановна
Литературный редактор

Кашкина Марина Сергеевна
Отдел рекламы и отдел подписки

АДРЕС РЕДАКЦИИ

ООО «Геомаркетинг»
107076, РФ, Москва, ул. Электровзводская, д. 60
Тел. +7 495 210-63-90, +7 495 210-63-06
E-mail: info@geomark.ru
http://geomark.ru

ИП Гилманов М.А.

Допечатная подготовка, дизайн и верстка

ТИПОГРАФИЯ

ООО «Медиаколор», 127273, РФ, Москва,
Сигнальный проезд, д. 19, стр. 1

Свидетельство о регистрации средства массовой информации:
ПИ № ФС77-48918 от 12 марта 2012 г.

Подписка может быть оформлена в редакции, через Агентство
«Роспечать», ГК «Урал-Пресс», ООО «Информнаука»
(подписной индекс 36611).

Электронная версия: www.geomark.ru/our_journal/inzhenernaya-geologiya/
https://elibrary.ru/title_about.asp?id=28249

Подписано в печать 30.06.2021.

Формат издания 50х70/8. Бумага матовая. Печать офсетная.

Тираж 1 500 экз.

В статьях представлена точка зрения авторов, которая может не совпадать с мнением редакции журнала.

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет.

© ООО «Геомаркетинг», 2021

Фото на обложке: http://oopt.spb.ru/wp-content/uploads/2019/02/DJI_00491.jpg

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДИНАМИКА

Зыонг В.Б., Фоменко И.К., Ву Х.Д., Нгуен Т.Х., Сироткина О.Н.

**Региональная оценка оползневой опасности
модифицированным методом анализа иерархий
в геоинформационной системе (на примере района
Шапа провинции Лаокай Вьетнама)**

6

Квашук С.В., Богданов А.И.

**Условия и причины активизации опасных
геологических процессов при строительстве
и эксплуатации объектов инфраструктуры
в пределах Северного Сихотэ-Алиня**

22

ГРУНТОВЕДЕНИЕ

Дашко Р.Э., Карпенко А.Г.

**К вопросу о необходимости изучения влияния
болот как биогеоценозов на изменение инженерно-
геологических условий**

32

Ларионова Н.А.

**Влияние состава сланцевых зол на эффективность
укрепления глинистого грунта**

42

Калинин Э.В.

**Определение напряжений в массиве горных
пород с помощью акустоэмиссионного
эффекта памяти**

52

КНИЖНОЕ ОБОЗРЕНИЕ

Трофимов В.Т.

**Рецензия на книгу «Экологическая
геокибернетика — теория управления эколого-
геологическими системами»**

68

Самарин Е.Н.

**Рецензия на актуальную монографию
по электрокинетической очистке грунтов
от загрязнений**

70

Песчаные грунты России. В 2 томах

74

Ларионова Н.А., Самарин Е.Н.

**Методические основы лабораторных исследований
при физико-химическом укреплении грунтов**

74

**Перечень научных специальностей с указанием соответствующих
им отраслей науки, которым соответствует основное содержание
рецензируемого научного издания:**

05.23.19 — Экологическая безопасность
строительства и городского хозяйства
(технические науки);
05.23.02 — Основания и фундаменты, подземные
сооружения (технические науки);
25.00.03 — Геотектоника и геодинамика (геолого-
минералогические науки);
25.00.07 — Гидрогеология (геолого-
минералогические науки);
25.00.08 — Инженерная геология,
мерзлотоведение и грунтоведение
(географические науки);
25.00.08 — Инженерная геология,
мерзлотоведение и грунтоведение (геолого-
минералогические науки);
25.00.08 — Инженерная геология, мерзлотоведение
и грунтоведение (технические науки);

25.00.10 — Геофизика, геофизические
методы поисков полезных ископаемых
(геолого-минералогические науки);
25.00.10 — Геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых (физико-
математические науки);
25.00.10 — Геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых (технические науки);
25.00.20 — Геомеханика, разрушение горных
пород, рудничная аэрогазодинамика и горная
теплофизика (технические науки);
25.00.31 — Гляциология и криология Земли
(географические науки);
25.00.36 — Геоэкология (по отраслям) (геолого-
минералогические науки);
25.00.36 — Геоэкология (по отраслям)
(технические науки).

ENGINEERING GEODYNAMICS

Duong V.B., Fomenko I.K., Vu H.D., Nguyen T.H., Sirotkina O.N.

Regional assessment of landslide hazard using modified analytic hierarchies process method in geoinformation system (a study of the Sa Pa District, Lao Cai Province, Vietnam)

Kvashuk S.V., Bogdanov A.I.

Conditions and causes of activation of hazardous geological processes during construction and operation of infrastructure facilities within the Northern Sikhote-Alin

SOIL SCIENCE

Dashko R.E., Karpenko A.G.

Regarding the need to study the influence of bogs as biogeocenoses on the change of engineering-geological conditions

Larionova N.A.

Influence of the shale ash composition on the efficiency of clay soil strengthening

Kalinin E.V.

Determination of stress in rock mass using acoustic emission memory effect

BOOK REVIEW

Trofimov V.T.

Review on the book “Ecological geocybernetics: theory of controlling ecological-geological systems”

Samarin E.N.

Review on the actual book on electrokinetic clearing of soils from pollution

Sand soils of Russia. In 2 volumes

Larionova N.A., Samarin E.N.

Methodological bases of laboratory research in the physico-chemical soil strengthening



Cover photo: http://oopt.spb.ru/wp-content/uploads/2019/02/DJI_00491.jpg

ENGINEERING GEOLOGY WORLD

International scientific journal

The journal is included in the Russian List of peer-reviewed scientific publications, which should publish the main scientific results of dissertations for the degree of Candidate of Science and Doctor of Science.

6 Published since May 2006.
Issued 4 times a year.

ISSN: 1993-5056 (Print), ISSN: 2587-8247 (Online)
Prefix DOI: 10.25296

22 The journal publishes articles of leading experts in the field of engineering and ecological geology. The main topics are history, theory and methodology of engineering and ecological geology, soil science, engineering geodynamics, regional engineering geology, soil mechanics, technical melioration of soils, engineering geology of cryolithozones, hydrogeological investigations, engineering geophysics, preservation of cultural monuments and many other issues.

FOUNDER

Geomarketing LLC, 115088, Russian Federation, Moscow, Mashinostroyeniya 1st St., Bld. 5

32 **PUBLISHER**

Geomarketing LLC, 115088, Russian Federation, Moscow, Mashinostroyeniya 1st St., Bld. 5

42 **JOURNAL EDITORING**

Ekaterina A. Kondratieva
General Director

52 **Nataliya V. Zvonaryova**
Deputy General Director

Tatyana I. Averkina
Literary Editor

Marina S. Kashkina
Advertising Department and Subscription Department

68 **CONTACTS**

Geomarketing LLC
107076, Russian Federation, Moscow,
Elektrozavodskaya St., 60
Tel. +7 495 210-63-90, +7 495 210-63-06
E-mail: info@geomark.ru
<http://geomark.ru>

70

74

Individual entrepreneur Gilmanov M.A.
Prepress, Design and Layout

PRINTING HOUSE

Mediacolor LLC; 127273, Russian Federation, Moscow,
Signalnyy Proyezd, Bld. 19, Pde 1

Certificate of registration of mass media: PI № ФС77-48918 12 March 2012.

Subscription can be issued in the editorial board, through Rospechat agency, Ural-Press Group of Companies, and the Informnauka LLC (subscription index 36611)

Electronic version: www.geomark.ru/our_journal/inzhenernaya-geologiya/
https://elibrary.ru/title_about.asp?id=28249

Signed in print 30 June 2021.

Edition format 50x70/8. Matte paper. Offset printing.

Edition 1 500 psc.

The article presents the authors' point of view, which may not coincide with the opinion of the editorial board.

The editorial board is not responsible for the content of advertising materials.

© Geomarketing LLC, 2021

РЕГИОНАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ В ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ (НА ПРИМЕРЕ РАЙОНА ШАПА ПРОВИНЦИИ ЛАОКАЙ ВЬЕТНАМА)

ЗЫОНГ В.Б.*

Ханойский горно-геологический университет, г. Ханой, Вьетнам,
dvbinh@yandex.com

Адрес: ул. Вьен, д. 18, г. Ханой, 100000, Вьетнам

Российский государственный геологоразведочный университет
им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия

Адрес: ул. Миклухо-Маклая, д. 23, г. Москва, 117997, Россия

ФОМЕНКО И.К.

Российский государственный геологоразведочный университет

им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия, ifolga@gmail.com

ВУ Х.Д.

Вьетнамский институт геонаук и минеральных ресурсов, г. Ханой,
Вьетнам, hongdangbg@gmail.com

Адрес: ул. Тьентханг, д. 67, г. Ханой, 100000, Вьетнам

НГУЕН Т.Х.

Национальный строительный университет, г. Ханой, Вьетнам,
nguyenthuhuyen2579@gmail.com

Адрес: ул. Зяйфонг, д. 55, г. Ханой, 100000, Вьетнам



Источник: <https://danviet.vn/nhin-lai-vu-rao-trang-3-va-22-can-bo-chien-si-bi-vui-lap-o-quang-tri-20201027170407387.htm>

СИРОТКИНА О.Н.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, Россия, onsirotkina@gmail.com

Адрес: Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия

Оригинальная статья

Поступила в редакцию 18.05.2021 / Принята к публикации 25.06.2021 / Дата публикации 30.06.2021

© ООО «Геомаркетинг», 2021

Аннотация

Научно-обоснованный прогноз реакций литосферы на различные виды естественных и техногенных воздействий и составление на этой основе карты оползневой опасности дает возможность правильно спланировать мероприятия по управлению состоянием региональных, локальных и элементарных природно-технических систем (ПТС), создать инженерно-геологическую основу для обоснования плана народно-хозяйственного освоения территорий. За последние годы в разных странах и разными исследователями были разработаны новые методы комплексного анализа ПТС с целью прогнозирования развития оползней различного генезиса. Применение среды геоинформационных систем (ГИС) при изучении оползневых процессов позволяет подходить к рассматриваемой проблеме комплексно, оперировать большим количеством данных и применять различные методы анализа. Статья посвящена оценке оползневой опасности в районе Шапа модифицированным методом анализа иерархий в среде ГИС. Шапа — горный район на северо-западе вьетнамской провинции Лаокай площадью около 675,8 км², в котором каждый год фиксируется большое количество оползней. На основе опыта оценки оползневой опасности во Вьетнаме в качестве определяющих факторов были выбраны: 1) крутизна склонов; 2) состав грунтов; 3) расстояние от активных разломов; 4) вертикальное расчленение рельефа; 5) горизонтальное расчленение рельефа; 6) обводненность массивов; 7) количество осадков; 8) тип растительности. В результате анализа распределения совокупного индекса восприимчивости территории к оползневым процессам (S) составлены карты, позволившие разделить изучаемый район на три зоны по оползневой опасности. В зонах с высокой опасностью расположены следующие населенные пункты: коммуна Банкхоанг, район Шапа, города Хаутхао, Лаочи и Шупан. Высокая оползневая опасность связана с участками, в геологическом разрезе которых присутствуют обводненные глинистые сланцы, песчаники и алевролиты и которые находятся в зоне влияния активных разломов.

Ключевые слова:

оползень; оползневая опасность; ГИС; модифицированный метод анализа иерархий; оползневая восприимчивость; Шапа; Вьетнам

Благодарности:

Авторы выражают благодарность руководству и сотрудникам Вьетнамского института геонаук и минеральных ресурсов, а также Института геологии Вьетнамской академии наук и технологий за материалы, предоставленные для данного исследования.

Ссылка для цитирования:

Зыонг В.Б., Фоменко И.К., Ву Х.Д., Нгуен Т.Х., Сироткина О.Н., 2021. Региональная оценка оползневой опасности модифицированным методом анализа иерархий в геоинформационной системе (на примере района Шапа провинции Лаокай Вьетнама). Инженерная геология, Том XVI, № 2, с. 6–20, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-2-6-20>.

REGIONAL ASSESSMENT OF LANDSLIDE HAZARD USING MODIFIED ANALYTIC HIERARCHIES PROCESS METHOD IN GEOINFORMATION SYSTEM (A STUDY OF THE SA PA DISTRICT, LAO CAI PROVINCE, VIETNAM)

VAN B. DUONG*

Hanoi University of Mining and Geology; Hanoi, Vietnam;
dvbinh@yandex.com

Address: Bld. 18, Vien St., Hanoi, 100000, Vietnam

Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI);
Moscow, Russia

Address: Bld. 23, Miklukho-Maclay St., 117997, Moscow, Russia

IGOR K. FOMENKO

Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI);
Moscow, Russia; ifolga@gmail.com

HONG D. VU

Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources; Hanoi, Vietnam;
hongdangbg@gmail.com

Address: Bld. 67, Chien Thang St., 100000, Hanoi, Vietnam

THU H. NGUYEN

National University of Civil Engineering; Hanoi, Vietnam;
nguyenthuhuyen2579@gmail.com

Address: Bld. 55, Giai Phong St., 100000, Hanoi, Vietnam

OLGA N. SIROTKINA

Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia;
onsirotkina@gmail.com

Address: Bld. 1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

Original paper

Received 18 May 2020 / Accepted 25 June 2021 / Published 30 June 2021

© Geomarketing LLC, 2021

Abstract

Scientifically grounded forecast of the lithospheric responses to various types of natural and technogenic impacts and development of landslide hazard map on this basis provides an opportunity to correctly plan measures to manage the state of regional, local and elementary natural-technical systems (NTS), to create an engineering-geological basis for justifying a plan for economic development of territories. In recent years, new methods of complex analysis of NTS have been developed in different countries and by different researchers in order to predict the landslides' formation of different genesis. The use of geographical information systems (GIS) in landslide studies allows to consider the problem comprehensively, to operate with large quantity of data and to apply various methods of analysis. This paper is devoted to the assessment of landslide hazard in the Sa Pa District using a modified method of hierarchy analysis in a GIS environment. Sa Pa is a mountainous region in the northwestern part of the Vietnamese Lao Cai Province with an area of about 675.8 km², where a large number of landslides occurs every year. Based on the experience of landslide hazard assessment in Vietnam, the following factors were selected as determinants: 1) the steepness of the slopes; 2) soils' composition; 3) distance from active faults; 4) vertical dissection of the relief; 5) horizontal dissection of the relief; 6) massif watercut; 7) the amount of precipitation; 8) vegetation type. As a result of analysis of the distribution of the cumulative index of susceptibility to landslide processes (S) maps were developed, which allowed to divide the study area into three landslide hazard zones. The following settlements are located in the high hazard zones: Ban Ho Commune, Sa Pa District, Houhao, Laochi, and Shupan cities. The high landslide hazard is associated with areas with waterlogged shales, sandstones, and siltstones in the geological cross-section and which are in the zone of influence of active faults.

Key words:

landslide; landslide hazard; GIS; modified analytic hierarchy process method; landslide susceptibility; Sa Pa; Vietnam

Acknowledgments:

The authors are grateful to the management and staff of the Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources and the Institute of Geology, Vietnam Academy of Science and Technology for the materials provided for this study.

For citation:

Duong V.B., Fomenko I.K., Vu H.D., Nguyen T.H., Sirotkina O.N., 2021. Regional assessment of landslide hazard using modified analytic hierarchies process method in geoinformation system (a study of the Sa Pa District, Lao Cai Province, Vietnam). *Engineering Geology World*, Vol. XVI, No. 2, pp. 6–20, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-2-6-20>.

Введение

Оползни — геологический процесс, широко распространенный в горных регионах, который проявляется, когда за счет естественных и техногенных факторов нарушается устойчивость склонов. Он наносит серьезный ущерб людям, а также инфраструктуре и экономике [17].

Факторы, которые определяют устойчивость склона, можно разделить на две группы [4, 36]: 1) объединяющую условия оползнеобразования (факторы влияния) и 2) объединяющую процессы, изменяющие величину коэффициента устойчивости (факторы активизации), которая, в свою очередь, может быть разделена на подгруппу фак-

торов, изменяющих состав, состояние, строение и свойства горных пород, слагающих склон и в итоге влияющих на их прочность и деформируемость; и подгруппу факторов, изменяющих напряженное состояние массива грунтов.

Во Вьетнаме ежегодно фиксируется большое количество оползней и связанных с ними селевых потоков [19], которые становятся причиной существенного социально-экономического ущерба [13, 23, 25, 33].

Прогноз оползневой опасности — это предсказание возможности проявления активных оползней на рассматриваемых склонах при вероятных изменениях природных условий и воздействий (в результате намечаемого хозяйственного освоения территории и природных процессов) [4, 6]. Основной задачей при оценке оползневой опасности в рассматриваемом регионе является определение факторов и процессов, приводящих к активизации оползней [11].

За последние годы в разных странах и разными исследователями были разработаны новые методы комплексного анализа природно-технических систем (ПТС) с целью прогнозирования развития оползней различного генезиса. Применение среды геоинформационных систем (ГИС) в оползневых исследованиях позволяет подходить к рассматриваемой проблеме комплексно, оперировать большим количеством данных и применять различные методы анализа. В результате создано большое количество прогнозных карт оползневой опасности, выполненных на основе ГИС-технологии [9]. На Google Scholar существует более 22 тыс. 700 результатов для ключевого слова «GIS Landslide» (дата обращения: 3 апреля 2017 г.) [37]. Для решения подобных задач широко используются подходы, основанные на методах статистики [3, 10, 15, 16, 24, 27]. В то же время не теряют своей актуальности подходы, основанные на экспертных оценках, такие как метод анализа иерархий [5]. Данная методика использовалась при изучении оползневых процессов в России [2], Вьетнаме [3], Марокко [14], Турции [18], Непале [21], Индии [26] и Иране [32].

В статье изложены результаты региональной оценки оползневой опасности в районе Шапа (провинция Лаокай, Вьетнам) модифицированным методом анализа иерархий, объединяющим методику экспертных оценок со статистическим анализом в среде ГИС.

Район исследования

Лаокай — северная горная провинция Вьетнама, в которой каждый год из-за осадков происходит большое количество оползней [34]. Оползневую опасность этого региона начали изучать в последние десятилетия из-за серьезного ущерба инфраструктуре и угрозы жизни людей [34]. Шапа (рис. 1) — горный район на северо-западе провинции Лаокай площадью около 675,8 км², высота над уровнем моря изменяется от 500 м до 2800 м. В районе исследования существует много склонов крутизной более 25° [12]. На западной границе расположена гора Фансипан (3143 м), являющаяся самым высоким пиком на п-ове Индокитай. Район находится в зоне хребта Хоанг Лиен Шон, с годовым количеством осадков 2000–3600 мм.

Ускоренное экономическое развитие рассматриваемой территории стало причиной значительного роста рисков от стихийных бедствий [20]. По сравнению с другими районами на севере Вьетнама, в Шапа отмечено наибольшее число активизаций оползневых процессов и связан-

ных с этим разрушений [12]. С 1998 г. в районе исследования произошло более 60 оползней и селей [7]. Наиболее катастрофические оползни зафиксированы вдоль национальной дороги 4D, в деревнях Лаочай и Монгсен.

Метод исследования

Региональный прогноз оползневых процессов предполагает определение возможности возникновения и интенсивности их развития, а также взаимодействие с сооружениями в пределах значительного района. При региональных прогнозах обычно не представляется возможным указать конкретные типы, места и иные показатели оползневых процессов, дается их фоновая характеристика с общими закономерностями развития [4, 6]. 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 [3]. Региональные оценки и прогнозы оползневых процессов могут быть как количественными, так и качественными и строиться как на детерминированном, так и вероятностном подходах [4]. Результат данных исследований — создание карт оценки оползневой опасности.

Методы статистического анализа оползневых факторов относятся к подклассу количественных вероятностных методов [4]. Они основаны на допущении, что если между нанесенным на карту распространением оползней (зависимая переменная) и одним или несколькими способствующими факторами (независимые переменные) имеется статистически существенная корреляция, то последние, в отдельности либо в совокупности, могут быть использованы для прогнозирования возможного расположения оползней в будущем [4]. Принципиальным допущением при данном подходе является то, что будущие обрушения склонов вероятнее всего произойдут при условиях, которые стали причиной потери стабильности в прошлом и настоящем, хотя факторы, инициирующие оползни, могут со временем изменяться.

Анализ оползневых факторов может проводиться с использованием либо метода взвешенных произведений, либо метода взвешенных сумм [8, 22]. Каждый имеет свои достоинства и ограничения, поэтому в анализе рекомендуется использовать оба, а затем окончательное распределение совокупных значений, полученных с помощью каждого метода, сравнивать для установления соответствия [4].

Метод взвешенных сумм: совокупный индекс восприимчивости территории к оползневым процессам S определяется следующей формулой:

$$S = W_1x_{i1} + W_2x_{i2} + \dots + W_jx_{ij} + \dots + W_nx_{in}, \quad (1)$$

где W_n — вес фактора n ; x_{ij} — вес класса i фактора j ; n — количество независимых факторов.

Метод взвешенного произведения: совокупный индекс восприимчивости территории к оползневым процессам S определяется следующей формулой:

$$S = (W_1x_{i1} \cdot W_2x_{i2} \cdot \dots \cdot W_jx_{ij} \cdot \dots \cdot W_nx_{in}) / 1000, \quad (2)$$

Метод анализа иерархий (МАИ), предложенный Т.Л. Саати [5, 28, 29], стал популярным инструментом

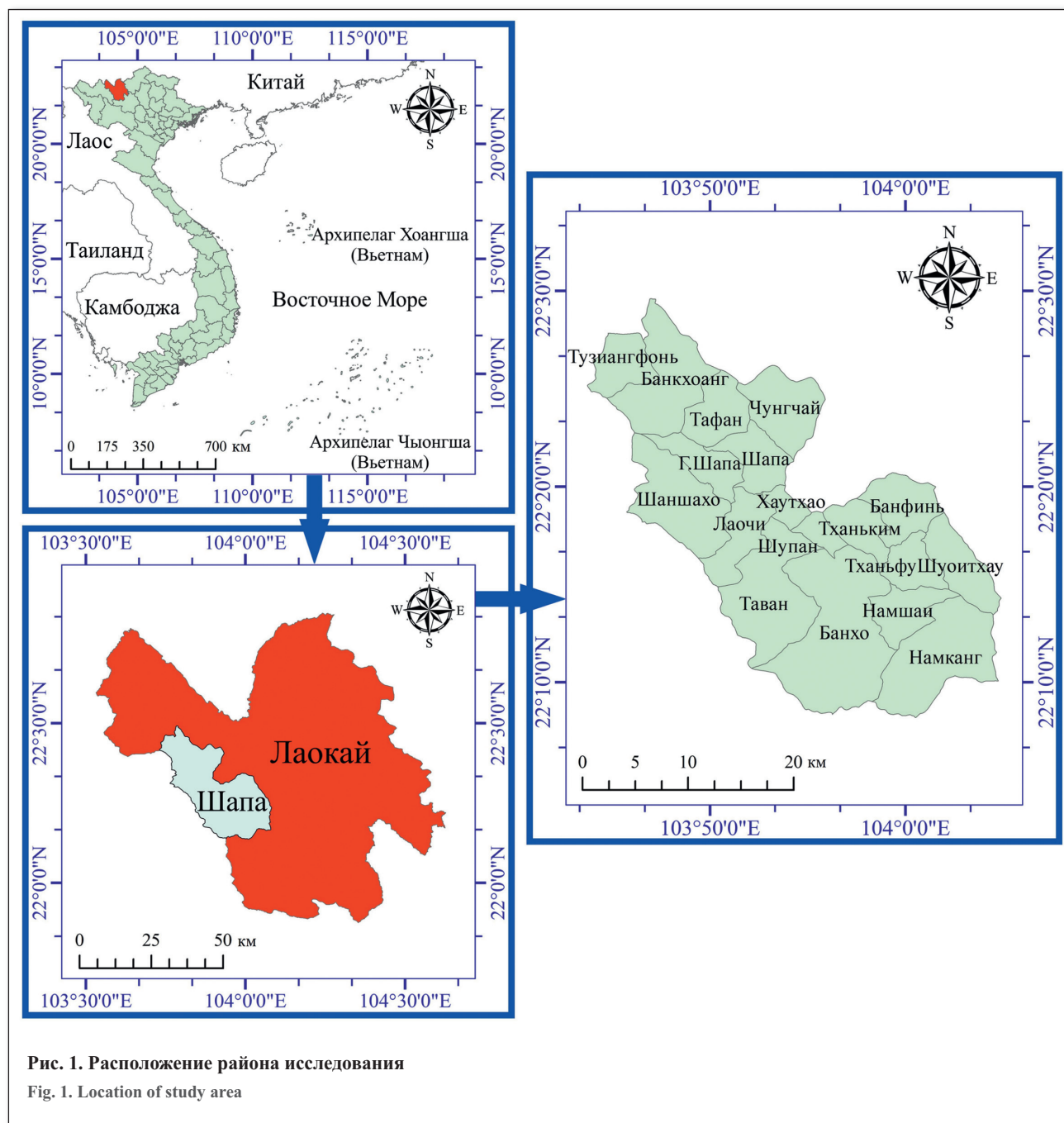


Рис. 1. Расположение района исследования

Fig. 1. Location of study area

для создания многокритериального решения. МАИ подразделяет сложную проблему создания решения или вопрос планирования на их компоненты и классифицирует данные компоненты по возрастающему иерархическому порядку [30]. Данный метод помогает создать оптимальное решение, которое сводится к серии сравнения пар компонентов на основе их значимости (иерархии) с последующим синтезом результатов [14]. Решение задачи по рассматриваемому способу осуществлялось с разделением на следующие шаги [3, 30].

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

Иерархическая структура МАИ — это графическое представление проблемы в виде перевернутого дерева, где каждый элемент, за исключением самого верхнего, зависит от одного или более ниже расположенных элементов. Система будет строгой иерархией, 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. Приоритет цели по определению равен 1,0.

Шкала или масштаб сравнения значимости факторов, предложенная Т.Л. Саати [5] при решении 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).

Шкала сравнения значимости факторов [5, 31] лежит в основе иерархической структуры МАИ при оценке оползневой опасности (рис. 2).

Интенсивная шкала значимости элементов по Т.Л. Саати [5] Intensive scale of the importance of elements according to T.L. Saaty [5]		
Степень значимости	Определение	Объяснение
1	Одинаковая значимость	Два действия вносят одинаковый вклад в достижение цели
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения между соседними значениями шкалы	Ситуация, когда необходимо компромиссное решение
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. Его превосходство практически явно
9	Абсолютная значимость	Свидетельство в пользу предпочтения одного действия другому в высшей степени предпочтительно
Обратные величины приведенных выше чисел	Если действию i при сравнении с действием j приписывается одно из приведенных выше чисел, то действию j при сравнении с i приписывается обратное значение	Обоснованное предположение
Рациональные значения	Отношения, возникающие в заданной шкале	Если постулировать согласованность, то для получения матрицы требуется n числовых значений

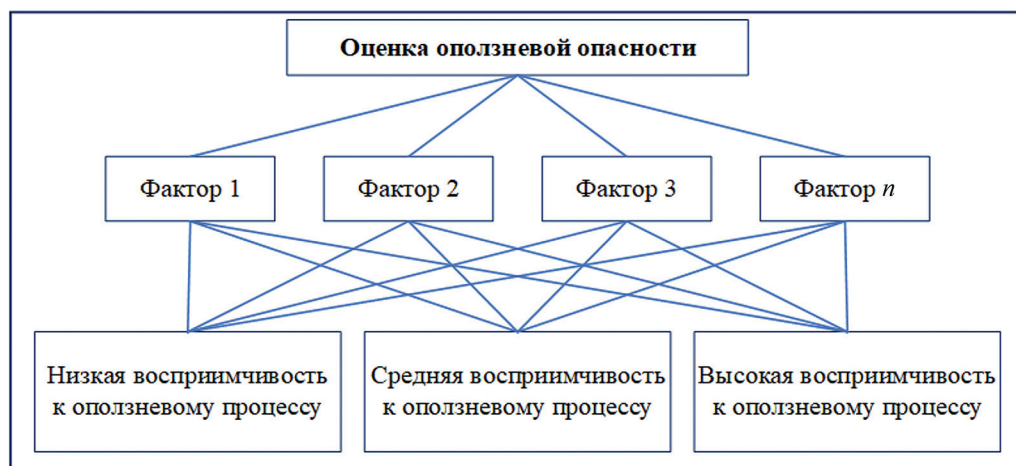


Рис. 2. Иерархическая структура МАИ при оценке оползневой опасности

Fig. 2. Hierarchical structure of Analytic Hierarchy Process in landslide hazard assessment

На основе описанной в табл. 1 шкалы строится матрица парных коэффициентов корреляции (табл. 2).

В табл. 2 a_{ij} является величиной парных коэффициентов корреляции, которая находится по следующей формуле:

$$a_{ij} = \frac{I_i}{I_j}, \quad (3)$$

где I является степенью значимости (по шкале Т.Л. Саати).

Веса факторов определяются по следующей формуле:

$$W_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (4)$$

где W_i — вес фактора A_i ; m_i — среднее геометрическое значение i строки, вычисляемое по следующим формулам:

$$m_1 = (a_{11} \cdot a_{12} \cdot \dots \cdot a_{1n})^{1/n}, \quad (5)$$

$$m_n = (a_{n1} \cdot a_{n2} \cdot \dots \cdot a_{nn})^{1/n}, \quad (6)$$

Веса факторов (оценка вектора приоритетов) рассчитываются как:

$$W_1 = \frac{m_1}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{I_1}{\sum_{i=1}^n I_i}, \quad (7)$$

$$W_i = \frac{m_n}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{I_n}{\sum_{i=1}^n I_i}. \quad (8)$$

Кроме того:

$$W_1 + W_2 + \dots + W_n = 1. \quad (9)$$

Таблица 2
Table 2

Матрица парных коэффициентов корреляции Matrix of paired correlation coefficients					
	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_{ij}	...
A_n	a_{n1}	a_{n2}	a_{n3}	...	1

Таким образом, совокупный индекс восприимчивости территории к оползневым процессам определяется по следующей формуле:

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \cdot W_{ij}. \quad (10)$$

Полагая, что $X_{ij} = \frac{A_{ij}}{A_{ijmax}}$, если $X_{ij} \leq 1$, и $X_{ij} = \frac{A_{ij}}{A_{ijmax}} \cdot N$, если $X_{ij} > 1$ (где N — любое натуральное число, отличное от 0), окончательное решение принимает вид:

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \frac{A_{ij}}{A_{ijmax}}, \quad (11)$$

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \frac{A_{ij}}{A_{ijmax}} (\text{если } X_{ij} \leq 1), \quad (12)$$

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \frac{A_{ij}}{A_{ijmax}} \cdot N (\text{если } X_{ij} > 1). \quad (13)$$

Региональная оценка оползневой опасности района Шапа

Ранее выполненные исследования [3, 18, 21] показали, что основным недостатком классической формулировки МАИ является необходимость использования экспертных оценок, что вносит определенный субъективизм в итоговый результат.

Для региональной оценки оползневой опасности в данном исследовании применен усовершенствованный подход [1]. 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, имеющим меньшую дисперсию. Следует отметить, что кривая распределения строится по количеству проявлений оползневых процессов в каждом классе фактора.

Таким образом, стандартное отклонение функции распределения идентифицированных оползней по информационным классам оползневого фактора представляет собой основу для определения степени значимости (I) [3].

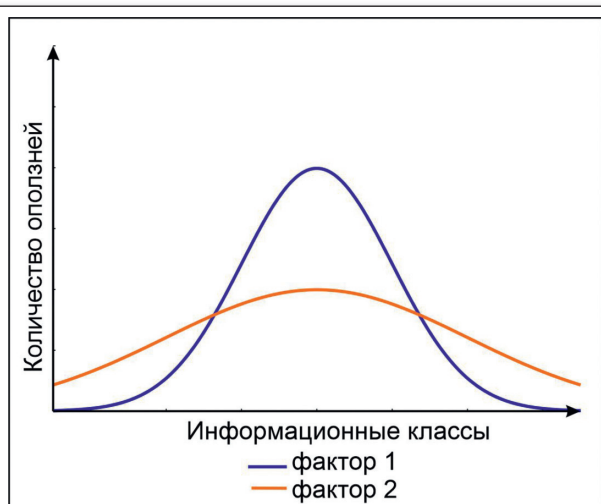


Рис. 3. Функция распределения идентифицированных оползней по информационным классам аналитического фактора

Fig. 3. The distribution function of the identified landslides by information classes of the analytical factor

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

$$X_{ij} = \frac{\text{плотность оползней в данном информационном классе}}{\text{плотность оползней на исследуемой территории}}. \quad (14)$$

На основе описанного выше алгоритма была создана карта оползневой опасности, на которой использовался принцип дифференциации опасности развития оползневого процесса по трем цветовым категориям, аналогичный принципу действия светофора.

В основу данной работы положены ранее проведенные исследования [34]. Исходя из опыта оценки оползневой опасности во Вьетнаме, в качестве основных факторов развития оползней были выбраны следующие: 1) крутизна склонов; 2) состав грунтов; 3) расстояние от активных разломов; 4) вертикальное расчленение рельефа; 5) горизонтальное расчленение рельефа; 6) обводненность массивов; 7) количество осадков; 8) тип растительности. Данные факторы были разделены на информационные классы (табл. 3). Рассчитанные веса факторов W_i ($i = 1, 2, \dots, 8$) 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, а на рис. 5 — необходимый для анализа набор карт, построенный в ARCGIS 10.8.

Районирование территории района Шапа по оползневой опасности было выполнено как с применением способа взвешенных сумм, так и посредством взвешенных произведений.

Обсуждение полученных результатов

Анализ рис. 6, 7 позволяет сделать вывод, что распределение совокупного индекса восприимчивости территории к оползневой опасности (S), полученное на основе метода взвешенных сумм, близко к нормальному, а на основе метода взвешенных произведений — к логнормальному [35].

Разделение основных факторов развития оползней в районе Шапа на информационные классы и вес этих классов
The division of the main factors determining landslide Sa Pa District into information classes and the weight of these classes

Фактор W_j	Классы	Количество выявленных оползней, шт.	Площадь, км ²	Вес класса X_{ij}
1. Крутизна склонов, град.	< 20	34	125,2	0,467
	20–40	81	424,3	0,328
	> 40	15	126,3	0,205
	Сумма	130	675,8	1,000
2. Состав грунтов	диориты, гранодиориты, граниты, субщелочные граносиениты	85	493,9	0,215
	биотитовые сланцы, двуслюдяные сланцы, графитовые сланцы, амфиболиты	33	152,7	0,270
	глинистые сланцы, песчаники и алевролиты	12	29,2	0,515
	Сумма	130	675,8	1,000
3. Расстояние от активных разломов, м	> 3000	30	263,8	0,190
	< 3000	36	204,1	0,295
	зона разлома	64	207,9	0,515
	Сумма	130	675,8	1,000
4. Вертикальное расчленение рельефа, м/км ²	< 300	9	31,8	0,525
	300–650	117	559,9	0,387
	> 650	4	84,1	0,088
	Сумма	130	675,8	1,000
5. Горизонтальное расчленение рельефа, км/км ²	< 0,6	7	93,1	0,157
	0,6–0,9	103	477,1	0,449
	> 0,9	20	105,6	0,394
	Сумма	130	675,8	1,000
6. Обводненность массивов	мало обводненные массивы грунтов	81	313,7	0,494
	средне обводненные массивы грунтов	16	133,6	0,229
	сильно обводненные массивы грунтов	33	228,5	0,277
	Сумма	130	675,8	1,000
7. Количество осадков, мм/месяц	< 300	19	135,1	0,253
	300–400	65	328,3	0,357
	> 400	46	212,4	0,390
	Сумма	130	675,8	1,000
8. Тип растительности	лесные массивы и лесопосадки	46	322,8	0,228
	земли сельскохозяйственного назначения	34	133,6	0,407
	растительность практически отсутствует	50	219,4	0,365
	Сумма	130	675,8	1,000

Таблица 4
Table 4

Веса факторов развития оползней W_i The weights of the factors of landslide formation W_i				
Фактор	Стандартное отклонение σ_i	$1/\sigma_i$	Степень важности I	Вес фактора W_i
Вертикальное расчленение рельефа, м/км ²	0,223	4,484	1	0,028
Расстояние от активных разломов, м	0,166	6,024	3	0,086
Состав грунтов	0,160	6,25	3	0,086
Горизонтальное расчленение рельефа, км/км ²	0,155	6,452	3	0,086
Обводненность массивов	0,141	7,092	4	0,114
Крутизна склонов, град.	0,131	7,634	4	0,114
Тип растительности	0,094	10,638	7	0,200
Количество осадков, мм/месяц	0,072	13,889	10	0,286



Рис. 4. Схема к составлению карты региональной оценки оползневой опасности методом анализа иерархий

Fig. 4. Scheme for mapping the regional landslide hazard assessment by analytic hierarchies process method

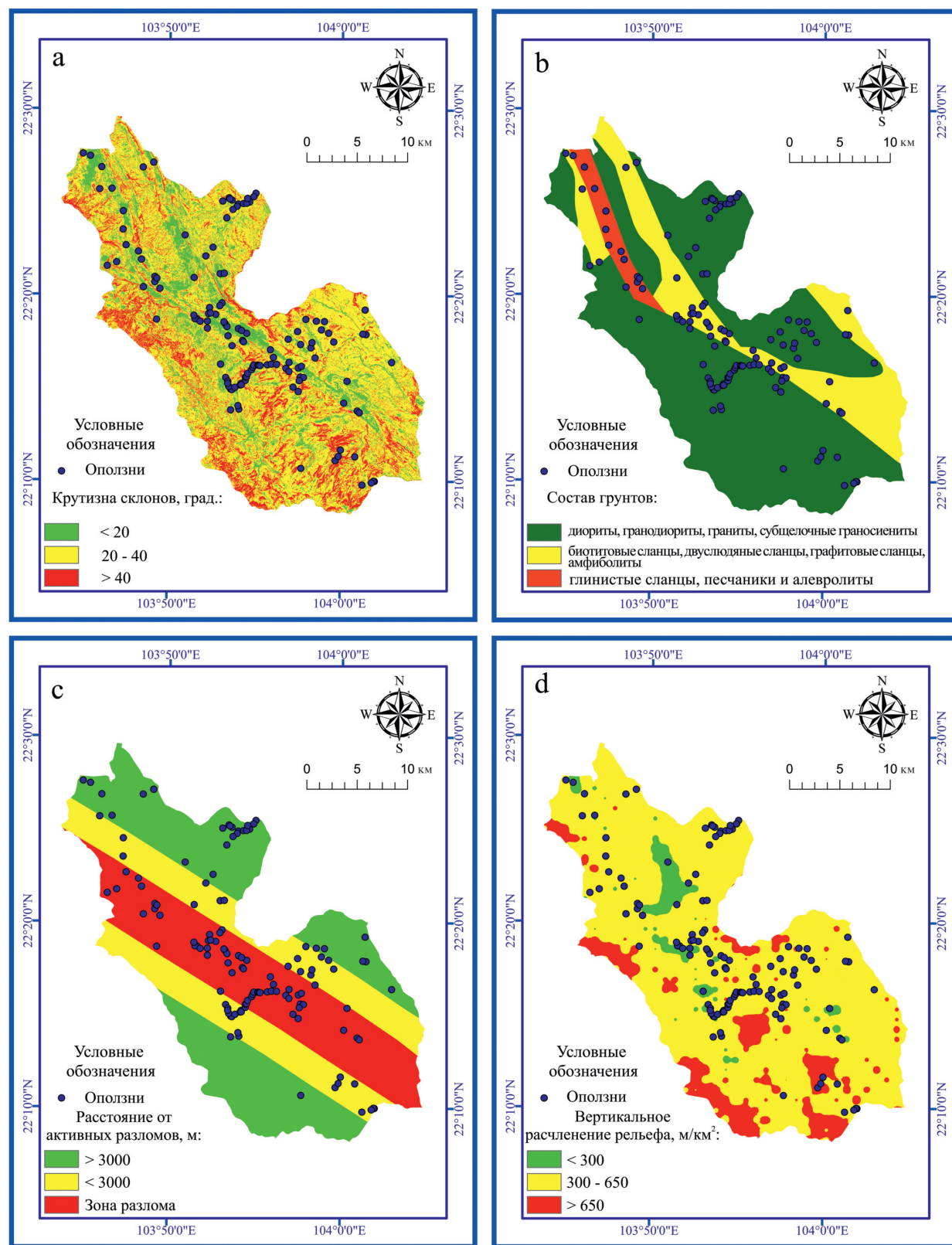


Рис. 5. Набор аналитических карт для оценки оползневой опасности в районе Шапа: а — карта крутизны склонов, б — карта распространения грунтов различного состава, с — карта расстояния от активных разломов, d — карта вертикального расчленения рельефа, е — карта горизонтального расчленения рельефа, f — карта обводненности массивов грунтов, g — карта количества осадков, h — карта типов растительности

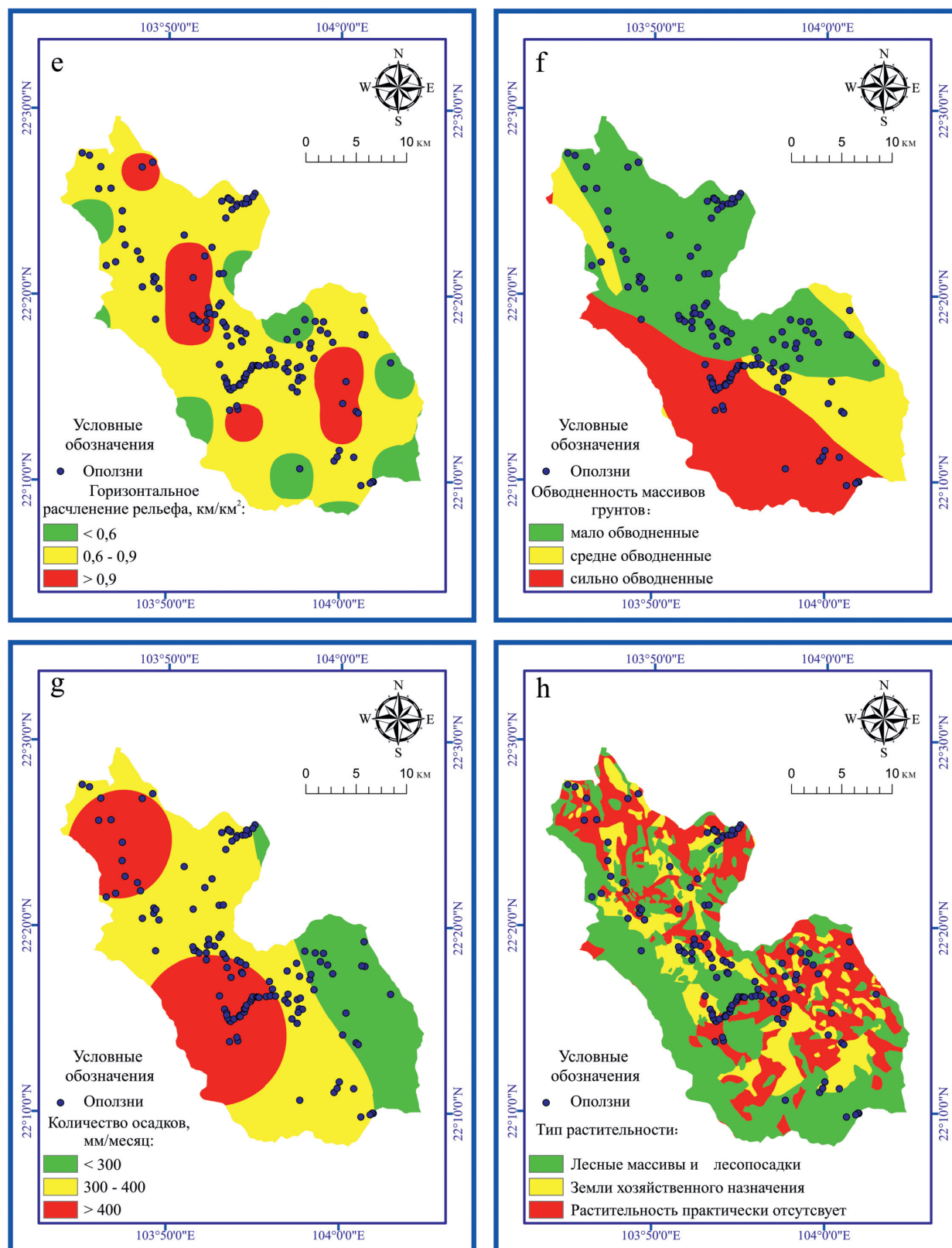


Fig. 5. Set of the analytical maps for landslide hazard assessment in Sa Pa District: a — map of slope steepness, b — map of distribution of soils with different composition, c — map of distance from active faults, d — map of vertical relief dissection, e — map of horizontal relief dissection, f — map of soil masses watercut, g — map of precipitation amount, h — map of vegetation types

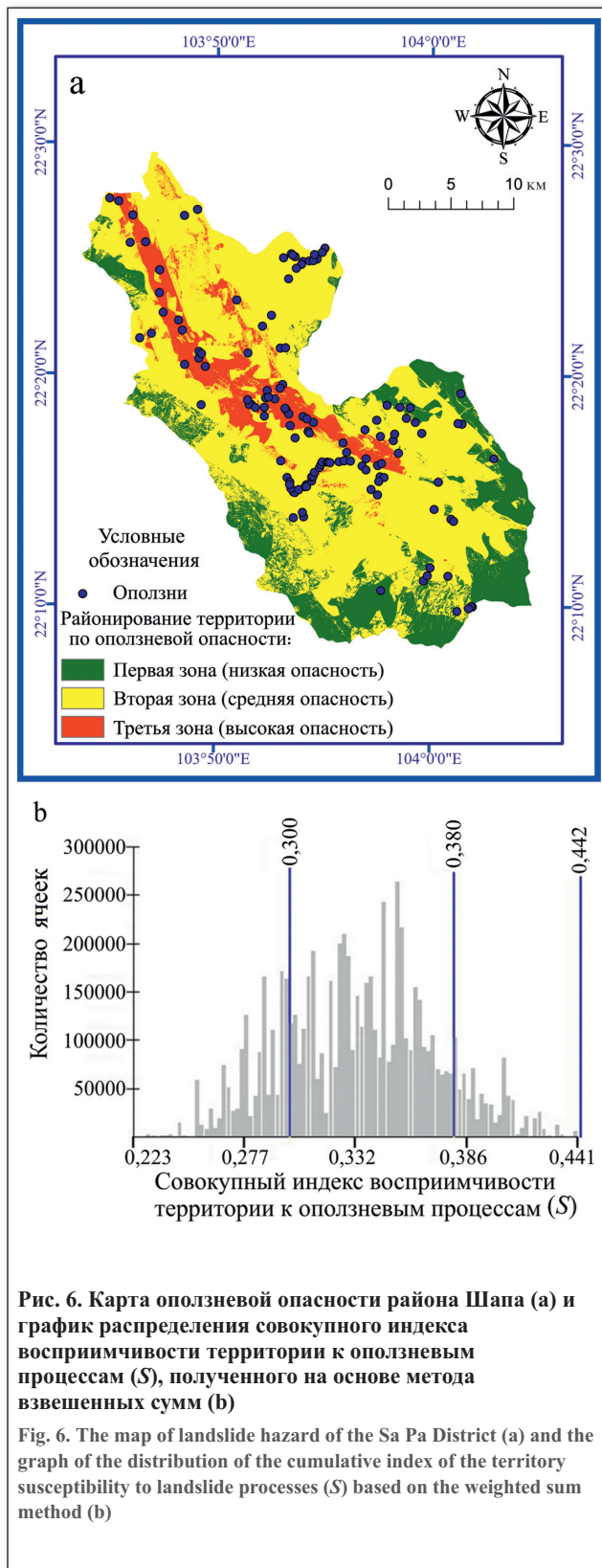


Рис. 6. Карта оползневой опасности района Шапа (а) и график распределения совокупного индекса восприимчивости территории к оползневым процессам (S), полученного на основе метода взвешенных сумм (б)

Fig. 6. The map of landslide hazard of the Sa Pa District (a) and the graph of the distribution of the cumulative index of the territory susceptibility to landslide processes (S) based on the weighted sum method (b)

Важным моментом при построении карты оползневой опасности являлся выбор разумных уровней классификационного показателя S . В данном исследовании уровни восприимчивости территории к оползневому процессу получены на основе анализа распределения S (рис. 6, b; 7, b) с использованием классификации по методу естественных границ.

В результате по способу взвешенных сумм были определены следующие зоны:

1. Первая зона: $S = 0,22-0,30$; характеризуется низкой оползневой опасностью.

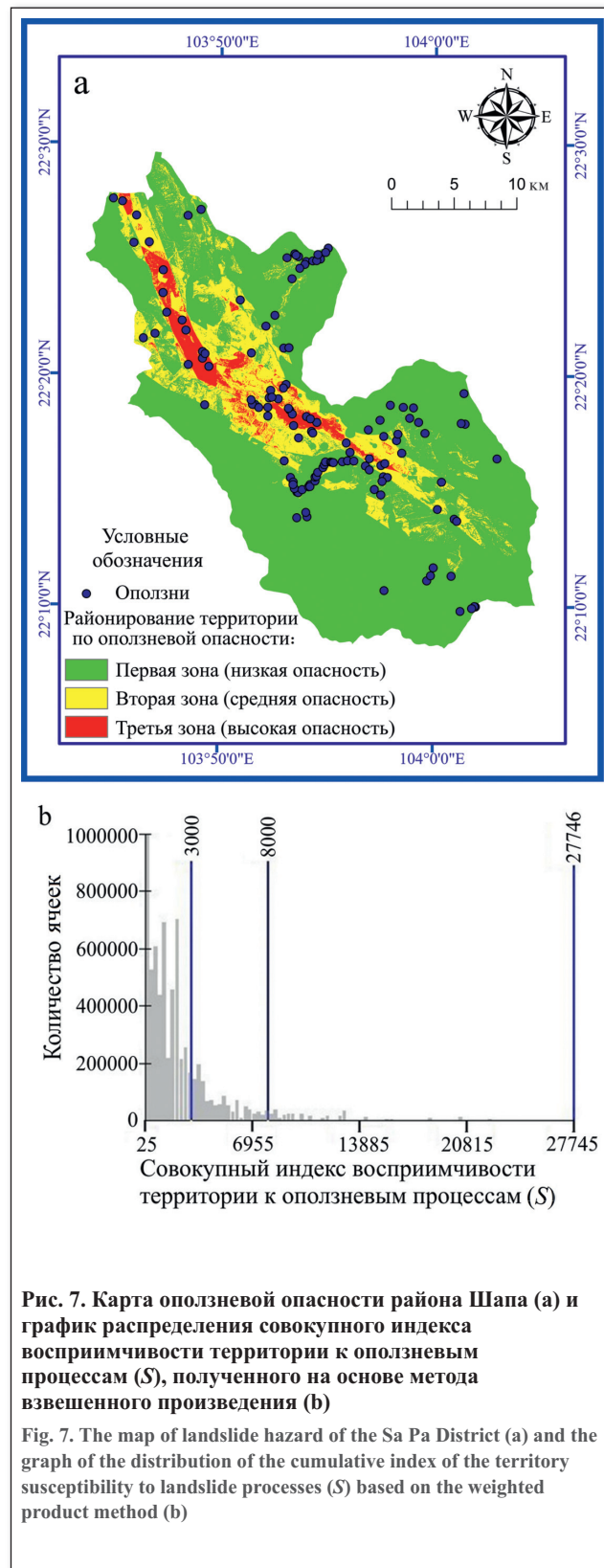


Рис. 7. Карта оползневой опасности района Шапа (а) и график распределения совокупного индекса восприимчивости территории к оползневым процессам (S), полученного на основе метода взвешенного произведения (б)

Fig. 7. The map of landslide hazard of the Sa Pa District (a) and the graph of the distribution of the cumulative index of the territory susceptibility to landslide processes (S) based on the weighted product method (b)

2. Вторая зона: $S = 0,30-0,38$; характеризуется средней оползневой опасностью.

3. Третья зона: $S = 0,38-0,45$; характеризуется высокой оползневой опасностью.

По методу взвешенного произведения территория исследования также подразделена на три зоны:

1. Первая зона: $S = 25-3000$; характеризуется низкой оползневой опасностью.

2. Вторая зона: $S = 3000-8000$; характеризуется средней оползневой опасностью.

3. Третья зона: $S = 8000-27746$; характеризуется высокой оползневой опасностью.

Карты районирования исследуемой территории показали, что в зонах с высокой оползневой опасностью расположены следующие населенные пункты: коммуна Банкхоанг, район Шапа, города Хаутхао, Лаочи и Шупан. В геологическом отношении высокая оползневая опасность связана с участками, в разрезе которых присутствуют обводненные глинистые сланцы, песчаники и алевролиты и которые находятся в зоне влияния активных разломов.

Заключение

В рамках данного исследования оценка оползневой опасности в районе г. Шапа (провинция Лаокай, Вьетнам) выполнена с использованием модифицированного метода

анализа иерархий, который позволяет исключить субъективный подход.

Анализ на основе ГИС-технологий базируется на информации, полученной по результатам дистанционного зондирования, и материалах традиционных полевых исследований. Район работ был разделен по оползневой опасности на три зоны.

Выполненный анализ показал, что зоны с высокой оползневой опасностью являются территориями, в пределах которых развиты обводненные глинистые сланцы, песчаники и алевролиты и которые находятся в зоне воздействия активных разломов.

В дальнейшем планируется сравнение итогов проведенного исследования с оценками по другим современным методикам с целью верификации результатов и оптимизации методологии региональной оценки оползневой опасности. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зыонг М.Х., Фоменко И.К., Пендин В.В., 2013. Региональный прогноз оползневой опасности для района Ха Лонг-Кам Фа на севере-востоке Вьетнама. Инженерная геология, № 1, с. 46–54.
2. Леонова А.В., Строкова Л.А., Никитенков А.Н., 2021. Оценка оползневых процессов на территории г. Томска с использованием ГИС-технологий. Вестник Воронежского государственного университета. Серия Геология, № 1, с. 94–103, <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3341>.
3. Нгуен Ч.К., Фоменко И.К., Пендин В.В., Нгуен К.Т., 2017. Применение метода анализа иерархий при региональной оценке оползневой опасности (на примере района северо-западный Лаокай, Вьетнам). Геоинформатика, № 2, с. 53–66.
4. Пендин В.В., Фоменко И.К., 2015. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. ЛЕНАНД, Москва.
5. Саати Т.Л., 1993. Принятие решений. Метод анализа иерархий, пер. с англ. А.Г. Вачнадзе. Радио и связь, Москва.
6. Тихвинский И.О. (ред.), 1984. Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов. Стройиздат, Москва.
7. Ха Ч.Т., 2013. Анализ взаимосвязи геоморфологических характеристик и оползни в провинции Лаокай (на вьетнамском языке). Vietnam National University Journal of Science: Natural Sciences and Technology, Том 29, № 3, с. 35–44.
8. Barredo J., Benavides A., Hervás J., Van Westen C.J., 2000. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 2, Issue 1, pp. 9–23, [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(00\)85022-9](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(00)85022-9).
9. Chacón J., Irigaray C., Castillo T., Hamdouni R., 2006. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 65, pp. 341–411, <https://doi.org/10.1007/s10064-006-0064-z>.
10. Chung C.-J., Fabbri A., 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 65, pp. 1389–1399.
11. Dai F.C., Lee C.F., Ngai Y.Y., 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. Engineering Geology, Vol. 64, pp. 65–87, [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X).
12. Dang K.B., Burkhard B., Müller F., Dang V.B., 2018. Modelling and mapping natural hazard regulating ecosystem services in Sapa, Lao Cai province, Vietnam. Paddy and Water Environment, Vol. 16, Issue 4, pp. 767–781, <https://doi.org/10.1007/s10333-018-0667-6>.
13. Duc D.M., 2013. Rainfall-triggered large landslides on 15 December 2005 in Van Canh District, Binh Dinh Province, Vietnam. Landslides, Vol. 10, Issue 2, pp. 219–230, <https://doi.org/10.1007/s10346-012-0362-4>.
14. El Jazouli A., Barakat A., Khellouk R., 2019. GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco). Geoenvironmental Disasters, Vol. 6, Issue 1, Paper 3, <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0119-7>.
15. Gaprindashvili G., Guo J., Daorueang P., Xin T., Rahimy P., 2014. A new statistic approach towards landslide hazard risk assessment. International Journal of Geosciences, No. 5, pp. 38–49, <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2014.51006>.
16. Ghimire M., Timalsina N., 2020. Landslide distribution and processes in the hills of central Nepal: geomorphic and statistical approach to susceptibility assessment. Journal of Geoscience and Environment Protection, No. 8, pp. 276–302, <https://doi.org/10.4236/gep.2020.812017>.
17. Glade T., Anderson M., Crozier M., 2005. Landslide hazard and risk. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, West Sussex, UK.
18. Hasekiogullari G.D., Ercanoglu M., 2012. A new approach to use AHP in landslide susceptibility mapping: a case study at Yenice (Karabuk, NW Turkey). Natural Hazards, Vol. 63, Issue 2, pp. 1157–1179, <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0218-1>.
19. Iverson R.M., 1997. The physics of debris flows. Reviews of Geophysics, Vol. 35, pp. 245–296, <https://doi.org/10.1029/97RG00426>.
20. Jadin I., Vanacker V., Hoang H.T.T., 2013. Drivers of forest cover dynamics in smallholder farming systems: the case of northwestern Vietnam. AMBIO, Vol. 42, Issue 3, pp. 344–356, <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0348-4>.
21. Kayastha P., Dhital M.R., De Smedt F., 2013. Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: a case study from the Tinau watershed, West Nepal. Computers and Geosciences, Vol. 52, pp. 398–408, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.11.003>.
22. Komac M., 2006. A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. Geomorphology, Vol. 74, Issue 1, pp. 17–28, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.005>.

23. Le T., Kawagoe S., 2018. Impact of the landslide for a relationship between rainfall condition and land cover in North Vietnam. *Journal of Geological Resource and Engineering*, Vol. 6, pp. 239–250, <https://doi.org/10.17265/2328-2193/2018.06.002>.
24. Lee C.T., Huang C.C., Lee J.F., Pan K.L., Lin M.L., Dong J.J., 2008. Statistical approach to earthquake-induced landslide susceptibility. *Engineering Geology*, Vol. 100, pp. 43–58, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.004>.
25. Loi D.H., Quang L.H., Sassa K., Takara K., Dang K., Thanh N.K., Tien P.V., 2017. The 28 July 2015 rapid landslide at Ha Long City, Quang Ninh, Vietnam. *Landslides*, Vol. 14, Issue 3, pp. 1207–1215, <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0814-y>.
26. Mandal B., Mandal S., 2018. Analytical hierarchy process (AHP) based landslide susceptibility mapping of Lish river basin of eastern Darjeeling Himalaya, India. *Advances in Space Research*, Vol. 62, Issue 11, pp. 3114–3132, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.08.008>.
27. Mandal S., Mondal S., 2019. Statistical approaches for landslide susceptibility assessment and prediction. Springer International Publishing, Switzerland.
28. Saaty T.L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 15, Issue 3, pp. 234–281, [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).
29. Saaty T.L., 2005. Analytic hierarchy process, in encyclopedia of biostatistics. John Wiley and Sons Ltd, Hoboken, New Jersey, NJ, USA.
30. Saaty T.L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, Vol. 1, No. 1, pp. 83–98, <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>.
31. Saaty T.L., Vargas L., 2001. Models, methods, concepts and applications of the analytic hierarchy process. International series in operations research and management science. Springer US, New York, NY, USA.
32. Sangchini E.K., Emami S.N., Tahmasebipour N., Pourghasemi H.R., Naghibi S.A., Arami S.A., Pradhan B., 2016. Assessment and comparison of combined bivariate and AHP models with logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Chaharmahal-e-Bakhtiari Province, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 9, Issue 3, Article No. 201, <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2258-9>.
33. Tien Bui D., Pradhan B., Lofman O., Revhaug I., Dick O.B., 2013. Regional prediction of landslide hazard using probability analysis of intense rainfall in the Hoa Binh province, Vietnam. *Natural Hazards*, Vol. 66, Issue 2, pp. 707–730, <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0510-0>.
34. Tien Bui D., Tuan T.A., Hoang N.-D., Thanh N.Q., Nguyen D.B., Van Liem N., Pradhan B., 2017. 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. *Landslides*, Vol. 14, Issue 2, pp. 447–458, <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0711-9>.
35. Williams R.B.G., 1984. Introduction to statistics for geographers and earth scientists. Palgrave, London, UK.
36. Wu W.M., Sidle R., 1995. A Distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Resources Research*, Vol. 31, Issue 8, pp. 2097–2110, <https://doi.org/10.1029/95WR01136>.
37. Yamagishi H., Bhandary N. (eds), 2017. GIS landslide. Springer Japan, Tokyo, Japan.

REFERENCES

1. Duong M.H., Fomenko I.K., Pendin V.V., 2013. Regional forecast of landslide hazard in the region of the Halong and Cam Pha cities in the North-East of Vietnam. *Inzhenernaya geologiya*, No. 1, pp. 46–54. (in Russian)
2. Leonova A.V., Strokova L.A., Nikitenkov A.N., 2021. Assessment of landslide processes on the territory of Tomsk by using GIS technologies. *Bulletin of Voronezh State University. Series Geology*, No. 1, pp. 94–103. (in Russian)
3. Nguyen T.K., Fomenko I.K., Pendin V.V., Nguyen Q.T., 2017. Application of the method of analysis hierarchies (AHP) under the regional landslide hazard assessment (for example area North-West of Laoai in Vietnam). *Geoinformatics*, No. 2, pp. 53–66. (in Russian)
4. Pendin V.V., Fomenko I.K., 2015. Methodology for landslide hazard assessment and prediction. LENAND, Moscow. (in Russian)
5. Saaty T.L., 1993. Decision making. Hierarchy analysis method, translated from English by A.G. Vachnadze. Radio and Communication, Moscow. (in Russian)
6. Tikhvinsky I.O. (ed.), 1984. Recommendations for the quantitative assessment of landslide slope stability. Stroyizdat, Moscow. (in Russian)
7. Ha T.T., 2013. An analysis of the relationship between geomorphological characteristics and landslides in Lao Cai Province. *Vietnam National University Journal of Science: Natural Sciences and Technology*, Vol. 29, No. 3, pp. 35–44. (in Vietnamese)
8. Barredo J., Benavides A., Hervás J., Van Westen C.J., 2000. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 2, Issue 1, pp. 9–23, [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(00\)85022-9](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(00)85022-9).
9. Chacón J., Irigaray C., Castillo T., Hamdouni R., 2006. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 65, pp. 341–411, <https://doi.org/10.1007/s10064-006-0064-z>.
10. Chung C.-J., Fabbri A., 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 65, pp. 1389–1399.
11. Dai F.C., Lee C.F., Ngai Y.Y., 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, Vol. 64, pp. 65–87, [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X).
12. Dang K.B., Burkhard B., Müller F., Dang V.B., 2018. Modelling and mapping natural hazard regulating ecosystem services in Sapa, Lao Cai province, Vietnam. *Paddy and Water Environment*, Vol. 16, Issue 4, pp. 767–781, <https://doi.org/10.1007/s10333-018-0667-6>.
13. Duc D.M., 2013. Rainfall-triggered large landslides on 15 December 2005 in Van Canh District, Binh Dinh Province, Vietnam. *Landslides*, Vol. 10, Issue 2, pp. 219–230, <https://doi.org/10.1007/s10346-012-0362-4>.
14. El Jazouli A., Barakat A., Khellouk R., 2019. GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco). *Geoenvironmental Disasters*, Vol. 6, Issue 1, Part 3, <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0119-7>.
15. Gaprindashvili G., Guo J., Daorueang P., Xin T., Rahimy P., 2014. A new statistic approach towards landslide hazard risk assessment. *International Journal of Geosciences*, No. 5, pp. 38–49, <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2014.51006>.

16. Ghimire M., Timalina N., 2020. Landslide distribution and processes in the hills of central Nepal: geomorphic and statistical approach to susceptibility assessment. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, No. 8, pp. 276–302, <https://doi.org/10.4236/gep.2020.812017>.
17. Glade T., Anderson M., Crozier M., 2005. *Landslide hazard and risk*. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, West Sussex, UK.
18. Hasekioğulları G.D., Ercanoglu M., 2012. A new approach to use AHP in landslide susceptibility mapping: a case study at Yenice (Karabuk, NW Turkey). *Natural Hazards*, Vol. 63, Issue 2, pp. 1157–1179, <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0218-1>.
19. Iverson R.M., 1997. The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, Vol. 35, pp. 245–296, <https://doi.org/10.1029/97RG00426>.
20. Jadin I., Vanacker V., Hoang H.T.T., 2013. Drivers of forest cover dynamics in smallholder farming systems: the case of northwestern Vietnam. *AMBIO*, Vol. 42, Issue 3, pp. 344–356, <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0348-4>.
21. Kayastha P., Dhital M.R., De Smedt F., 2013. Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: a case study from the Tinau watershed, West Nepal. *Computers and Geosciences*, Vol. 52, pp. 398–408, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.11.003>.
22. Komac M., 2006. A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. *Geomorphology*, Vol. 74, Issue 1, pp. 17–28, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.005>.
23. Le T., Kawagoe S., 2018. Impact of the landslide for a relationship between rainfall condition and land cover in North Vietnam. *Journal of Geological Resource and Engineering*, Vol. 6, pp. 239–250, <https://doi.org/10.17265/2328-2193/2018.06.002>.
24. Lee C.T., Huang C.C., Lee J.F., Pan K.L., Lin M.L., Dong J.J., 2008. Statistical approach to earthquake-induced landslide susceptibility. *Engineering Geology*, Vol. 100, pp. 43–58, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.004>.
25. Loi D.H., Quang L.H., Sassa K., Takara K., Dang K., Thanh N.K., Tien P.V., 2017. The 28 July 2015 rapid landslide at Ha Long City, Quang Ninh, Vietnam. *Landslides*, Vol. 14, Issue 3, pp. 1207–1215, <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0814-y>.
26. Mandal B., Mandal S., 2018. Analytical hierarchy process (AHP) based landslide susceptibility mapping of Lish river basin of eastern Darjeeling Himalaya, India. *Advances in Space Research*, Vol. 62, Issue 11, pp. 3114–3132, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.08.008>.
27. Mandal S., Mondal S., 2019. *Statistical approaches for landslide susceptibility assessment and prediction*. Springer International Publishing, Switzerland.
28. Saaty T.L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 15, Issue 3, pp. 234–281, [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).
29. Saaty T.L., 2005. Analytic hierarchy process, in *encyclopedia of biostatistics*. John Wiley and Sons Ltd, Hoboken, New Jersey, NJ, USA.
30. Saaty T.L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, Vol. 1, No. 1, pp. 83–98, <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>.
31. Saaty T.L., Vargas L., 2001. *Models, methods, concepts and applications of the analytic hierarchy process*. International series in operations research and management science. Springer US, New York, NY, USA.
32. Sangchini E.K., Emami S.N., Tahmasebipour N., Pourghasemi H.R., Naghibi S.A., Arami S.A., Pradhan B., 2016. Assessment and comparison of combined bivariate and AHP models with logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Chaharmahal-e-Bakhtiari Province, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 9, Issue 3, Article No. 201, <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2258-9>.
33. Tien Bui D., Pradhan B., Lofman O., Revhaug I., Dick O.B., 2013. Regional prediction of landslide hazard using probability analysis of intense rainfall in the Hoa Binh province, Vietnam. *Natural Hazards*, Vol. 66, Issue 2, pp. 707–730, <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0510-0>.
34. Tien Bui D., Tuan T.A., Hoang N.-D., Thanh N.Q., Nguyen D.B., Van Liem N., Pradhan B., 2017. 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. *Landslides*, Vol. 14, Issue 2, pp. 447–458, <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0711-9>.
35. Williams R.B.G., 1984. *Introduction to statistics for geographers and earth scientists*. Palgrave, London, UK.
36. Wu W.M., Sidle R., 1995. A Distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Resources Research*, Vol. 31, Issue 8, pp. 2097–2110, <https://doi.org/10.1029/95WR01136>.
37. Yamagishi H., Bhandary N. (eds), 2017. *GIS landslide*. Springer Japan, Tokyo, Japan.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗЫОНГ ВАН БИНЬ

Преподаватель кафедры инженерной геологии факультета наук о Земле и геологической инженерии Ханойского горно-геологического университета, г. Ханой, Вьетнам; аспирант кафедры инженерной геологии гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия

ФОМЕНКО ИГОРЬ КОНСТАНТИНОВИЧ

Профессор кафедры инженерной геологии гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), д.г.-м.н., г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

VAN B. DUONG

Lecturer of the Department of Engineering Geology, Faculty of Geosciences and Geology Engineering, Hanoi University of Mining and Geology; Hanoi, Vietnam; Postgraduate Student of the Department of Engineering Geology, Faculty of Hydrogeology, Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI); Moscow, Russia

IGOR K. FOMENKO

DSc (Geology and Mineralogy); Professor in the Department of Engineering Geology, Faculty of Hydrogeology, Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI); Moscow, Russia

ВУ ХОНГ ДАНГ

Научный сотрудник отдела гидрогеологии и инженерной геологии
Вьетнамского института геонаук и минеральных ресурсов, г. Ханой,
Вьетнам

НГУЕН ТХУ ХУЕН

Преподаватель кафедры инженерной геологии факультета мостового и
дорожного строительства Национального строительного университета,
г. Ханой, Вьетнам

СИРОТКИНА ОЛЬГА НИКОЛАЕВНА

Старший научный сотрудник кафедры динамической геологии
геологического факультета Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, Россия

HONG D. VU

Research Scientist of the Department of Hydrogeology and
Engineering Geology, Vietnam Institute of Geosciences and Mineral
Resources; Hanoi, Vietnam

THU H. NGUYEN

Lecturer of the Department of Engineering Geology, Faculty of Bridge
and Road Engineering, National University of Civil Engineering;
Hanoi, Vietnam

OLGA N. SIROTKINA

PhD (Geology and Mineralogy); Senior Research Scientist of the
Department of Dynamic Geology, Faculty of Geology, Lomonosov
Moscow State University; Moscow, Russia



Источник: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f2/Terraced_fields_Sa_Pa_4.jpg