

Применение методов геоинформатики для изучения и оценивания риска последствий землетрясений

А. А. Басаргин^{1*}

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: abaspirant@mail.ru

Аннотация. Борьба человечества с последствиями сильных и катастрофических землетрясений ведется на протяжении всей его истории, но до настоящего времени успехи на данном поприще достаточно скромные. Это объясняется сложностью и труднодоступностью объектов для изучения глубинных геологических процессов, приводящих к деформированию и деструкции верхней оболочки Земли, в которой проявляется сейсмичность. Оценка риска землетрясений для смягчения их последствий является одним из важнейших вопросов для страны, где могут произойти такие стихийные бедствия. Тектонические и структурно-геологические исследования с использованием современных космических средств дистанционного зондирования и их интеграция с пространственными данными в среде географической информационной системы (ГИС) становятся все более популярными среди ученых. Разрывы и связанную с ними деформацию поверхности из-за сотрясения грунта можно наблюдать с помощью методов дистанционного зондирования. Использование методов дистанционного зондирования для распознавания смещения разломов производилось в Исфахане (Иран). На основе полученных данных была составлена карта сейсмической активности с полевыми проверками и лабораторным анализом данных. Таким образом, цель статьи – показать возможности геоинформатики для исследования землетрясений. Это позволит повысить устойчивость к будущим землетрясениям, особенно для тех исторических зданий и мостов, которым более 400 лет.

Ключевые слова: географическая информационная система (ГИС), тектонические и структурно-геологические исследования, линеамент, ASTER, спектральный анализ опасности Ambreasys & Simpson's, метод UHS

Введение

Стихийные бедствия, такие как циклон, наводнение, засуха, оползень, землетрясение и т. д., оказывают разрушительное воздействие на жизнь и имущество. Землетрясения являются кратковременными, угрожающими и наиболее опасными стихийными бедствиями из-за их внезапного воздействия и разрушения в течение нескольких секунд, что приводит к огромным человеческим жертвам и материальному ущербу. Максимальные экономические потери, вызванные стихийными бедствиями, произошедшими в Азиатско-Тихоокеанском регионе, приходятся на период с 1900 по 2005 г.

Согласно отчету ООН за 2019 г., Иран входит в число 15 стран мира, столкнувшихся со стихийными бедствиями. Также сюда входят и некоторые из стран, соседствующих с Азией, такими как Армения, Турция, Афганистан, Индия, Российская Федерация и Гру-

зия. Деформация земной коры на самом деле является прямым проявлением процесса, приводящего к землетрясениям. Хотя районы, подверженные сейсмической опасности, достаточно хорошо известны, мы мало продвинулись в своей способности предсказывать когда, где и какой силы произойдет следующее землетрясение. Поскольку мы не в состоянии оценить землетрясение, необходимо попытаться определить научные причины его возникновения. Для этого очень важно изучение неотектоники и геологии конкретного региона.

Чрезвычайные ситуации в городских районах требуют:

- 1) отличной координации между различными аварийно-спасательными службами;
- 2) актуальной информации с географической привязкой;
- 3) интеллектуального принятия решений для передачи приказов и информации различным ведомствам.

Такие возможности предоставляют геоинформационные технологии, которые могут сыграть жизненно важную роль в смягчении последствий стихийных бедствий. Геоинформатика представляет собой конгломерат измерений, картографирования, геодезии, спутникового позиционирования, фотограмметрии, компьютерных систем и компьютерной графики, дистанционного зондирования, географических информационных систем (ГИС) и визуализации окружающей среды [1–3].

Спутники наблюдения Земли обеспечивают всестороннее, синоптическое и многовременное покрытие больших территорий в широком диапазоне масштабов от целых континентов до деталей размером в несколько метров в режиме реального времени и с частыми интервалами. Таким образом, эти данные стали ценными для непрерывного мониторинга Земли.

Метод дистанционного зондирования и обнаружения изменений на основе GPS используется для точной и быстрой оценки повреждений домов и других сооружений, вызванных землетрясением, поскольку этот метод является экономически эффективным, объективным [4–6].

В данной работе анализ опасности землетрясений на площади Накш-э Джахан оценивается с использованием комбинации технологий геоинформатики и данных исследований, а также с помощью лабораторного анализа. В соответствии с последними региональными данными о сейсмичности с использованием методов геоинформатики с целью определения эпицентров землетрясений также был сделан акцент на состояние зданий во время будущих землетрясений.

Область исследования

Район исследования расположен в центральной части Ирана. Исфахан – исторический город Ирана, история которого насчитывает более 600 лет. Он находится примерно в 360 км к юго-востоку от Тегерана. Площадь Накш-э Джахан была выбрана из-за убедительных данных для сбора в районе исследования. Она представлена на рис. 1 [5].

В геологическом отношении исследуемая территория относится к Санандадж-Сирджанской зоне, которая сложена изверженно-метаморфическими породами вулканического и осадочного происхождения от докембрия до современности. Обычно землетрясения в этом регионе подразделяются на два периода [2–6].

1. Историческая сейсмичность до 1900 г.

2. Инструментальная сейсмичность после 1900 г.

Первое зарегистрированное землетрясение в Иране относится к четвертому веку до нашей эры, когда был полностью разрушен древний город Рей.

Сейсмическая активность в Иране ограничена районами нагорья Загрос.

В последние годы было проведено много исследований характеристик землетрясений в Иране (Berberian, 2019; Berberian, 2020; Barzangi, 2021; Ali and Pirasteh, 2020).

Некоторые из крупных разломов вокруг города Исфахан (в радиусе 150 км) распознаются с помощью методов обработки цифровых изображений. Ключевыми элементами для выявления особенностей линеаментов были резкость и линейность в дренажах и растительном покрове. Другие элементы изображения, такие как тон и ассоциация, использовались для интерпретации.

Тем не менее в ходе этого исследования обнаруживаются следующие разломы [3–13]:

- главный пояс Заргоса;
- Ардал;
- Зардкох;
- Дополан;
- Сабзкох;
- Колагази.

Активные разломы Ирана и расположение региона показаны на рис. 2. Параметры сейсмичности учитываются в геопространственном плане. К ним относятся фундаментальные недостатки моделей, анализ которых основан на существующих данных Международного института сейсмостойкого строительства и сейсмологии.

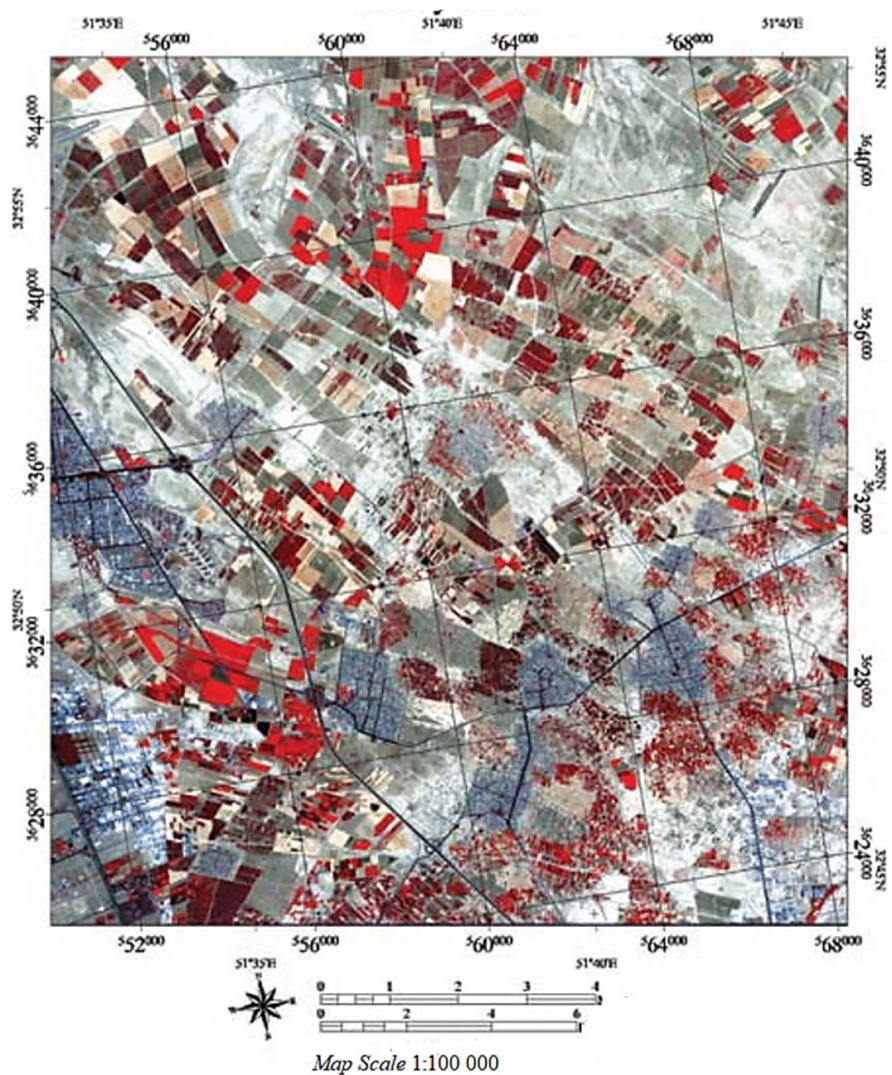


Рис. 1. Спутниковый снимок ASTER 3-2-1 FCC

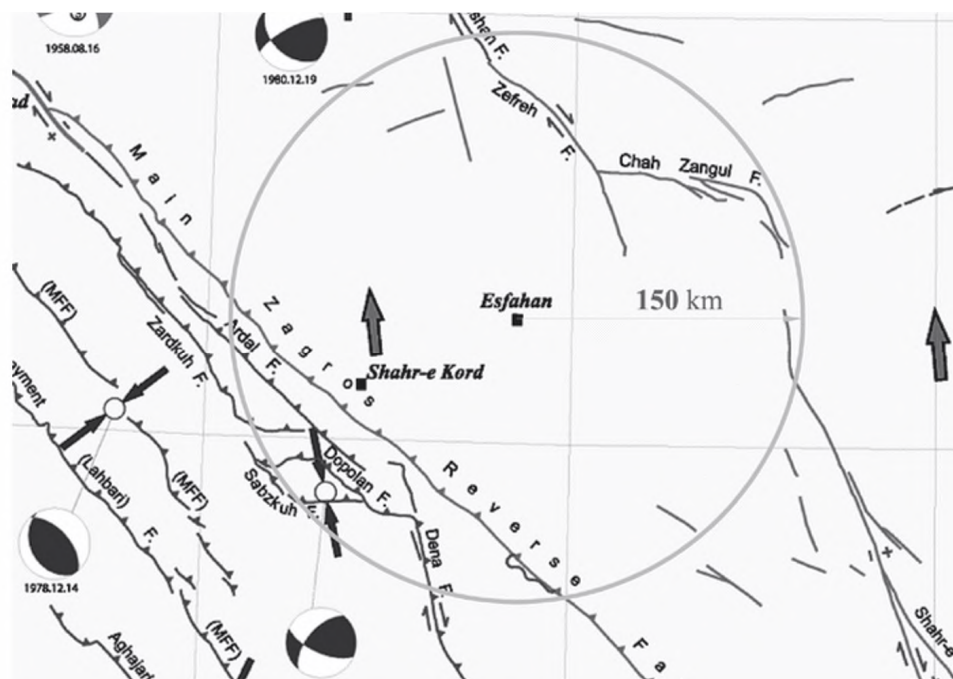


Рис. 2. Историко-инструментальная схема района радиусом 150 км [5]

Методы и материалы

Исследование землетрясений вокруг города Исфахан выполнялось в следующей последовательности [10–15]:

- исследование полевых данных и лабораторный анализ грунтов;
- анализ данных дистанционного зондирования;
- интеграция данных анализов в среде ГИС;
- использование различных вероятностных методов для оценки землетрясений.

Кроме того, предпринималось несколько полевых проверок для сбора наземных данных. Это было сделано с помощью глобальной системы позиционирования (GPS). Данные использовались в лаборатории для анализа риска опасности. В этом исследовании также использовалось ASTER-изображение, которое было выбрано для извлечения линейных структурных признаков с использованием программного обеспечения ENVI [15].

Космический снимок был геометрически скорректирован с помощью цифровой топографической карты масштаба 1 : 25 000. Для выделения линеаментов и разломов применялись различные методы усиления. Используя

элементы изображения и полевые исследования, дефекты были распознаны и оцифрованы на изображении. Для всех разломов применялась буферная техника в среде Arcview.

Тот же буферный метод также применяется для 150 км от города Исфахан (см. рис. 2) на основе статистики исторических землетрясений.

Цифровая топографическая карта района площади Эмам, Исфахан, Иран в масштабе 1 : 2 000 была введена в среду ГИС с помощью программного обеспечения Arcview и была создана 3D-модель (рис. 3). Данные, собранные для всех зданий, также вводятся в среду Arcview для анализа и определения нетехнических и инженерных зданий.

Представление о классификации зданий дано на основе свойств материала, используемого в строительстве, который устойчив к землетрясению силой около 5 баллов по шкале Рихтера. Данные за 475 лет были собраны и статистически обработаны в Microsoft Excel для понимания периода цикла землетрясений. Эти данные использовались для различных вероятностных методов, таких как спектральный анализ опасности Ambreasys & Simpson's, для оценки анализа риска землетрясений [16].

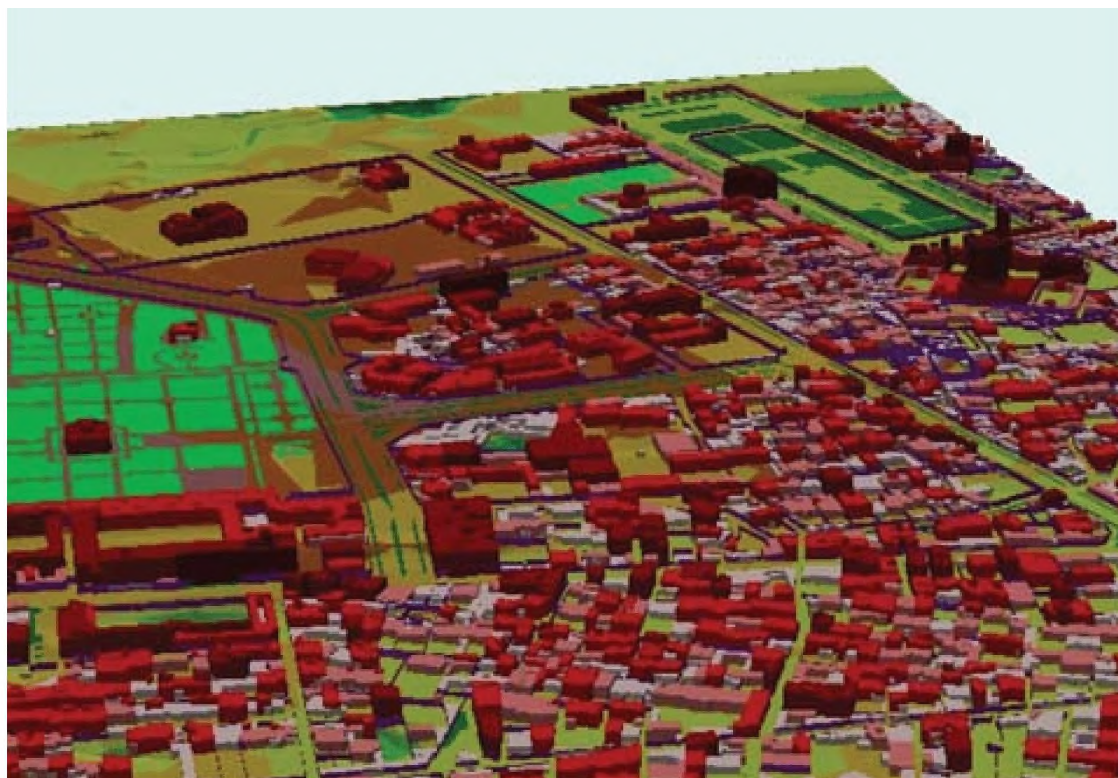


Рис. 3. Изображение площади Накш-э Джахан, Исфахан, Иран [18]

Кроме того, в этом исследовании используются методы интерпретации спутниковых изображений и ГИС для создания обновленных карт, таких как структурная карта. Каталогизация сейсмичности используется в сейсмологическом проектировании и анализе. На основании зонирования региона в рамках данного исследования соответствующими параметрами сейсмичности являются: максимизация магнитуды сейсмичности, годовая повторяемость. Данные параметры оценивались с помощью общих процедур [16–20].

Результаты

Таким образом, из исследованных результатов наблюдений с помощью геопространственных методов и интеграционного лабора-

торного анализа, наряду с методами геоинформатики, получено, что большинство домов необходимо будет восстанавливать, если сила землетрясения будет более 5–6 баллов.

Исследования, связанные с землетрясением и тектоникой обозначенного региона, показывают, что на основе сейсмической активности в Иране ограничена высокими районами Загроса по сравнению с центром и востоком страны.

На рис. 4 показана диаграмма риска участка поверхности, которая основана на спектрах Ambreasys & Simpson's, полученных с помощью зависимости спектрального затухания магнитуды. Результат анализа в отношении риска сейсмичности 1 и 2 уровня основан на зависимости затухания Ambreasys & Simpson's. Он показан на рис. 5.

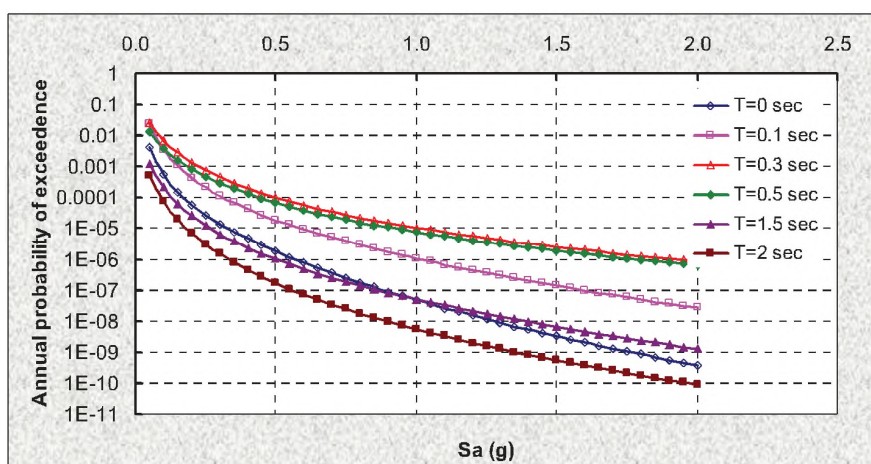


Рис. 4. Диаграмма кривых анализа опасности на основе Ambreasys & Simpson's [19]

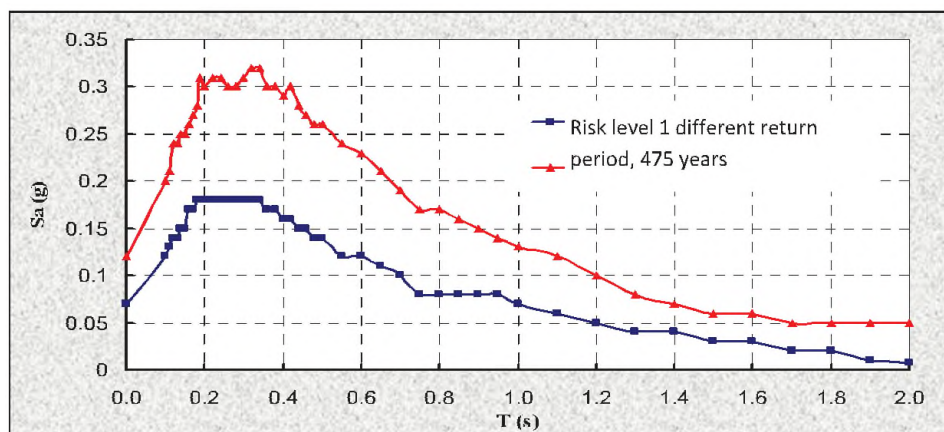


Рис. 5. Уровни риска сейсмичности, 1 и 2, метод UHS, основанный на соотношении Ambreasys & Simpson's (1996) [19]

Объем спектров сравнивается с существующей инструкцией по восстановлению зданий по нормам сейсмичности. В случае если полученные спектры ускорения для объекта составляют менее 70 % от аналогичного, то тогда указанное значение установит основу. В работе также было рассчитано поведение спектров методом UHS для двух уровней риска. Они представлены на рис. 6.

Методы геоинформатики, совместно с геопространственными, а также ГИС-технологиями, были применены для оценки сейсмической опасности на площади Накш-э Джахан, Исфахан, Иран. Таким образом, комбинация геоинформационного анализа опас-

ности с использованием методов Ambreasy & Simpson's, а также Sarma & Srbulov является хорошим методом для изучения истории землетрясений.

Применение методов геоинформатики, основанных на идентифицировании землетрясений в непосредственной близости от участка, а также полученные планы разломов с помощью (PEES) можно использовать для определения максимальной сейсмической активности (МСА).

Так, согласно исследованиям, проведенным на площадке, были получены следующие результаты по пиковому ускорению грунта (рис. 7).

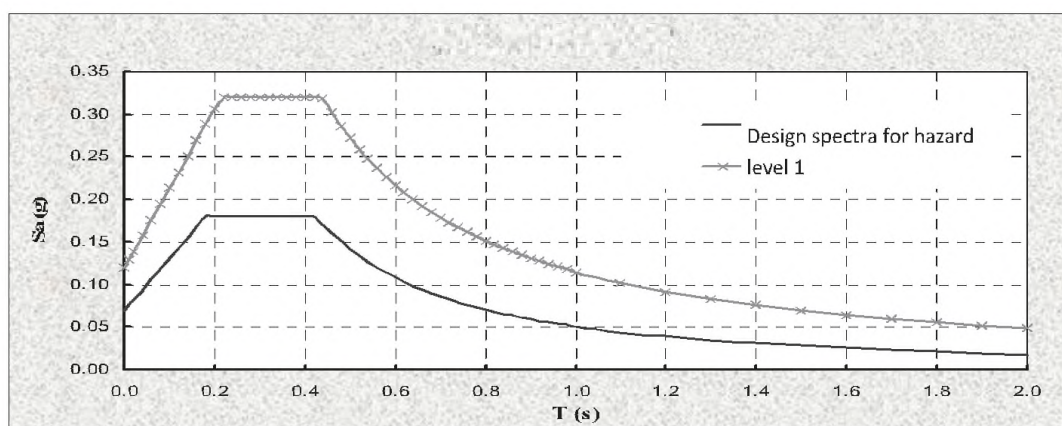


Рис. 6. Расчетные спектры участка, площадь Эмам (Накш-э Джахан) [19]

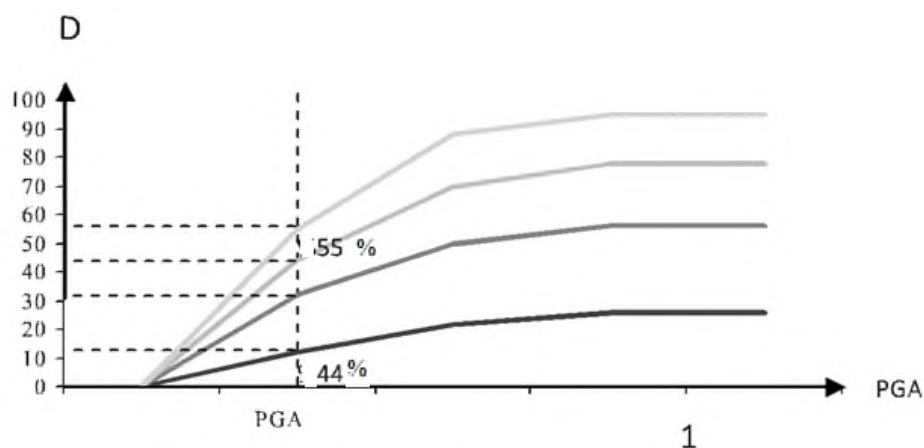


Рис. 7. Взаимосвязь пикового ускорения грунта и повреждений [19]

Заключение

Таким образом, исследование показывает, что Иранский регион сталкивается с многочисленными опасностями в отношении будущих

стихийных бедствий. Это надо учитывать при планировании строительства, а также различных программ городской инфраструктуры.

По соотношениям затухания и кратчайшему расстоянию каждого разлома в районе

исследования, выделенному методами дистанционного зондирования, до заданной площадки с глубиной очага 30 км рассчитывается максимальная скорость движения грунта.

Результаты анализа представлены в таблице. Оценка максимальной вероятной скорости землетрясения (МСЗ) основана на детерминированном методе с эквивалентном 0,18 g. Исследования показывают, что ГИС является мощным инструментом для хранения и ана-

лиза данных в области гражданского строительства, а также землетрясений. Интеграция методов дистанционного зондирования для обнаружения геоструктурных особенностей, таких как линеаменты, наряду с изучением городских землетрясений с концепцией анализа пространственных данных, будет более эффективной при использовании и других статистических методов геоинформатики для оценки последствий землетрясений.

Результаты детерминированного анализа на основе индикаторных разломов в регионе [19]

Длина разлома (км)	Расстояние от источника до места (км)	Магнитуда (Макс)	Ambreasys Bommer (g)	Sarma & Srbulov	Логическое дерево (g)	Особенности и комментарии
250	90	7,5	0,07	0,08	0,07	MZRF
100	110	7,1	0,04	0,05	0,04	Ardal
150	100	7,3	0,06	0,06	0,05	Zefreh
130	100	7,2	0,05	0,05	0,05	Dena
130	130	7,2	0,04	0,04	0,04	Zardkuh
40	20	6,1	0,17	0,21	0,18	Kolahghazi
110	120	7,1	0,04	0,04	0,04	Dopolan
120	130	7,2	0,04	0,04	0,04	Sabzkuh
85	30	7,0	0,07	0,09	0,08	Kashan

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аковецкий В. И. Дешифрирование снимков : учеб. для вузов. – М. : Недра, 1983. – 374 с.
2. Арбузов С. А., Гук А. А. Исследование алгоритма «дерево решений» в программном комплексе ENVI // Геодезия и картография. – 2011. – № 2. – С. 11–14
3. Исаев А. С. и др. Аэрокосмический мониторинг лесов. – М. : Недра, 1991. – 240 с.
4. Геворков В. Р. Характеристики спутников высокогоразрешения // Пространственные данные. – 2005. – № 3. – С. 28–41.
5. Географические информационные системы и дистанционное зондирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gislab.info/qa.html>.
6. Журкин И. Г., Цветков В. Я. Международная конференция «Методы дистанционного зондирования и ГИС–технологии для контроля и диагностики состояния окружающей среды» // Геодезия и картография. – 1997. – № 1. – С. 44–46.
7. Загреев В. В., Сухих В. И., Швиденко А. З. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. – М. : Колос, 1992. – 495 с.
8. Закс Л. Статистическое оценивание. – М. : Статистика, 1976. – 598 с.
9. Кашкин В. Б., Сухнин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений : учеб. пособие. – М. : Логос, 2001. – 264 с.
10. Гук А. П., Евстратова Л. Г., Хлебникова Е. П., Гордиенко А. С., Попов Р. А. Лазерко М. М., Арбузов С. А. Космический мониторинг территорий на основе цифровой обработки многозональных космических снимков среднего и высокого разрешения // Сб. материалов международной научно-практической конференции «Индустриально-инновационное развитие на современном этапе: состояние и перспективы». – Павлодар : Инновац. Евраз. ун-т, 2009. Т. 1. –С. 122–123.
11. Лабутина И. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков: учеб. пособие для студентов вузов. – М. : Аспект Пресс, 2004. – 184 с.
12. MATLAB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
13. Теория и практика NDVI [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>.

14. Прэрт У. Цифровая обработка изображений: в 2 кн. – М. : Мир, 1982. – 670 с.
15. Рис У. Г. Основы дистанционного зондирования. – М. : Техносфера, 2006. – 336 с.
16. Симонов Д. П. Метрический подход к дешифрированию снимков // Геодезия и картография. – 2014. – № 10. – С. 51–56.
17. Симонов Д. П. Дешифрирование природных территориальных комплексов по многозональным космическим снимкам высокого разрешения (на примере растительности) // Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия. – 2015. – № 10. – С. 10–22.
18. Хлебникова Е. П., Симонов Д. П. Исследование методов статистического анализа при дешифрировании многозональных космических снимков // Интерэкспо ГЕО–Сибирь–2014: X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апр. 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 1. – С. 19–23.
19. Ambrasys N. N., Simpson K. A., Bommer J. J. Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. – 2021. – Vol. 25. – P. 371–400.
20. Saraf A. K., Mishra P., Mitra S., Sanna B., Mukhopadhyay D. K. Remote sensing and GIS Technologies for Improvements in Geological Structures Interpretation and Mapping (A Technical note) // International Journal of Remote Sensing. – 2022. – Vol. 23, No. 13. – P. 2527–2536.

Об авторах

Андрей Александрович Басаргин – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных систем.

Получено 29.06.2022

© А. А. Басаргин, 2022

Application of probabilistic methods of geoinformatics for the study and estimation of earthquakes circumstances

*A. A. Basargin¹**

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: abaspirant@mail.ru

Abstract. The struggle of mankind against the consequences of strong and catastrophic earthquakes has been going on throughout its history, and so far, success in this field is rather modest. This is due to the complexity and inaccessibility of objects for studying deep geological processes that lead to deformation and destruction of the Earth's crust, in which seismicity is manifested. Earthquake risk assessment for earthquake mitigation is one of the most important issues for a country where such natural disasters can occur. Tectonic and structural-geological studies using modern space remote sensing tools and their integration with spatial data in a geographic information system (GIS) environment are becoming increasingly popular among scientists. Ruptures and associated surface deformation due to ground shaking can be observed with remote sensing data. The use of remote sensing methods to recognize the displacement of faults was carried out in Isfahan (Iran). Based on the obtained data, a map of seismic activity was compiled with field checks and laboratory data analysis. Thus, the purpose of the article is to show the possibilities of geoinformatics for the study of earthquakes. This will increase resilience to future earthquakes, especially for those historic buildings and bridges that are over 400 years old.

Keywords: geographic information system (GIS), tectonic and structural-geological studies, lineament, ASTER, Ambreasys & Simpson spectral hazard analysis, UHS method

REFERENCES

1. Akovetsky, V. I. (1983). *Deshifrirovaniye snimkov [Deciphering images]*. Moscow: Nedra Publ., 374 p. [in Russian].
2. Arbuzov, S. A., & Guk, A. A. (2011). Research of the decision tree algorithm in the ENVI software package. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 2, 11–14 [in Russian].

3. Isaev, A. S., & et al. (1991). *Aerokosmicheskiy monitoring lesov [Aerospace monitoring of forests]*. Moscow: Nedra Publ. 240 p. [in Russian].
4. Gevorkov, V. R. (2005). Characteristics of high resolution satellites. *Prostranstvennyye dannye [Spatial Data]*, 3, 28–41 [in Russian].
5. Geographical information systems and remote sensing. (n. d.). Retrieved from <http://gislab.info/qa.html> [in Russian].
6. Zhurkin, I. G., & Tsvetkov V. Ya. (1997). International conference "Methods of remote sensing and GIS-technologies for monitoring and diagnosing the state of the environment". *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 1, 44–46 [in Russian].
7. Zagreev, V. V., Sukhikh, V. I., & Shvidenko, A. Z. (1992). *Obshchesoyuznye normativy dlya taksatsii lesov [All-Union standards for forest inventory]*. Moscow: Kolos Publ., 495 p. [in Russian].
8. Zaks, L. (1976). *Statisticheskoe otsenivanie [Statistical estimation]*. Moscow: Statistika Publ., 598 p. [in Russian].
9. Kashkin, V. B., & Sukhnin A. I. (2001). *Distantstionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Remote sensing of the Earth from space. Digital image processing]*. Moscow: Logos Publ., 264 p. [in Russian].
10. Guk, A. P., Evstratova, L. G., Khlebnikova, E. P., Gordienko, A. S., Popov, R. A. Lazerko, M. M., & Arbuzov, S. A. (2009). Space monitoring of territories based on digital processing of multi-zone space images of medium and high resolution. In *Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: T. 1. Industrial'no-innovatsionnoe razvitie na sovremennom etape: sostoyanie i perspektivy [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: Vol. 1. Industrial and Innovative Development at the Present Stage: State and Prospects]* (pp. 122–123). Pavlodar: Innovative University of Eurasia Publ. [in Russian].
11. Labutina, I. A. (2004). *Deshifrirovaniye aerokosmicheskikh snimkov [Interpretation of aerospace images]*. Moscow: Aspect Press Publ., 184 p. [in Russian].
12. MATLAB. (n. d.). Retrieved from <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
13. Theory and practice of NDVI. (n. d.). Retrieved from <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>.
14. Pratt, W. (1982). *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]*. Moscow: Mir Publ., 670 p. [in Russian].
15. Ris, U. G. (2006). *Osnovy distantstionnogo zondirovaniya [Fundamentals of remote sensing]*. Moscow: Technosfera Publ., 336 p. [in Russian].
16. Simonov, D. P. (2014). Metric approach to image decoding. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 10, 51–56 [in Russian].
17. Simonov, D. P. (2015). Interpretation of natural territorial complexes using high-resolution multi-zone satellite images (on the example of vegetation). *Aerokosmicheskie issledovaniya Zemli, fotogrammetriya [Aerospace Research of the Earth, Photogrammetry]*, 10, 10–22 [in Russian].
18. Khlebnikova, E. P., & Simonov D. P. (2014). Investigation of statistical analysis methods for deciphering multi-zone space images. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Distantstionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchey sredy, geoekologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 1. Remote Sensing Methods of the Earth and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geoecology]* (pp. 19–23). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
19. Ambrasys, N. N., Simpson, K. A., & Bommer, J. J. (2021). Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 25, 371–400.
20. Saraf, A. K., Mishra, P., Mitra, S., Sanna, B., & Mukhopadhyay, D. K. (2022). Remote sensing and GIS Technologies for Improvements in Geological Structures Interpretation and Mapping (A Technical note). *International Journal of Remote Sensing*, 23(13), 2527–2536.

Об авторах

Andrei A. Basargin – Ph. D., Assoc. Prof., Department of Applied Informatics and Information Systems.

Received 29.06.2022

© A. A. Basargin, 2022