



## Обзор методов моделирования для оценки риска геологической опасности

**Жанай Сагинтаев**

Инженерный Факультет, Назарбаев Университет, Астана, Казахстан  
([zhanay.sagintayev@nu.edu.kz](mailto:zhanay.sagintayev@nu.edu.kz))

**Серикжан Атанов**

Казахстанско-Немецкий Университет, Алматы, Казахстан

**Аброр Гафуров**

Германский исследовательский центр геофизических исследований GFZ, Потсдам, Германия

МРНТИ 28.17.23

### *Аннотация*

*Возникновение стихийных бедствий и антропогенных катастроф неизбежно, поэтому подготовка является ключевым аспектом успешной устойчивости к стихийным бедствиям. Климатические и антропогенные искажения и растущее население оказывают влияние на окружающую среду и увеличивают вероятность стихийных бедствий в Центральной Азии. Водные ресурсы в Центральной Азии образуются высоко в горах во время таяния снега и ледников. Повышение температуры на более высоких высотах окажет влияние на процесс таяния снега и ледников, и изменит режим стока рек Центральной Азии. Сочетание различных методов моделирования: региональный мониторинг климата, гидрологический, гидрогеологический, геотехнический, речная гидравлика, мониторинг селевых потоков, оползней, а также инструменты моделирования искусственных нейронных сетей используется для анализа прогнозов и подготовки к стихийным бедствиям. Данная статья рассматривает некоторые из этих методов моделирования.*

**Ключевые слова:** Центральная Азия, изменение климата, гидрологические изменения, геологические опасности.

### **1. Введение, текущие проблемы Центральной Азии в прогнозах геологической опасности**

Наводнения и засухи становятся все более разрушительными во многих регионах Центральной Азии. Многие исследователи связывают эти события с антропогенными изменениями природы и климата, а также с инженерным строительством [1, 2]. Более того, по словам экспертов ООН, «только 4 процента от предполагаемой ежегодной гуманитарной помощи в размере 10 млрд долларов США направлены на профилактику, но тем не менее, каждый доллар, потраченный на снижение риска, экономит от 5 до 10 долларов в результате экономических потерь от стихийных бедствий» [3]. Таяние снега и ледников имеют важное значение для водоснабжения во многих странах Центральной Азии, причем около 90 % этой воды используется для орошения. С повышением температуры в регионе из-за изменения климата вдоль Тянь-Шаня, крупнейшего

горного хребта Центральной Азии, за последние 50 лет ледники потеряли 27 процентов своей массы и 18 процентов площади [4]. Более экстремальные климатические изменения, вероятно, увеличат риск геологических опасностей, наводнений, оползней, землетрясений, что приведет к еще более экстремальным погодным условиям. Обобщающий доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC), опубликованный в 2012 году [5], подтвержденный [6], с высокой достоверностью прогнозирует, что будущие изменения в виде аномальной жары, отступления ледников и/или таяния вечной мерзлоты будут увеличивать появление оползней. К тому же, за последние два десятилетия увеличилось количество обрушений горных пород, особенно в первые годы 21 века [7]. Наиболее частые причины стихийных бедствий: весенние и дождевые паводки, составляют около 30 % от общего числа бедствий. Большинство регионов Центральной Азии подвержены высокому риску затопления и селей. Кроме того, Центрально-Азиатский регион расположен в зоне сейсмической активности, где особую опасность представляют сильные и разрушительные землетрясения. Многие проблемы и катастрофы взаимосвязаны между собой, поэтому необходимо применять мультидисциплинарный подход к определению причин и потенциальных опасностей. Землетрясения, контроль аварий на плотинах водохранилищ, ураганы, наводнения и пожары могут происходить одновременно в цепочке действий. Большинство стран Центральной Азии не имеют передовых технологий для мониторинга наводнений и засухи и их раннего предупреждения. Нередко жители Центральной Азии не успевают должным образом отреагировать раньше, чем произойдут чрезвычайные ситуации. Сочетание различных методов моделирования: региональный мониторинг климата, гидрологический, гидрогеологический, геотехнический, речная гидравлика, мониторинг селевых потоков, оползней, а также инструменты моделирования ИНС будут полезны для анализа прогнозов и подготовки к стихийным бедствиям в Центральной Азии.

## **2. Систематизация различных методов моделирования, включая климатические сценарии, региональный климат, гидрологический, гидрогеологический, речную гидравлику, геотехнический, мониторинг селевых потоков, оползней, инструменты моделирования ИНС**

«Все модели ошибочны, но некоторые из них полезны.» Это простое изречение Джорджа Бокса может быть применимо к данной главе [8]. Ни один из инструментов моделирования не совершенен, так как все они имеют некоторые ограничения. Разрабатывая различные инструменты моделирования, исследователи имитируют природные процессы, добавляя ограничения в свои модели. Цепочку различных методов моделирования, которые могут быть полезны для оценки геологических рисков, можно разделить на несколько больших категорий, включая:

- 2.1. Гидрометеорологический контроль, климатические сценарии
- 2.2. Гидрологическое, гидрогеологическое и гидравлическое моделирование

2.3. Прогнозирование чрезвычайных ситуаций, геотехническое моделирование, включая возникновение оползней

2.4. Искусственная нейронная сеть (ИНС)

### *2.1. Гидрометеорологический контроль, климатические сценарии*

Для различных текущих и будущих прогнозов применения локального и регионального гидрометеорологического мониторинга многие исследователи используют данные о климатических сценариях МГЭИК [9]. Например, климатические сценарии СМIP5 в период с 1950 по 2100 годы могут использоваться для оценки возможных климатических прогнозов в Центральной Азии. В предыдущей работе авторов, ежедневные климатические данные СМIP5 по осадкам, температуре, относительной влажности и солнечного излучения были подготовлены для оценки воздействия климата в некоторых водоразделах Центральной Азии. Увеличение исследовательской работы в Центральной Азии может принести пользу благодаря предыдущим исследованиям, где эти данные с ежедневным временным разрешением уже были протестированы [10,11]. Существует несколько моделей, в которых используются различные характерные пути концентрации (rср2.6, rср4.5, rср6.0 и rср8.5). Для оценки воздействия на климат в последующих исследовательских областях, необходимо учитывать изменения температуры и количества осадков в будущем относительно контрольного периода на основе всех моделей, чтобы выявить вероятные изменения в будущем. Исходные климатические сценарии предоставляются в виде наборов данных на основе сетки, и размер каждой ячейки сетки очень велик (100-200 км), чтобы его можно было применить непосредственно для оценки воздействия на климат. Для того, чтобы сделать их применимыми для исследований в акватории, важно провести поправку на смещение. Существуют различные подходы для проведения поправки на смещение, которые используют прошлые записи климатических наблюдений для статистической поправки на смещение будущих климатических прогнозов. Намеренное корректирование обеспечивает возможность статистического даунскейлинга климатических записей до расположения станций, что в дальнейшем позволяет прогнозировать климатические записи на этих станциях. Поэтому важно учитывать записи климатических наблюдений метеорологических станций, расположенных в исследовательских районах или вблизи них.

Другим примером региональной климатической модели является модель PRECIS (HadRM3P), которая основана на атмосферном компоненте модели HadCM3 метеорологического Бюро Великобритании (Hadley Centre Coupled Model, версия 3) [12]. PRECIS имеет горизонтальное разрешение 25 или 50 км и выводит более 130 метеорологических переменных на суточные, дневные, месячные и годовые временные частоты. Региональная система моделирования климата PRECIS имеет удобный графический интерфейс и бесплатное предоставление нескольких GCM (включая новейшие HadGEM2-ES из последней партии СМIP5) в качестве входных данных.

Модельные прогнозы могут использоваться при разработке климатических прогнозов для отдельных регионов.

### *2.2. Гидрологическое, гидрогеологическое и гидравлическое моделирование*

После того как разработаны статистический даунскейлинг и корректировка климатических записей, гидрологические модели могут быть применены для климатических прогнозов и имитирования речных стоков. Это позволит оценить изменения речных стоков на исследуемых участках. В зависимости от наличия данных, могут применяться различные типы гидрологических, гидрогеологических, гидравлических моделей, таких как концептуальная модель, например, HBV [10], распределенная модель, например, WASA [13, 14], инструмент оценки грунтовых вод (SWAT) [15], GMS ModFlow [16, 17], DHI MIKE SHE, MIKE Hydro, MIKE 21 и MIKE 11 [18]. Распределенные гидрологические модели описывают гидрологические процессы более подробно, но за счет большего объема данных. Концептуальные гидрологические модели имитируют водный баланс на уровне потока, в следствие чего не требуют больших данных. Имитирование предстоящего речного стока с использованием гидрологических моделей также позволяет оценивать изменения отдельных компонентов: таяние снега, ледников, дождь или вхождение грунтовых вод в общий сток. Результаты имитирования изменения речного стока дают представление о возможных изменениях в будущем, на основе которых могут быть разработаны стратегии, связанные с водой, чтобы смягчить негативное влияние потепления климата на социально-экономическую сферу в исследовательских областях.

### *2.3. Прогнозирование чрезвычайных ситуаций, геотехническое моделирование, включая возникновение селей и оползней*

Селевые потоки и оползни являются одними из основных природных опасностей в странах Центральной Азии, где ежегодно они приводят к ряду несчастных случаев. Таким образом, разумное моделирование прохождения селей имеет решающее значение для улучшения нынешних возможностей оценки риска, создаваемого оползнями. Эксперты в области вычислительных методов разрабатывают соответствующие инструменты моделирования, в том числе методы дискретных элементов, МКЭ при больших перемещениях, бессеточные методы и однофазные (SPH), применимые для моделирования оползней, вызванных селевыми потоками. Метод дискретного элемента (DEM) все чаще используется в научном сообществе для моделирования ситуаций с возникновением оползня на скалистых склонах, где его поведение регулируется наличием больших разрывов, в частности трещин, наслоений, сдвигов, а также сыпучих материалов. В этом случае важно правильно смоделировать каменные блоки некруглой и несферической формы, для 2D моделирования обвала породы, а более реалистичное 3D моделирование [19,20] осуществляется в открытом исходном коде YADE. Инновационные разработки были внесены в код DEM с открытым исходным кодом YADE. В частности, что касается моделирования систем разрушения горной массы, разработки состоят из определения ранее существовавших разрывов как Дискретной

сети трещин (DFN), первоначально подключенной к набору дискретных элементов в сочетании с использованием модифицированной контактной схемы, которая обеспечивает точное представление трещин в породах. Таким образом, образование трещин в неповрежденном материале и оседание внутри разрывов может быть воспроизведено в зависимости от условий нагрузки и прочности материала. DFN в сочетании с DEM представляет собой важный инструмент для понимания и прогнозирования неустойчивостей, приводящих к обрушению скальных склонов, имеющих трещины. В настоящее время метод конечных элементов (FE) является основным вычислительным методом, используемым инженерами-геотехниками для анализа действий на участках и разработки геотехнических стратегий для уменьшения геологических опасностей, защиты от оползней и сейсмостойкой инфраструктуры. Есть множество ситуаций, когда традиционный анализ методом конечных элементов не может справиться с такими проблемами как наличие локализованных и диффузных характеров повреждения почвы, или смоделировать распространение оползней и грязевых потоков. Для решения этих типов проблем разрабатываются передовые методы конечных элементов. Так как модели охватывают все больше и больше степеней свободы и масштабов анализа, необходимо рассмотреть ранее неизвестные вычислительные проблемы, связанные с сходимостью алгоритма и стабильностью [21, 22]. Геомеханическое сообщество также сталкивается с растущей потребностью в экспертизе сочетания численных кодов [23, 24] и моделирования перехода между дискретной и сплошной средой [25, 26]. Точечный метод (MPM) — метод конечных элементов применяемый с Лагранжевыми точками интерполяции для моделирования устойчивости склонов с анализом больших деформаций, как постоянных, так и обратимых, для имитации повреждения ненасыщенной породы с учетом термогидромеханических траекторий напряжения [27]. Данный метод работает в сочетании с нелинейными конечными элементами и различными моделями разрывов, включая свободные поверхности, интерфейсы, когезионные зоны, чтобы имитировать связанное образование разрывов в разных масштабах.

#### *2.4. Искусственные нейронные сети (ИНС) в гидрологическом Моделировании*

Искусственные нейронные сети (ИНС) - это метод моделирования, который воспроизводит сложные процессы с большим количеством данных. ИНС адаптируется к изменениям в реальном времени и постоянно улучшается, минимизируя ошибки. Первоначально методы ИНС основывались на воспроизведении работы человеческого мозга: «Человеческий мозг — это сложная, нелинейная, параллельная система обработки информации, производительность которой не может сравниться с современным компьютером. Примером одной из таких задач является глаз человека; мозг распознает изображения со скоростью около 100-200 миллисекунд. Таких результатов человеческому мозгу позволяет достигать умение собирать и анализировать накопленный опыт. Нейронная сеть — это машина, имитирующая способ, которым мозг обрабатывает конкретную задачу» [28]. Методы ИНС

применяются для прогнозирования наводнений, селей и землетрясений [29]. ИНС может также использоваться как инструмент [30] для оценки факторов геологического риска и может применяться для прогнозирования наводнений, а также для оценки ущерба от стихийных бедствий [31]. В качестве примера использования ИНС для Центрально-Азиатского региона, автор Атанов работал над проектом «Прогнозирование стока реки Калкутан с использованием технологий искусственного интеллекта» [32]. Для этого исследования ИНС применяли для прогнозирования стока воды реки Калкутан, которая является основным притоком реки Есиль, протекающей в районе города Астаны, столицы Казахстана. Целью исследования было разработать модель прогнозирования стока в реке во время весеннего паводка на основе метода ИНС. Для калибровки использовались данные со станции расхода воды из реки Калкутан. Необходимые гидрометеорологические данные для моделирования ИНС предоставил КазГидроМед, в том числе по осадкам, эквивалентному слою воды и температуре. Самонастраивающиеся нейронные сети с обратной передачей ошибки были применены в рамках программы ИНС, которая является одним из универсальных типов нейронных сетей для моделирования сложных зависимостей. Как результат - была разработана модель для прогнозирования стока воды во время весенних паводков, с точностью до 89% (Рисунок 1). Таким образом, корреляция между фактическими и прогнозируемыми измерениями составила 0.894 [32].

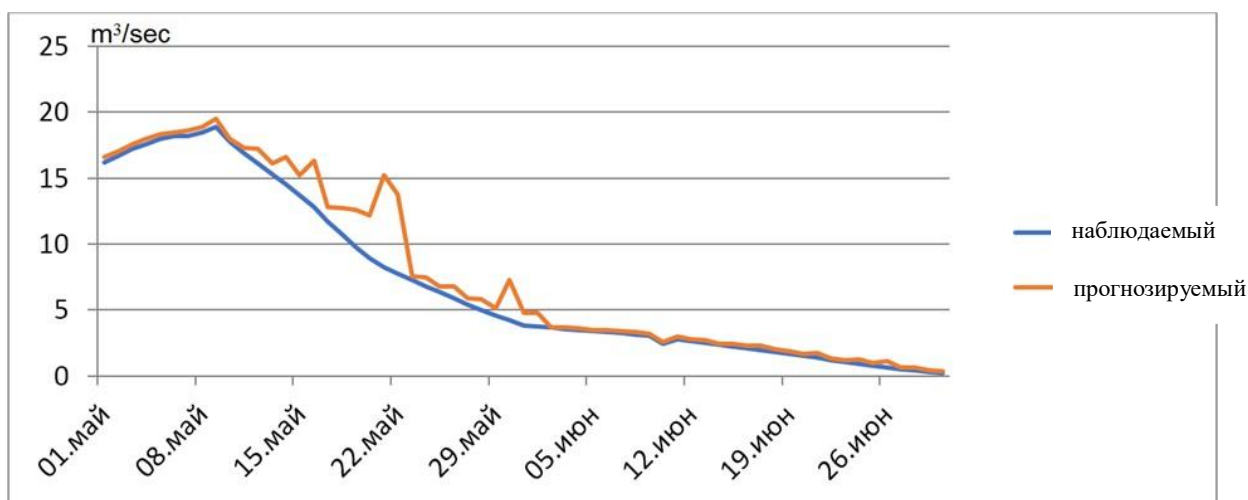


Рисунок 1. Гидрограф сброса воды в реку Калкутан

### 3. Заключение, предстоящие научно-исследовательские работы

Странам Центральной Азии следует усилить акцент, поддержку и создать стимулы для мероприятий и проектов, связанных с уменьшением негативных последствий стихийных бедствий, подготовкой к ним, предупредительными мерами и выявлением проблем. ООН и такие организации, как FEMA (Федеральное агентство по управлению в чрезвычайных ситуациях), рекомендуют больше инвестировать на

предупредительные меры, связанные с уменьшением риска бедствий, поскольку «каждый доллар, потраченный на сокращение рисков, экономит от 5 до 10 долларов в результате экономических потерь от стихийных бедствий» [3].

У центральноазиатских государств отсутствует общий обмен данными. Сбор геопространственных данных является очень трудоемкой задачей, и многие исследователи копируют работы других исследователей. Целесообразно разработать больше открытых баз данных как это уже сделано во многих странах. Помимо этого, геоинформационная система подобная Канадской межведомственной системе ситуационной осведомленности (MASAS) является приемлемой моделью развития [33]. На следующем уровне, используя собранные данные и доступные открытые базы геоданных, можно применять различные инструменты моделирования, некоторые из которых были представлены в этой статье. Вся проектная деятельность и усилия по подготовке к стихийным бедствиям требуют последовательного финансирования. Необходимо правильно рассчитать все возможные расходы и предстоящие убытки. С этой целью США и Канада применяют HAZUS, который можно адаптировать для Центральной Азии [34, 35]. Эти эффективные настоящие и будущие исследовательские работы можно легко применить в Центральной Азии.

#### Список литературы

- [1] DFO, 2017, Dartmouth Flood Observatory (DFO Flood Events), <http://floodobservatory.colorado.edu/Events/2017Kazakhstan4465/2017Kazakhstan4465.html>
- [2] NASA, 2017, Earth Observatory NASA, Natural Hazards Central Asia, <https://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=17369>
- [3] Schwarz, E., 2006, "A Needless Toll of Natural Disasters", UN Secretary General's Deputy Special Envoy, Op-Ed. The Boston Globe. [boston.com/news/globe/editorial\\_opinion/oped/articles/2006/03/23/](http://boston.com/news/globe/editorial_opinion/oped/articles/2006/03/23/)
- [4] Farinotti, D., Longuevergne, L., Moholdt, G., Duethmann, D., Mölg, T., Bolch, T., Vorogushyn, S. and Güntner, A., 2015. Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years, *Nature Geoscience*, 8, 716–722, 2015, doi:10.1038/ngeo2513
- [5] IPCC, 2012, *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
- [6] IPCC, 2014, *Climate Change 2014: Impact, Adaptation and Vulnerability. Summary for policy makers*. Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, AR5
- [7] Ravanel L. and Deline P. 2011. Climate influence on rockfalls in High-Alpine steep rock walls: The north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the 'Little Ice Age'. *The Holocene*, 21(2):357- 365.

- [8] Box, G. E. P., 1976, "Science and Statistics", Journal of the American Statistical Association, 71(356): 791–799, doi:10.1080/01621459.1976.10480949
- [9] DDC IPCC, 2017, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), <http://www.ipcc-data.org/>
- [10] Gafurov, A., Goetzing, J. and Bårdossy, A., 2006. Hydrological modeling for meso scale catchments using globally available data, Hydrology and Earth System Sciences Discussion, 3(4): 2209-2242.
- [11] Gafurov, A., Lüdtk, S., Unger-Shayesteh, K., Vorogushyn, S., Schöne, T., Schmidt, S., Kalashnikova, O., and Merz, B. 2016, MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data. Environmental Earth Sciences 75: 1078, DOI: 10.1007/s12665-016-5869-x
- [12] PRECIS, 2017, PRECIS: a regional climate modelling system, <http://www.metoffice.gov.uk/research/applied/international-development/precis>
- [13] Günter, A. and Bonstert. A., 2004. Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for a large-scale hydrological modeling in semi-arid areas. Journal of Hydrology 297 (1-4):136-161. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.04.008
- [14] Gafurov, A., Kriegel, D., Vorogushyn, S. and Merz, B. 2013. Evaluation of remotely sensed snow cover product in Central Asia. Hydrology Research 44(3), 506-522. DOI: 10.2166/nh.2012.094
- [15] Sagintayev, Z, Sultan, M., Khan, S. D., Khan, A. S., Mahmood, K., Yan, E., Milewski, A., and Marsala, P., 2011, Remote Sensing Contributions to Hydrologic Modeling in Arid and Inaccessible Watersheds, Pishin Lora Basin, Pakistan. Journal of Hydrological Processes 26(1), DOI: 10.1002/hyp.8114/full
- [16] Sagintayev, J., Z. Yerikuly, S. Zhaparkhanov, V. Panichkin, O. Miroshnichenko, and S. Mashtayeva. 2015. Groundwater inflow modeling for a Kazakhstan copper ore deposit, Journal of Environmental Hydrology, 1 (23) Paper 9.
- [17] Sagintayev, J., Salybekova V., Kalitov D., Zavaley V., and Rakhimov T. 2016. Numerical Modeling of the Intensification Processes of Groundwater Treatment for Hexavalent Chromium Using In Situ Technology, Journal of Environmental Hydrology, 24 (Paper 4: 1 – 13).
- [18] DHI, 2017, DHI MIKE is the global organization dedicated to solving challenges in water environments worldwide, <https://www.mikepoweredbydhi.com/>
- [19] Boon CW., Houlsby GT. and Utili S. 2012. A new algorithm for contact detection between convex polygonal and polyhedral particles in the discrete element method. Computers and Geotechnics, 44: 73-82. DOI: 10.1016/j.compgeo.2012.03.012
- [20] Boon CW., Houlsby GT. and Utili S. 2013. A new contact detection algorithm for three dimensional non- spherical particles. Powder Technology, 248: 94-102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.040>
- [21] Sloan, S. W., and Abbo, A. J. 1999. Biot consolidation analysis with automatic time stepping and error control Part 1: theory and implementation. International Journal for



- Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 23(6): 467-492. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9853(199905)23:6<467
- [22] Tamagnini, C., Castellanza, R., and Nova, R. 2002. A generalized backward Euler algorithm for the numerical integration of an isotropic hardening elastoplastic model for mechanical and chemical degradation of bonded geomaterials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 26(10): 963-1004. DOI: 10.1002/nag.231
- [23] Collin F., Laloui L., and Charlier R. (2005). Unified approach of coupled constitutive laws. *Revue Européenne de Génie Civil*, 9, 713-723.
- [24] Kim J., Moridis G., Yang D. and Rutqvist J., 2012, Numerical studies on two-way coupled fluid flow and geomechanics in hydrate deposits. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 17(2): 485-501.
- [25] Sibille, L., Donzé, F. V., Nicot, F., Chareyre, B., & Darve, F. 2008. From bifurcation to failure in a granular material: a DEM analysis. *Acta Geotechnica*, 3(1):15-24.
- [26] Andrade JE., Avila CF., Hall SA., Lenoir N., and Viggiani G., 2011, Multiscale modeling and characterization of granular matter: from grain kinematics to continuum mechanics. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59(2), 237-250 <http://doi.org/10.1016/j.jmps.2010.10.009>
- [27] Gatmiri B., and Arson C., 2008. Theta-Stock, a powerful tool for thermohydronechanical behavior and damage modelling of unsaturated porous media. *Computers and Geotechnics*, 35(6): 890-915. DOI: 10.1016/j.compgeo.2008.08.008
- [28] Haykin, S. O. 2009. *Neural Networks and Learning Machines 3rd Ed.* NY: NYL Pearson Prentice Hall. [https://cours.etsmtl.ca/sys843/REFS/Books/ebook\\_Haykin09.pdf](https://cours.etsmtl.ca/sys843/REFS/Books/ebook_Haykin09.pdf)
- [29] Elsafi, S., 2014, Artificial Neural Networks (ANNs) for flood forecasting at Dongola Station in the River Nile, Sudan, *Alexandria Engineering Journal* 53(3): 655-663 <http://doi.org/10.1016/j.aej.2014.06.010>
- [30] Ercanoglu, M., 2005, Landslide susceptibility assessment of SE Bartin (West Black Sea region, Turkey) by artificial neural networks, *Natural Hazards and Earth Sciences* (5): 979 – 992.
- [31] Al-Azzam, O., Sarsar, D., Seifu, K., and Mekni, M. 2014, Flood Prediction and Risk Assessment Using Advanced Geo-Visualization and Data Mining Techniques: A Case Study in the Red-Lake Valley, *Applied Computational Science*, <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2014/Malaysia/ACACOS/ACACOS-02.pdf>
- [32] Atanov S., 2015, Kalkuran river flow forecasting using artificial intelligence technologies, Astana, Eurasian National University, 49 p.
- [33] MASAS, 2017, Canada's Multi-Agency Awareness System (MASAS), <http://www.canops.org/?page=AboutMASAS>
- [34] HAZUS, 2017, FEMA Multi-Hazards Loss Estimation (HAZUS), <https://www.fema.gov/hazus-software>

- [35] HAZUSCANADA, 2017, HAZUS Canada Using natural disaster scenarios for better planning and response, <http://hazuscanada.ca/>