

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПАВОДКАХ, ВЫЗВАННЫХ ОБИЛЬНЫМИ ОСАДКАМИ

Акимов В.А., Иванова Е.О., Олтян И.Ю.

Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России

Аннотация

В статье для прогнозирования чрезвычайных ситуаций, вызванных паводками, предлагается использовать байесовскую статистику – теорию в области статистики, основанную на байесовской интерпретации вероятности, когда вероятность отражает степень доверия событию, которая может измениться, когда будет собрана новая информация, в отличие от фиксированного значения, основанного на частотном подходе. Получена надежная вероятностная оценка гидрологических параметров, характеризующих участки рек при наводнениях.

Ключевые слова

метод Байеса, наводнения, вероятностная оценка, гидрологические параметры, прогнозирование паводка, паводок, обильные осадки

Введение

В соответствии с федеральным законом "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера" от 21.12.1994 N 68-ФЗ (последняя редакция) одной из основных задач единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций является задача прогнозирования угрозы возникновения чрезвычайных ситуаций (в ред. Федерального закона от 08.03.2015 N 38-ФЗ), решение которой призвано не просто правильно спрогнозировать развитие опасного события, но и предсказать его еще до того, как оно произойдет.

Данная статья направлена на построение прогнозной и аналитической модели (далее – ПАМ) с использованием байесовских методов для прогнозирования последствий наводнений вследствие паводков [1–3].

Краткий обзор литературы

Из большого числа существующих в мире математических моделей формирования стока и динамики русло – пойменных потоков, наиболее распространенной в отечественной практике является модель ЭКОМАГ [4].

Для удобства проведения расчетов в ИВП РАН разработана компьютерная технология Информационно-моделирующего комплекса ИМК ЭКОМАГ. Комплекс включает: расчетный модуль физико-математической модели ЭКОМАГ и средства информационной и технологической поддержки работы этого модуля – тематические цифровые электронные карты, технологию автоматизированного разбиения водосборной площади на элементарные водосборы и схематизации речной сети, базы данных характеристик подстилающей поверхности, базы данных

гидрометеорологической и водохозяйственной информации, средства управления базами данных и геоинформационной обработки пространственной информации и управляющую оболочку. Имеющиеся в ИМК информационные ресурсы по объему и пространственному покрытию территории России достаточны для построения региональных гидрологических моделей и проведения расчетов для любых крупных речных бассейнов России.

В [5] в качестве математической основы моделирования чрезвычайных ситуаций природного характера, источниками которых являются наводнения, предложены методы статистической обработки данных, основанные на теореме Байеса.

Применение единого научного подхода к прогнозированию чрезвычайных ситуаций природного характера, в математическую формализацию которого положены байесовские классификаторы, основанные на принципе максимума апостериорной информации [6, 7], позволит получить надежную вероятностную оценку следующих параметров: для ПАМ «Наводнение (НВ)» – гидрологические параметры, характеризующие участки рек при НВ.

Методы

Вероятностной оценке с использованием байесовского классификатора для ПАМ-НВ подлежат гидрологические параметры, характеризующие участки рек при НВ.

При определении расчетных гидрологических характеристик рек-пунктов применяются следующие приемы расчетов [8]:

при наличии данных гидрометрических наблюдений – непосредственно по этим данным;

при недостаточности данных гидрометрических наблюдений – путем приведения их к многолетнему периоду по данным рек-аналогов с более длительными рядами наблюдений;

при отсутствии данных гидрометрических наблюдений и невозможности сопоставления с приведенными реками-аналогами – по расчетным формулам с применением карт, основанных на совокупности данных наблюдений всей сети ПМГО соответствующего района или более обширной территории.

При выборе рек-аналогов учитываются следующие условия [9]:

возможная географическая близость расположения водосборов;

сходство климатических условий;

однородность условий формирования стока, однотипность почв (грунтов) и гидрогеологических условий, по возможности близкая степень озерности, залесенности, заболоченности и закарстованности, согласно рекам-аналогам;

площади водосборов должны отличаться не более, чем в 10 раз, а их средние высоты (для горных рек) – не более, чем на 300 м;

отсутствие факторов, существенно искажающих величину естественного речного стока (регулирование стока, сбросы, изъятие на орошение и другие нужды).

Выбор рек-аналогов для расчета гидрологических параметров, характеризующих водную систему, проводится с соблюдением условий [10]:

$$L/A^{0,56} \approx L_a/A_a^{0,56}, \quad (1)$$

$$JA^{0,5} \approx J_a A_a^{0,5}, \quad (2)$$

где:

L и L_a – длина наблюдаемой реки-пункта и реки-аналога соответственно, км;

J и J_a – уклон водной поверхности наблюдаемой реки-пункта и реки-аналога, %;

A и A_a – площади водосборов исследуемой реки-пункта и реки-аналога соответственно, км².

Площадь водосбора реки-пункта может быть определена по формуле [11]:

$$A = 0,58L^{1,78}. \quad (3)$$

Средневзвешенный уклон водотока (водосбора) ($\bar{l}_B$, ‰) определяется по формуле [12]:

$$lg \bar{l}_B = \sum_{i=1}^n [(l_i/L) lg l_i], \quad (4)$$

где:

l_i – частный средний уклон отдельных участков продольного профиля водотока (реки), ‰;

l_i – длина частных участков продольного профиля реки между точками перегиба, км, определяется как совокупность длин участков реки-пункта и участков ее разветвлений до истоков, относительно осевой линии русла;

L – гидрографическая длина водотока (реки) до пункта наблюдений – гидропункта (гидропоста), расположенного после контролируемого НП, км;

n – количество участков реки-пункта и участков ее разветвления до истоков относительно осевой линии русла.

Средний уклон водосбора (i_B , ‰) представляет собой условный выровненный уклон ломаного профиля, эквивалентный сумме частных средних уклонов профиля водотока в горизонталях и определяется по формуле [13]:

$$i_B = \prod_{i=1}^n I_i^{l_i/L}. \quad (5)$$

Средняя высота водосбора ($\bar{H}_B$, м) над уровнем моря определяется по гипсографической кривой водосбора или по формуле [14]:

$$\bar{H}_B = [\sum_{i=1}^n (H_{B,i} + H_{B,i+1})(\Delta A_i)] / 2A, \quad (6)$$

где:

$H_{B,i}, H_{B,i+1}$ – высота поверхности горизонтального сечения участка водосбора (горизонталь), м;

$\Delta A_i = F_{B,i} + F_{B,i+1}$ – площадь между двумя соседними горизонталями, км²;

n – количество участков водосбора реки-пункта до НТ.

Относительную лесистость общей площади водосбора (f_L , %) определяют отношением площади, занятой лесом, к общей площади водосбора (лес и кустарники на проходных болотах в лесные угодья не включают) [15]:

$$f_L = A_L/A \quad (7)$$

где A_L – площади территории, занятые лесом, расположенные на водосборе реки-пункта, км².

Относительную заболоченность общей площади водосбора (f_6 , %) определяют отношением площади, занятой болотистой местностью, к общей площади водосбора [16]:

$$f_6 = A_6/A \quad (8)$$

где A_6 – сумма площадей всей болотистой местности, расположенной на водосборе реки-пункта, км².

Относительную озерность общей площади водосбора (f_{oz} , %) определяют отношением суммы площадей всех озер, расположенных на водосборе, к общей площади водосбора [17]:

$$f_{03} = A_{03}/A, \quad (9)$$

где A_{03} – сумма площадей всех озер, расположенных на водосборе реки-пункта, км².

Относительную закарстованность общей площади водосбора (f_k , %) определяют отношением закарстованной площади водосбора ко всей его площади [18]:

$$f_k = A_k/A, \quad (10)$$

где A_k – закарстованная площадь водосбора, км².

Средний уклон склонов водосбора (i_{ck} , %) определяется по картам (планам) в горизонталях, по формуле [19]:

$$i_{ck} = (\Delta h \sum_{i=1}^n l_i)/A, \quad (11)$$

где:

Δh – общая разность высот сечения рельефа водосбора, м;

$\sum_{i=1}^n l_i$ – сумма длин измеренных горизонталей на i -ых участках в пределах водосбора, км;

n – количество участков реки-пункта и участков ее разветвления до истоков относительно осевой линии русла.

Густота речной сети водосбора (ρ_p , км/км²) определяется как отношение суммарной длины всех водотоков реки-пункта на водосборе к общей площади водосбора [20]:

$$\rho_p = (\sum_{i=1}^n l_i)/A, \quad (12)$$

где l_i – длины водотоков (впадающих рек, каналов и т.д.) реки, км.

Густота русловой сети водосбора (ρ_0 , км/км²) определяется как отношение суммарной длины речных долин, сухих русел, оврагов, балок и логов к общей площади водосбора [21]:

$$\rho_0 = (\sum_{i=1}^n l_i^c)/A, \quad (13)$$

где l_i^c – длины речных долин, сухих русел, оврагов, балок и логов реки-пункта, км.

В случае пересечения водосбора реки-пункта несколькими изолиниями средневзвешенное значение стока вычисляют по формуле [22]:

$$h_0 = (h_1 A_1 + h_2 A_2 + \dots + h_n A_n)/A, \quad (14)$$

где:

$h_1, h_2, \dots, h_n$ – средние значения стока между соседними изолиниями, пересекающими водосбор;

$A_1, A_2, \dots, A_n$ – соответствующие площади водосбора между изолиниями карты;

A – общая площадь водосбора до расчетного створа НТ.

Уклон поверхности реки-пункта (i_p , %) определяется по формуле [23]:

$$i_p = \frac{H_{ир} - H_{ГП2}}{L}, \quad (15)$$

где $H_{ир}$, $H_{П2}$ – геодезические высоты (над уровнем моря) истока реки и уровня воды в реке на ПМГО (гидропосту), расположенном за контролируемым НП, м.

Параметры – максимальный мгновенный расход воды в реке-пункте при расчетной вероятности превышения при дождевом паводке ($Q_{P\%}$), морфологическая характеристики русла (Φ_p) и склонов водосбора ($\Phi_{ск}$) реки-пункта, а также русловое время добегания воды по главному водотоку (τ_p , ч) определяются по СП 33–101–2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик».

Приведенный математический аппарат позволяет рассчитать основные гидродинамические параметры потока реки во время паводка, вызванного обильными осадками.

Выводы и заключение

Таким образом, в статье рассмотрены прогнозно-аналитические решения по наводнениям для урбанизированных территорий, в математическую основу которых положены байесовские классификаторы.

Результатом работы явилось формализованное описание модели для прогнозирования паводков, вызванных обильными осадками, и вероятностная оценка основных гидрологических параметров, характеризующих участки рек при наводнениях.

Прогнозные и аналитические модели с использованием методов Байеса могут использоваться для широкого спектра часто проявляющихся угроз и связанных с ними кризисных ситуаций и происшествий.

Для редко проявляющихся угроз ввиду невозможности формирования необходимой статистической информации в достаточном объеме следует применять модели, разработанные на базе иных методов [24, 25].

Библиография

1. Модели и методы прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного характера на урбанизированных территориях / В. А. Акимов, Е. В. Арефьева, И. Ю. Олтян [и др.]. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2024. – 132 с. – ISBN 978-5-93970-299-7. – EDN FJTDXS.
2. Акимов, В. А. Математическое моделирование прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного характера / В. А. Акимов // Теория и практика экономики гражданской защиты на страже безопасности жизнедеятельности современного общества: Материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 26 декабря 2023 года. – Москва: Объединенная редакция, 2024. – С. 168-172. – EDN ZWBTUU.
3. Требования к порядку прогнозирования и оценки последствий наводнений / В. А. Акимов, М. В. Бедило, Е. О. Иванова [и др.] // Академия Государственной противопожарной службы МЧС России: Теория. Инновации. Практика: Материалы научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня образования Академии ГПС МЧС России. В 5-ти частях, Москва, 19 октября 2023 года. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы, 2023. – С. 3-6. – EDN FFGTNY.
4. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: ИВП РАН, 2018. – 300 с.
5. Прогнозно-аналитические решения по природным, техногенным и биолого-социальным угрозам единой системы информационно-аналитического обеспечения безопасности среды жизнедеятельности и общественного порядка "Безопасный город" / В. А. Акимов, А. В. Мишурный, О. В. Якимюк [и др.]. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2022. – 315 с. – ISBN 978-5-93970-278-2. – EDN MGXNYI.
6. E. T. Jaynes. Probability Theory: The Logic of Science, 2020. – 720 с.

7. Уилл Курт. Байесовская статистика: Star Wars, LEGO, резиновые уточки и многое другое. – СПб.: «Питер», 2021. – 304 с.
8. Акимов, В. А. Модели и методы прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного характера на урбанизированных территориях / В. А. Акимов, Е. О. Иванова, И. Ю. Олтян // Международное сотрудничество в области защиты населения и территорий: Сборник материалов XXVI Международной научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций (в рамках проведения XV Международного салона средств обеспечения безопасности "Комплексная безопасность-2024"), Кубинка, 29 мая – 01 2024 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2024. – С. 100-106. – EDN QGWVYV.
9. Акимов, В. А. Моделирование и прогнозирование чрезвычайных ситуаций природного характера / В. А. Акимов // XXI век. Техносферная безопасность. – 2024. – Т. 9, № 1(33). – С. 100-108. – DOI 10.21285/2500-1582-2024-9-1-100-108. – EDN DWWNOV.
10. Акимов, В. А. Информационные технологии прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного характера / В. А. Акимов, Е. О. Иванова // Проблемы и перспективы развития IT- и VR-технологий в области комплексной безопасности: материалы II Всероссийской научно-практической конференции, Екатеринбург, 26–27 октября 2023 года. – Екатеринбург: Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, 2023. – С. 6-10. – EDN VMWZGP.
11. Моделирование чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера / В. А. Акимов, М. В. Бедило, Ю. А. Шишков [и др.]. – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2023. – 144 с. – ISBN 978-5-93970-306-2. – EDN SWRXAH.
12. Akimov, V. Statistical models for forecasting natural emergencies / V. Akimov, M. Bedilo, O. Derendiaeva // Reliability: Theory & Applications. – 2023. – Vol. 18, No. 4(76). – P. 1067-1072. – DOI 10.24412/1932-2321-2023-476-1067-1072. – EDN GKGBFA.
13. Среднесрочный добровольный национальный обзор реализации Сендайской рамочной программы по снижению риска бедствий на 2015-2030 годы: Научно-аналитическое издание / Е. В. Арефьева, В. В. Крапухин, И. Ю. Олтян [и др.]. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России" (федеральный центр науки и высоких технологий), 2023. – 164 с. – ISBN 978-5-93970-302-4. – EDN KILEQC.
14. Акимов, В. А. Байесовские модели прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного характера / В. А. Акимов, М. В. Бедило, Е. О. Иванова // Всероссийская конференция по математике и механике: Сборник материалов конференции. Посвящается 145-летию Томского государственного университета и 75-летию механико-математического факультета, Томск, 02–05 октября 2023 года. – Томск: Общество с ограниченной ответственностью "СТТ", 2023. – С. 264-266. – EDN QAMKCO.
15. Акимов, В. А. Теоретико-вероятностные методы прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и биолого-социального характера / В. А. Акимов, М. В. Бедило, И. Ю. Олтян // Всероссийская конференция по математике и механике: Сборник материалов конференции. Посвящается 145-летию Томского государственного университета и 75-летию механико-математического факультета, Томск, 02–05 октября 2023 года. – Томск: Общество с ограниченной ответственностью "СТТ", 2023. – С. 4-6. – EDN MEWIUR.
16. Акимов, В. А. Методическое обеспечение мероприятий по защите населения и территорий от быстроразвивающихся природных процессов и явлений / В. А. Акимов, М. В. Бедило, Е. О. Иванова // Безопасность населения от быстроразвивающихся опасных природных явлений: XXV Международная научно-практическая конференция по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций по теме (в рамках проведения XIV Междуна-

родного салона средств обеспечения безопасности «Комплексная безопасность-2023»), Кубинка, 01 июня 2023 года. – Москва: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2023. – С. 68-75. – EDN FQHFYU.

17. Акимов, В. А. Классические и постнеклассические методы прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного характера / В. А. Акимов, М. В. Бедило // Гражданская оборона на страже мира и безопасности : Материалы VII Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны в Год 90-летия со дня образования Академии ГПС МЧС России. В 5-ти ч., Москва, 01 марта 2023 года. Том Часть I. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2023. – С. 20-27. – EDN YAVGTG.

18. Акимов, В. А. Научное прогнозирование чрезвычайных ситуаций природного характера / В. А. Акимов, Е. О. Иванова // Россия в XXI веке в условиях глобальных вызовов: проблемы управления рисками и обеспечения безопасности социально-экономических и социально-политических систем и природно-техногенных комплексов: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 26–27 апреля 2022 года / Российская академия наук, Международный независимый эколого-политологический университет, Государственный университет управления. Том Выпуск 1. – Москва: Государственный университет управления, 2022. – С. 114-119. – EDN FFDBHY.

19. Акимов, В. А. Весеннее половодье на территории Республики Башкортостан как источник чрезвычайных ситуаций. Применение ГИС технологий в целях предотвращения затопления / В. А. Акимов, Л. Р. Каримова, Ф. А. Кутлугузин // Физические явления и процессы в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера: сборник трудов секции № 19 XXXII Международной научно-практической конференции, Химки, 01 марта 2022 года / ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России». – Химки: Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. – С. 27-32. – EDN CVPQON.

20. Акимов, В. А. Современные методы исследования чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и биолого-социального характера / В. А. Акимов, М. В. Бедило // Гражданская оборона на страже мира и безопасности: Материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны. В 4-х частях, Москва, 01 марта 2022 года / Сост. В.С. Бутко, М.В. Алешков, С.В. Подкосов, А.Г. Заворотный [и др.]. Том Часть I. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. – С. 16-24. – EDN HSSYVB.

21. Акимов, В. А. Исследование чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и биолого-социального характера современными научными методами / В. А. Акимов, М. В. Бедило, С. П. Суцев. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2021. – 179 с. – ISBN 978-5-93970-249-2. – EDN WUKXKC.

22. Акимов, В. А. Опасные гидрологические явления и процессы как источники чрезвычайных ситуаций природного характера: вербальная модель / В. А. Акимов, М. В. Бедило, С. П. Суцев // Технологии гражданской безопасности. – 2021. – Т. 18, № 4(70). – С. 4-8. – DOI 10.54234/CST.19968493.2021.18.4.70.1.4. – EDN EVUUFU.

23. Акимов, В. А. Приложения общей теории безопасности к исследованию чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и биолого-социального характера / В. А. Акимов // Технологии гражданской безопасности. – 2021. – Т. 18, № S. – С. 13-28. – DOI 10.54234/CST.19968493.2021.18.S.2.13. – EDN LRYKFU.

24. Акимов, В. А. Защита населения и территорий Российской Федерации в условиях изменения климата / В. А. Акимов, Р. А. Дурнев, Ю. И. Соколов; МЧС России, Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных си-

туаций МЧС России. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2016. – 388 с. – EDN VVGJNR.

25. Безопасность России. Человеческий фактор в проблемах безопасности / Н. А. Махутов, Н. А. Абрамова, В. А. Акимов [и др.]; Махутов Н. А. – руководитель авторского коллектива, научный редактор тома. – Москва: МГФ "Знание", 2008. – 687 с. – (Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты). – ISBN 978-5-87633-085-7. – EDN QMGDHP.

PROBABILISTIC ASSESSMENT OF HYDROLOGICAL PARAMETERS DURING FLOODS CAUSED BY HEAVY PRECIPITATION

Akimov V.A., Ivanova E.O., Oltyan I.Yu.

All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Ministry of
Emergency Situations of Russia

Abstract

The article proposes the use of Bayesian statistics, a theory in statistics based on the Bayesian interpretation of probability, where probability reflects the degree of confidence in an event that may change as new information is collected, as opposed to a fixed value based on a frequency approach. A reliable probabilistic assessment of hydrological parameters characterizing river sections during floods has been obtained.

Keywords

Bayes method; floods; probabilistic assessment; hydrological parameters; flood forecasting; flood caused by heavy rainfall