

УДК 556.166

ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ НАВОДНЕНИЙ НА РЕКЕ ЛЕНА В ПЕРИОД ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ В РАЙОНЕ ПОДВОДНОГО ПЕРЕХОДА НЕФТЕПРОВОДА

© 2016 Г.П. Стручкова¹, В.В. Тимофеева¹, Т.А. Капитонова¹, Д.Д. Ноговицын¹,
К.И. Кусатов²

¹Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

²Якутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

Статья поступила в редакцию 09.05.2016

Представлено применение стохастического подхода при моделировании максимального уровня воды в реке для разработки математической модели прогнозирования опасности наводнения от весенних половодий на основе статистических данных, полученных за 50 лет. Предложенный методический подход позволяет получать оценки уровня воды при весенних половодьях на определенный промежуток времени и строить модели изучаемого опасного процесса (тренда, гармонической и шумовой составляющих) и авторегрессионной модели ARIMA с достаточной точностью, что показано на примере участка в районе с. Солянка. Исследование этого участка дает возможность рассмотреть один из аспектов обеспечения безопасности подводного перехода нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан.

Ключевые слова: *половодье, прогнозирование, статистическая модель, временной ряд*

Республика Саха (Якутия), обладая обширной территорией, расположенной в различных климатических зонах и развитой сетью водных объектов, подвержена широкому спектру природных чрезвычайных ситуаций (ЧС). Наиболее характерными из них являются весенне-летние половодья, вызывающие затопления обширных территорий, объектов инфраструктуры и наносят огромные ущербы народному хозяйству. Потепление климата вызывает повышение температуры речных вод, сокращение периода ледостава на реках, увеличение мощности сезонно-талого слоя и интенсивное таяние подземных льдов, залегающих в береговых отложениях, также способствует повышению возникновения риска катастрофических наводнений. Для решения задачи прогнозирования максимальных уровней воды в период весеннего половодья был выбран участок р. Лена возле с. Солянка, поскольку на этом участке находится подводный переход нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан (ВСТО). Как известно, объекты нефтегазовой инфраструктуры являются одними из самых опасных источников высоких антропогенных рисков. Последствия аварийных выбросов при разгерметизации оборудования, резервуарных парков и магистральных трубопроводов могут быть колоссальными.

Наиболее масштабными по площади сезонными гидрологическими явлениями на территории России являются весенние половодья. Ни одна страна мира не подвергается такому регулярному напору наводнений одновременно на обширных территориях в

разных регионах, что не позволяет концентрировать необходимые силы и средства в одном месте. В Республике Саха (Якутия) весенне-летние половодья вызывают затопления до 70% территории республики, объектов и инфраструктуры. Как указано в [1] за последние 20-25 лет температура воздуха в районах распространения криолитозоны повысилась на 0,2-2,5°C, а повышение температуры верхних слоев горизонта достигает 1-1,5°C, это приводит к деградации многолетней мерзлоты и отражается на динамике геоморфологических, гидрографических, теплофизических, ландшафтных и других индикаторах земной поверхности [2] и является одной из причин возникновения опасных паводковых ситуаций. Потепление климата вызывает повышение температуры речных вод, сокращение периода ледостава на реках, увеличение мощности сезонно-талого слоя, интенсивное таяние подземных льдов, залегающих в береговых отложениях, способствует повышению возникновения риска катастрофических наводнений.

Длина р. Лена – 4400 км, площадь бассейна – 2490 тыс. км², средний расход воды 16500 м³/с. Продолжительность ледостава около 7 месяцев, период половодья – вторая половина мая. Вскрытие реки сопровождается многочисленными заторами льда и наводнениями, вызывающими обширные более 70% затопления территорий и объектов инфраструктуры и наносящими огромный материальный ущерб населению и сельскому хозяйству республики.

Цель работы: прогнозирование максимальных весенних половодий на р. Лена в районе подводного перехода нефтепровода ВСТО.

На процесс заторообразования на реках Якутии влияют следующие факторы: формирование зимой толстого ледяного покрова, достигающего 150-200 сантиметров; большие скорости течения, составляющие в среднем 1,0-1,5 м/с.; извилистость русла и наличие островов. При этом заторы формируются, как правило, в одних и тех же местах и имеют протяженность до 100 и более километров, продолжительность существования заторов в среднем составляет 3-5 суток, а наиболее мощных – до 10 суток, [3, 4]. Заторные уровни воды формируются под влиянием общих для всей Лены факторов:

Стручкова Галина Прокопьевна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: g.p.struchkova@iptpn.ysn.ru

Тимофеева Варвара Васильевна, ведущий инженер. E-mail: varya.tim@mail.ru

Капитонова Тамара Афанасьевна, кандидат физико-математических наук, ученый секретарь. E-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru

Ноговицын Дмитрий Дмитриевич, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: d.nogovitsyn@iptpn.ysn.ru

Кусатов Константин Иннокентьевич, начальник отдела. E-mail: 360228@mail.ru

1) интенсивности нарастания и высоты весеннего половодья;

2) ледовых и метеорологических условий в период образования и разрушения ледяного покрова.

Выбор участка р. Лена для решения задачи прогнозирования максимальных уровней воды в период весеннего половодья объясняется тем, что возле с. Солянка находится подводный переход нефтепровода ВСТО. Трубопровод диаметром 1200 мм с подачей нефти под давлением 10 МПа уложен траншейным способом. Как известно, объекты нефтегазовой инфраструктуры являются одними из самых опасных источников высоких антропогенных рисков. На их долю приходится около 30% выбросов вредных веществ (сероводород, диоксид серы, диоксид азота, метилмеркаптан и др.) от стационарных источников. Существенный ущерб при нефтегазодобыче наносится атмосферному воздуху, почве и водным источникам. Последствия аварийных выбросов при разгерметизации оборудования, резервуарных парков и магистральных трубопроводов могут быть катастрофическими. Высокая вероятность аварий нефтепровода ВСТО на этом переходе у с. Солянка вызвана тем, что в 4 км выше подводного перехода р. Олекма впадает в р. Лену, что вызывает высокую ледовую затороопасность в данном месте и может привести к оголению трубы нефтепровода, срыву трубы из траншеи под действием гидродинамического воздействия потока воды и давления заторможенного льда. Возможен размыв ложа под нефтепроводом, в результате провисов могут возникнуть непростые деформации и напряжения в нефтепроводе [3, 4].

Методы исследования. В работе использовалась База данных наводнений прошлых лет за период с 1936 г. по 2012 г., которая содержит данные по максимальным уровням воды, срокам вскрытия рек и другим гидрологическим и метеорологическим факторам, влияющим на процесс прохождения весеннего половодья. База проиндексирована по времени и месту гидрологического события, служит для анализа весенних половодий и прогнозирования рисков наводнений.

Большой вклад в разработку методов, основанных на вероятностной теории описания речного стока как стохастического процесса внесли С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель, В.А. Румянцев, Н.И. Коронкевич, Н.А. Картвелишвили, В.А. Лобанов и другие. В работах [5-9] при построении моделей учитывались и использовались результаты исследований стохастических свойств многолетних изменений основных составляющих водного баланса водоемов и водосборов, рассматривались, анализировались и классифицировались экстремальные гидрологические ситуации на территории России и других стран, была выявлена роль природных и антропогенных факторов в их формировании, рассматривались возможности прогноза и ослабления ожидаемых негативных последствий.

Задача прогнозирования состоит в том, чтобы по наблюдениям $y_1, y_2, \dots, y_t$ получить $y_{t+1}, y_{t+2}, \dots$, где t – время. Здесь используется предположением о том, что закономерности, присущие явлению в прошлом, сохранятся и в будущем. Такое предположение является верным при построении краткосрочных либо оперативных прогнозов. Статистический подход к изучению временных рядов состоит в том, что в развитии процесса можно выделить составляющие части:

$$Y(t) = f(t) + u(t) + e(t),$$

где $f(t)$ – функция тренда (тенденция развития), $u(t)$ – циклическая компонента, $e(t)$ – остаточная компонента.

При предварительном анализе данных происходит выявление наличия тренда, сглаживание временных рядов. Подборка коэффициентов и выбор моделей тренда осуществляется на основании метода наименьших квадратов. После удаления тренда необходимо провести анализ временного ряда на стационарность. Чтобы оценить связь между последовательными значениями одного и того же ряда может быть использован коэффициент автокорреляции. Очевидно, что в предположении о случайном характере колебаний наблюдений в исследуемом ряду связи между их уровнями быть не должно.

В настоящее время разработано достаточно большое количество методов прогнозирования опасности наводнений от весенних паводков. Для построения статистической модели использовалась методика контроля оценки опасности наводнения [10], в основе которой лежит обработка данных с помощью нелинейной многопараметрической регрессии

$$H = b + c \sum_{j=1}^M \sin(\phi_j + \omega_j x)$$

где H – выход, x – вход, b, c, ϕ, ω – подстраиваемые параметры; M – количество гармоник аппроксимирующей функции.

Численные данные, характеризующие объект исследования (наводнения), оформляются в виде таблицы в Excel. Для получения желаемого результата исходные данные подвергались преобразованию. Предварительное преобразование исследуемых данных наблюдений для регрессионного моделирования осуществлялось по формуле:

$$F(H) = \ln \left(\frac{\pi(H - a)}{b} \right)$$

где H – уровни воды при наводнениях за период наблюдений, $a = b/2$, $b = H_{\max} \cdot k$, $H_{\max}$ – максимальный уровень воды в выборке (регистрация уровня в пункте наблюдения), k – коэффициент, зависящий от режимов и характера речного стока, находится итеративной минимизацией ошибки.

В качестве примера для регрессионного моделирования данных о наводнениях были взяты наблюдения максимального уровня воды на р. Лена в районе с. Солянка за период с 1936 г. по 2012 г. На 72 точках строится модель, на 4 точках – ретро-прогноз. Для построения моделей использовались данные Якутского управления гидрометслужбы.

Первый этап моделирования данных – построение регрессионной модели. После синтеза модели результаты прогноза получаем в виде значения функции логарифма. Уровни воды получаем обратным преобразованием. Точность прогноза определяется путем сопоставления исходных данных с результатами прогноза. Результаты регрессионного моделирования данных представлены в виде разложения временного ряда на три составляющие: тренд, гармоническую и случайную составляющие. По преобразованным исходным данным построена модель №1 – тренд т.е. общая тенденция развития процесса. Для построения модели №2 (гармоническая составляющая) берется разность между исходными данными и трендом. Модель гармонической составляющей построена в системе

STATISTICA. Данные для модели №3 (случайная составляющая) – это разность между исходными данными, по которым была построена модель №2 и прогнозом по модели №2.

Анализ адекватности и надежности построенных моделей. Очень важным элементом анализа временных рядов является исследование остатков, полученных после процедуры удаления тренда и циклической составляющей. Значение этого этапа определяется тем, что он позволяет оценить адекватность выбранной модели процесса исходным наблюдениям. Для проверки модели воспользуемся визуальными методами, представленными в системе STATISTICA.

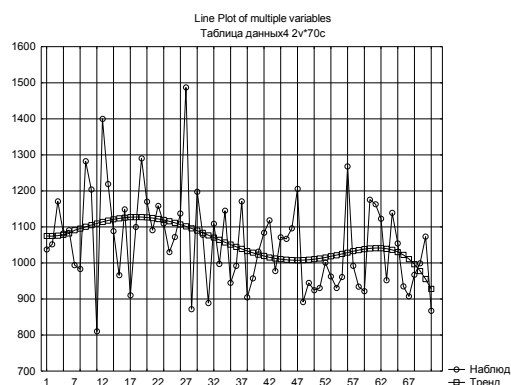


Рис. 1а. Модель тренда

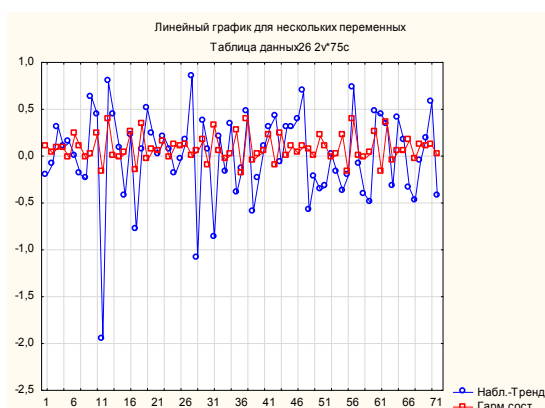


Рис. 1б. Модель гармонической составляющей

Полученные результаты. На рис. 1 представлены результаты 3 моделей соответствующие вышеперечисленным составляющим: тренду, гармонической составляющей и случайной составляющей. По

преобразованным исходным данным построена модель №1 – тренд т.е. общая тенденция развития процесса. Вид тренда – полиномиальный. Для построения модели №2 (гармоническая составляющая) берется разность между исходными данными и трендом. Данные для модели №3 (случайная составляющая) – это разность между исходными данными, по которым была построена модель №2 и прогнозом по модели №2. Модель №3 – это модель шума.

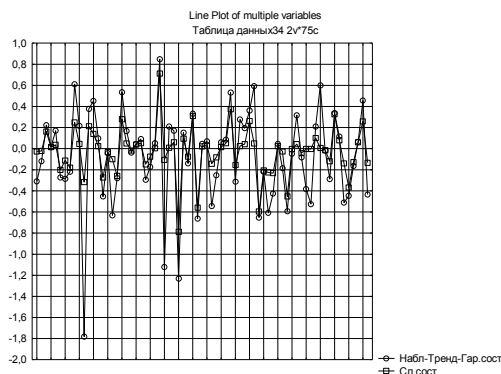


Рис. 1в. Модель случайной составляющей

Критерий применимости и качества методики берется в виде отношения средней квадратичной погрешности проверочных прогнозов к квадратичному отклонению предсказываемой величины. Оправдываемость гидрологических прогнозов устанавливается сопоставлением ошибок прогноза с допустимой погрешностью. Прогноз считается оправдавшимся, если его ошибка меньше или равна допустимой погрешности. Допустимая погрешность 75 см, критерий применимости методики 0,5, коэффициент корреляции 0,8, т.е. данная методика относится к категории хороших. Остатки распределены нормально, то есть построенная модель значима и пригодна для проведения дальнейшего анализа.

Как видно из табл. 1, в целом ошибки прогноза с заблаговременностью 1 год показали достаточную адекватность выбранной статистической модели. Адекватность применяемой модели определяется путем анализа остатков (ошибок прогноза), представляющих собой разности между прогнозными и фактическими значениями. В системе STATISTICA имеются специализированные средства анализа остатков, в частности, оценка и графическое изображение их автокорреляционной и частной автокорреляционной функций.

Таблица 1. Сравнительная характеристика результатов ретро-прогнозов уровня воды в р. Лена в районе с. Солянка, полученных с помощью первой модели

Параметр	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.
уровень воды, см				
прогноз	969	1171	1306	1067
наблюдения	1021	1236	1385	1135
ошибка				
абсолютная, см	52	65	79	68
относительная, %	5	5	6	6

Для построения второй модели используем метод прогнозирования временных рядов с использованием авторегрессионной модели ARIMA. Объединённая модель авторегрессии и интегрированного скользящего среднего (ARIMA) была предложена Боксом и Дженкинсом в 1976 г. Аббревиатура ARIMA, образованная от слова autoregression (AR) и английского названия moving average (MA) для скользящего

среднего, стандартно используются в литературе и статистических пакетах. Методология построения ARIMA-модели для исследуемого временного ряда включает следующие основные этапы: идентификацию пробной модели; оценивание параметров модели и диагностическую проверку адекватности модели; использование модели для прогнозирования.

Таблица 2. Сравнительная характеристика результатов ретро-прогнозов уровня воды в р. Лена в районе с. Солянка, полученных с помощью ARIMA-модели

Параметр	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.
уровень воды, см				
прогноз	1040	1152	1311	1079
наблюдения	1021	1236	1385	1135
ошибка				
абсолютная, см	19	84	74	56
относительная, %	2	6	5	4

Пример прогноза максимального уровня воды на р. Лена в районе с. Солянка. Данные для модели №3 (случайная составляющая) – это разность между исходными данными, по которым была построена модель №2 и прогнозом по модели №2. Модель №3 – это модель шума.

Методика может быть рекомендована к использованию, если она проверяется на независимом материале и удовлетворяет условиям точности и качества. Остатки нормально распределены, не коррелированы, построенные модели удовлетворительно отражают реальный уровень воды, ошибки прогноза (1-6)% показывают достаточную адекватность выбранных статистических моделей.

Выводы: предложенный метод позволит получить оценку превышения уровня весеннего половодья в течение промежутка прогнозирования при наличии базы данных по уровням воды за предыдущие годы. Моделирование наводнения с помощью полученных моделей может дать максимальные уровни при наводнении, также при строительстве важных объектов позволяет определить сообразность расположения и безопасность этих объектов и правильно оценить обстановку для планирования мероприятий по защите от половодья и проведению превентивных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кропачев, Д.Ю. Способы мониторинга температуры в вечномёрзлых грунтах / Д.Ю. Кропачев, И.И. Гаврилов // Наука и техника в Якутии. 1914. № 2. С. 19-23.
2. Корниенко, С.Г. Аэрокосмические методы контроля состояния природной среды при разработке и эксплуатации нефтегазовых месторождений криолитозоны / С.Г. Корниенко, К.И. Якубсон // Фундаментальные проблемы разработки месторождений нефти и газа: сб. ст. Всеросс. конф. (Москва, 15-18 нояб. 2011 г.). – М., ИПНГ РАН, 2000. С. 125-128.
3. Стручкова, Г.П. Порядок анализа риск-факторов аварий сложных технических систем, работающих в условиях низких температур / Г.П. Стручкова, Т.А. Капитонова, А.И. Левин // Journal of International Scientific Publication. Ecology & Safety. 2011. Vol. 5. Part 3. P. 25-33.
4. Struchkova, G.P. Flood Prediction on the Lena River / G.P. Struchkova, T.A. Kapitonova, L.E. Tarskaya, V.M. Efimov // Journal of International Scientific Publication. Ecology & Safety. 2011. Vol. 5. Part 3. P. 16-24.
5. Карпелелишвили, Н.А. Стохастическая гидрология. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. 200 с.
6. Крицкий, С.Н. Гидрологические основы управления речным стоком / С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель. – М.: Наука, 1981, 255 с.
7. Румянцев, В.А. Пространственно-временные закономерности колебаний стока Евразии / В.А. Румянцев, И.В. Бобыкин. – Л.: Наука, 1985. 148 с.
8. Коронкевич, Н.И. Экстремальные гидрологические ситуации / Н.И. Коронкевич, Е.А. Барабанова, И.С. Зайцева. – М., Медиа-ИРЕСС, 2010. 464 с.
9. Лобанов, В.А. Региональные модели определения характеристик максимального стока в зависимости от гидрографических факторов / В.А. Лобанов, В.Н. Никитин // Метеорология и гидрология. 2006. № 11. С. 60-69.
10. Симонов, К.В. Статистические модели опасности наводнений / К.В. Симонов, В.В. Москвичев // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2008. №4. С. 11-19.

ASSESSMENT OF HAZARD FLOODING ON THE LENA RIVER DURING THE SPRING HIGH WATER IN REGION OF PIPELINE UNDERWATER CROSSING

© 2016 G.P. Struchkova¹, V.V. Timofeeva¹, T.A. Kapitonova¹, D.D. Nogovitsyn¹, K.N. Kusatov²

¹Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

²Yakutsk Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring

The research presents an application of stochastic approach in modeling the maximum flow level of the river. This approach is used to develop a mathematical model to predict the spring flood hazard based on the statistical data collected for over 50 years. The proposed methodological approach allows to obtain estimation of flow level during the spring flood for a certain period of time, and to construct a hazard process model (trend, harmonic and noise terms) and the autoregressive scheme ARIMA with the adequate accuracy, which can be seen as an example of the plot near Solyanka village area. The research of this area allows to analyses one of the safety aspects of the underwater crossing of Eastern Siberia – Pacific ocean oil pipeline.

Key words: flood, forecasting, statistical models, time series

Galina Struchkova, Candidate of Technical Sciences, Leading Research Fellow. E-mail: g.p.struchkova@iptpn.ysn.ru; Varvara Timofeeva, Leading Engineer. E-mail: varya.tim@mail.ru; Tamara Kapitonova, Candidate of Physics and Mathematics, Scientific Secretary. E-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru; Dmitriy Nogovitsyn, Candidate of Geography, Leading Research Fellow. E-mail: d.nogovitsyn@iptpn.ysn.ru; Konstantin Kusatov, Head of the Department. E-mail: 360228@mail.ru