

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.383/388:504(571.1)

ОЦЕНКА РИСКОВ ПОДТОПЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ ПОДЗЕМНЫМИ ВОДАМИ ПРИ НАВОДНЕНИЯХ

© 2011 г. А. П. Белоусова

Институт водных проблем Российской академии наук

119333 Москва, ул. Губкина, 3

Поступила в редакцию 30.09.2008 г.

Рассмотрены подходы к оценке рисков подтопления территорий подземными водами при экстремальных наводнениях с использованием вероятностных и детерминированных методов, последние базируются на индикаторах устойчивости подземных вод к негативному воздействию.

Ключевые слова: подземные воды, наводнения, риски подтопления, индикаторы устойчивости.

В настоящее время в связи с усилением негативной роли наводнений, увеличением количества аномальных паводковых явлений актуальна оценка риска подтопления территорий подземными водами в процессе наводнений на водных объектах, гидравлически с ними связанных. Поэтому основная задача — оценка рисков подтопления территорий подземными водами при их подпоре от наводнений.

Под наводнениями понимают затопление водой прилегающей к реке или озеру местности, которое причиняет материальный ущерб, наносит урон здоровью населения или приводит к гибели людей [11].

Для каждого населенного пункта, расположенного вблизи водного объекта, устанавливаются некоторые критические значения уровня, так называемые опасные и особо опасные отметки. Опасная отметка — значение уровня воды, при превышении которого начинается затопление поймы, сельскохозяйственных угодий. Особо опасная отметка — значение уровня воды, при превышении которого начинается затопление прибрежных населенных пунктов, хозяйственных объектов, дорог, линий связи и электропередач и так далее.

Половодье — ежегодно повторяющийся в один и тот же сезон значительный и довольно продолжительный подъем уровня воды в реке (вызывается таянием снега на равнинах и дождевыми осадками в весенний период). Паводок — это интенсивный, сравнительно кратковременный подъем уровня воды, вызванный дождями и ливнями, иногда таянием снега при зимних оттепелях.

Площадь территорий, подверженных наводнениям, в мире превышает в настоящее время 3 млн. км², на них проживает 1 млрд. человек. В 2002 г. в результате наводнений пострадало 17 млн. жителей более 80 стран. В России площадь паводкоопасных территорий составляет 400 тыс. км², ежегодно подвергается затоплению ~50 тыс. км². На-

воднениям с катастрофическими последствиями подвержена территория в 150 тыс. км², где расположены 300 городов, десятки тысяч населенных пунктов, большое количество хозяйственных объектов, >7 млн. га сельхозугодий. Среднегодовое количество ущерба от наводнений оценивается в 41.6 млрд. руб. в год (в ценах 2001 г.) [11].

Наводнения делятся на следующие типы [11]:

небольшие наводнения — повторяются 1 раз в 5–8 лет, затопляется 12–25% поймы слоем воды 0.6–1.15 м, продолжительность 10–20 сут, ширина разлива от сотен метров до 1–3 км;

большие наводнения — повторяемость 1 раз в 10–25 лет, затопляется 40–70% поймы слоем воды 1.5–2.5 м, продолжительность от 20–40 сут до 2–3 мес;

выдающиеся наводнения — 1 раз в 50–100 лет, 75–90% затопления поймы, слой воды 3–5 м, продолжительность >3 мес;

катастрофические наводнения — повторяются реже, чем 1 раз в 100 лет, полное затопление поймы, продолжительность до 180–240 сут, слой воды от 3–5 до 8–10 м.

В [14] дана классификация наводнений по продолжительности и ущербу.

кратковременные наводнения (паводок) — продолжительностью 1–3 сут, за счет интенсивных ливней, схождения селей, нагонов морских волн, цунами;

непродолжительные — до 14 сут, за счет затяжных дождей, таяния снега, заторов льдов;

продолжительные — 1–3 мес — сильные и катастрофические наводнения дождевого и снегового происхождения.

Продолжительность половодья на малых равнинных реках составляет 15–20 сут, на крупных — 2–3 мес. Зимние паводки обусловлены оттепелями.

Таблица 1. Классификация наводнений по социально-экономическому ущербу [14] (1-й класс – небольшие наводнения, 2-й – средние, 3-й – большие, 4-й – катастрофические, 5-й – исторические)

Класс	Количество жертв, человек	Число временно эвакуированных, тыс. человек	Ущерб, млн. долл.	Площадь затопления, тыс. га
1	0	<1	<1	<10
2	1–10	1–10	1–10	10–1000
3	11–100	11–50	11–100	1001–10000
4	1001–2000	51–1000	1001–1000	10001–50000
5	>2000	>1000	>10000	>50000

При зажорах льда уровень повышается на величину 0.5–1.0 м до 5–7 м. Продолжительность зажорных паводков – 1.5–2 мес на Европейской и Азиатской частях России.

Наводнения в России за 1998–2002 гг. произошли за счет таяния снега и льда (47% случаев), за счет дождей (36%), заторов льда (15%); нагонов воды (2%).

Ущерб от наводнений: эвакуация населения, гибель людей, нарушение инфраструктуры, повреждение транспортных сетей, энергетических систем, трубопроводов, жилья и других сооружений, связи, нарушение работы медицинских, торговых, образовательных, административных учреждений, моральные потери: стрессы, заболевания, снижение трудоспособности и другое (табл. 1).

Таким образом, наводнения различной интенсивности приводят к затоплению земель, расположенных на них инженерных сооружений и сельскохозяйственных угодий, кроме этого, в процессе наводнений при подъеме уровня воды в реках происходит подъем уровня грунтовых вод, гидравлически связанных с этими водными объектами, при этом происходит и подтопление территорий поднявшимися подземными водами.

В работе [20] сформулировано понятие подтопления от водохранилищ: “Под подтоплением понимаем такое повышение уровня грунтовых вод и приближение его к земной поверхности, которое приводит к изменению почвенно-растительного покрова”. Здесь же отмечается, что зону подтопления от водохранилища нельзя отождествлять с зоной повышения уровня грунтовых вод или с зоной подпора, размеры которой намного больше.

В связи с этим, зона подпора или подтопления территорий грунтовыми водами при наводнениях является результатом неблагоприятных экологических последствий от влияния этого природного явления и, в свою очередь, представляет собой зону опасности для инженерных сооружений, сельскохозяйственных земель и других объектов, расположенных в ее пределах. При подтоплении территорий грунтовыми водами при экстремальных наводнениях наносится ущерб сельскохозяйственным землям из-за изменения режима влаги почв, лесам и

лесным насаждениям, инженерным сооружениям, происходит нарушение прочностных свойств грунтов, активизация оползневых процессов и так далее. Причем, эти процессы проявляются в течение более длительного времени, чем сами наводнения, из-за эффекта запаздывания процессов инфильтрации через зону аэрации и снижения уровня грунтовых вод после спада уровня воды в реках и прекращения влияния избыточной инфильтрации (таяния снега, увеличения поверхностного стока).

ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РИСКОВ

Подтопление территорий при подъеме уровня грунтовых вод может произойти при утечках из канализационных сетей городских и сельских поселений, при мелиоративном освоении сельскохозяйственных земель, при сооружении транспортных магистралей, как уже указывалось, при наводнениях и других техногенных и природных событиях. Поэтому оценка риска подтопления территорий подземными водами актуальна в связи со значительным ущербом при реализации этих негативных явлений. Задача данной статьи – оценка риска подтопления территорий грунтовыми водами при наводнениях, учитывая то, что методы оценки рисков в этой ситуации наименее разработаны.

Понятие риска обычно связывают с возможностью наступления сравнительно редких явлений. При этом риск часто отождествляется с вероятностью наступления этих событий за определенный интервал времени. Вероятность в данном случае выступает как мера (показатель), удобная для сравнения рисков для одного объекта от различных событий или для различных объектов в типовых для них условиях [26]. Далее рассмотрим некоторые подходы к оценке и прогнозированию непосредственно наводнений как причины подтопления территорий грунтовыми водами.

По данным МЧС России [11] в 1991–1999 гг. количество наводнений в России менялось от 10 до 32 в год, катастрофические наводнения происходили относительно редко, к ним относятся наводнения в Санкт-Петербурге (1824, 1924 гг.), Якутии (1908, 1998 гг.), Верхней и Средней Волге (1908 г.) и на Северном Кавказе (1845, 1877, 1980 гг.). В XXI в.

картина резко изменилась, в течение двух лет (2001–2002) на территории России произошло три катастрофических наводнения, повторяемость которых предсказывалась не чаще одного события в 100 лет [2].

Оценка риска реализации аномальных наводнений (или максимального поверхностного стока) представляет собой сложную математическую процедуру, прогнозирование таких наводнений имеет невысокий уровень оправдываемости из-за неоднозначности и недостаточности гидрологических, метеорологических и других параметров, а повторяемость их в последнее десятилетие резко отличается от ранее прогнозируемой [2].

В работе [17] используются физико-математические модели (детерминированный метод), позволяющие установить максимальные расходы талых дождевых вод. В работе [18] приводится динамико-стохастическая модель формирования талого и дождевого стока при максимальных расходах и повторяемости 1 раз в 200 лет. Здесь совместно применяются физико-математические модели формирования талого стока и стохастические модели метеорологического воздействия на водосбор. Отмечается ограниченность применения динамико-стохастических моделей из-за стохастических моделей метеорологических воздействий. В [15, 25] используются стохастические дифференциальные уравнения для описания вероятности катастрофических наводнений. В [22] показана важность определения распределения вероятностей максимальных расходов воды и трудности при решении этой задачи (это указывает на сложности прогнозирования экстремальных наводнений стохастическими методами).

Таким образом, вероятностные оценки реализации негативных процессов в гидрологии представляют собой сложные математические процедуры. В приведенном выше анализе эти процедуры упрощаются за счет использования вероятностно-детерминированных подходов (например, для пространственной оценки используются способы географического районирования территории [22] и численного моделирования [17, 18]), а решения вероятностных задач приводятся в простой одномерной постановке.

Рассмотрим наиболее разработанные методы оценки рисков подтопления территорий от негативных процессов.

Оценке рисков подтопления территорий подземными водами посвящены исследования многих авторов и организаций [6, 7, 19, 21, 24]. Риски подтопления в этих исследованиях оцениваются, как правило, для городских территорий в случаях утечек из коммунальных сетей.

Проблема подтопления городских территорий грунтовыми водами и оценки рисков вероятностными методами наиболее детально представлена в [13], и подход ее решения заключается в следующем.

Субъект деятельности (Ua) получает некоторое опасное воздействие с вероятностью $P(Im)$, определяющееся вероятностью ее поведения $P(R/Im)$. В результате на выходе получаем некоторое состояние системы S_b , отличное от начального S_n , разница между состояниями системы характеризует возможный риск

$$R(Ua) = S_n - S_b = \Delta S. \quad (1)$$

В уравнении (1) вместо R можно использовать понятие ущерба, т.е. функцию потерь $L = f(R)$.

Оценка риска в терминах вероятности записывается в виде

$$P(R) = \sum_{i=1}^n P(R/Im)P(Im), \quad (2)$$

а в терминах показателей состояния системы

$$R(Ua) = \sum_{i=1}^m P(R/Im)P(Im)\Delta S.$$

В тех случаях, когда величины индексов Im условно принимаются как детерминированные или квазидетерминированные события, условно принимается $P(Im) = 1$ и $P(Im) = 0.5$. В общем случае $P(Im)$ определяется случайным характером воздействия.

Для техноприродного процесса, например подтопления, для которого $Im = h$ (уровень грунтовых вод), вероятность проявления события возможна при условии, что на входе системы будет инфильтрация утечек w из коммуникаций с вероятностью $P(w)$, т.е. в данном случае в соответствии с (2) имеем

$$P(h) = \sum_{i=1}^n P(h/w_i)P(w_i).$$

В [19] оценка риска подтопления осуществляется детерминированным способом с использованием коэффициента риска, который определяется по формуле

$$R_n = \frac{\sum_{i=1}^k v_{yi}\lambda_{0i}S_i}{S_0},$$

где S_0 – площадь территории, для которой определяется коэффициент риска подтопления R_n , $S_0 = \sum_{i=0}^k S_i$, k – число разбиений площади S_0 на непересекающиеся между собой площади S_i , для которых оценены и известны коэффициенты опасности подтопления λ_{0i} и уязвимости подтоплению v_{yi} .

Для оценки степени опасности и риска техногенных процессов важны не только частота (или вероятность) ее появления, но и тяжесть последствий для индивидуума, общества или окружающей среды. Количественная оценка в данном случае прово-

дится через понятие риска (R), определяемого как произведение вероятности P неблагоприятного события (аварии, катастрофы и так далее) и ожидаемого ущерба $У$ в результате этого события [3]

$$R = PY.$$

В работе [23] предлагается рассчитывать годовой риск $R(t)$ как сумму (суммарный риск) всех последствий неблагоприятного события

$$R(t) = УМ(t) + Уч(t),$$

где $УМ(t)$ – суммарный ежегодный имущественный ущерб, руб/год, от реализации опасного процесса (неблагоприятного события природного и техногенного характера); $Уч(t)$ – суммарный ежегодный ущерб, руб/год, обусловленный потерей здоровья вследствие реализации опасного процесса (неблагоприятного события природного и техногенного характера); t – время, лет.

Отсюда

$$УМ(t) = \sum_{i=1, j=1}^{n, m} M_{ij}(t) Y_{ij}(t),$$

$$Уч(t) = \sum_{i=1, j=1}^{n, m} R_{ij}(t) X_{ij}(t),$$

где $M_{ij}(t)$ – вероятность (частота) возникновения j -го имущественного ущерба от i -го поражающего фактора, 1/год; $Y_{ij}(t)$ – величина j -го имущественного ущерба от i -го поражающего фактора, руб; $R_{ij}(t)$ – вероятность (частота) возникновения j -го типа поражения человека от i -го поражающего фактора, 1/год; $X_{ij}(t)$ – величина потерь, обусловленных j -м типом поражения человека от i -го поражающего фактора, руб.

В практике гидрогеологических и инженерно-геологических исследований широко используются вероятностные методы оценки рисков негативных явлений, но при этом применяются некоторые допущения, позволяющие упростить процедуру оценки вероятности реализации опасных процессов, либо используются детерминированные методы оценки рисков. При инженерно-геологических исследованиях [21] расчет риска производится на основе оценки опасности и уязвимости объектов. При гидрогеологических исследованиях за рубежом риск определяется произведением уязвимости подземных вод к воздействию на ущерб им от этого воздействия [28].

Инженерно-геологические риски можно рассмотреть на примере расчета физического и экономического рисков потерь от перманентных опасностей для конкретной модели развития берега исходя из средних скоростей отступления берега, м/год,

причем, вероятность реализации этих скоростей заранее принимается равной 1 [9]

$$\begin{aligned} R_j(A) &= V_n P(V_n) P(L) L_r, \\ R_{sj}(A) &= R_j(A) / S, \end{aligned} \quad (3)$$

где V_n – линейная скорость развития процесса, м/год, $P(V_n)$ – вероятность реализации этой скорости, $P(L) = V_m(A) = L_n / L_r$ – геометрическая вероятность линейного поражения (уязвимость) территории при протяжении границы развития процесса L_n и общей ее протяженности L_r , S – площадь оцениваемой прибрежной территории, м², га, км².

Формула (3) характеризует физический (вещественный) риск удельных потерь с единицы площади в пределах всей оцениваемой прибрежной территории за единицу времени, что условно выражается через размерности га/га в год; м²/км² в год и так далее.

В работе [16] риск возникновения цунами определяется как вероятностная мера потерь, установленная для участка береговой зоны за определенное время

$$R = P(H)P(F/H),$$

где $P(H)$ – вероятность опасности, $P(F/H)$ – вероятность потерь (уязвимости) участка береговой зоны при реализации опасности. Риск может оцениваться как осредненный среднескользящий ущерб Y .

$$Y(H) = P(H)v(H)V(H)D,$$

где $v(H)$ – интенсивность опасности для участка береговой зоны (уязвимость участка), $V(H)$ – степень уязвимости (вероятность разрушения объектов), D – балансовая стоимость объектов на участке береговой зоны.

Приведенные способы оценки рисков проявления негативных процессов в гидрогеологических и инженерно-геологических задачах, имея изначально вероятностную основу, в конечном варианте расчетов приобретают детерминированный характер, но он может быть квазидетерминированный (квазивероятностный).

В работах [5–8] рассматривается вероятностно-детерминистический подход, позволяющий прогнозировать положение уровня грунтовых вод в любой момент времени при заданной обеспеченности (в данном случае и при наводнениях). Авторы используют аналитические решения уравнения фильтрации Буссинеска как линейного оператора для реализации различных стохастических схем и использования метода нестационарных случайных процессов. В работах подчеркивается, что детерминированные решения задач подтопления – лишь частные случаи и должны быть уточнены путем учета случайных флуктуаций.

В практике инженерно-геологических исследований широко применяются упрощенные способы оценки рисков, когда вероятность реализации нега-

Таблица 2. Классификация наводнений по гидрогеолого-геоморфологическому принципу

Объект подтопления	Тип наводнения
Низкая пойма	Нормальное наводнение (среднегодовое половодье)
Высокая пойма	Критическое
Первая (низкая) надпойменная терраса	Катастрофическое
Вторая (высокая) надпойменная терраса	Чрезвычайно катастрофическое

тивного процесса заведомо задается или вычисляется через параметр уязвимости инженерного объекта к негативному воздействию, а также используется в виде повторности явлений за определенное время.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Решение задачи подтопления территорий грунтовыми водами проводится в следующей последовательности:

с учетом данных гидрологического мониторинга устанавливается повторность экстремальных наводнений;

задается положение уровня воды в реке в момент экстремальных наводнений конкретной величиной, или рассматривается несколько сценариев развития наводнений для ряда сечений реки, в которых наблюдались экстремальные подъемы уровней воды;

рассчитывается ширина зоны влияния подпора на грунтовые воды при экстремальном уровне воды в реке по нескольким створам в заданном сечении реки (или нескольких сечениях);

используются данные государственной гидрогеологической съемки масштаба 1 : 200000 (геологическое строение, литологический состав пород, летнее меженное положение уровня грунтовых вод и другое), для некоторых территорий имеются данные и более крупных специальных и других съемок, позволяющие повысить точность информации, используются также данные мониторинга (различно назначения и масштаба) за подземными водами;

определяется площадь подтопления территории грунтовыми водами, для которой может быть рассчитан максимальный возможный ущерб;

в пределах выделенной территории устанавливаются площади, на которых уровень грунтовых вод залегает выше критической глубины (эти глубины могут быть разными для инженерных сооружений, для сельскохозяйственных земель), и определяется их долевое соотношение с общей площадью подтопления, оконтуренной величиной зоны влияния, своего рода коэффициент минимизации ущерба от подтопления;

определяется риск от подтопления территории грунтовыми водами.

Специфическая особенность подтопления подземными (грунтовыми) водами в результате наводнений – то, что площади подтопленных ими территорий гораздо больше площадей, затопленных поверхностными паводковыми водами.

В связи с этим, возникает необходимость ввести классификацию наводнений с учетом гидрогеологических особенностей подтапливаемых территорий. При наводнениях подпор грунтовых вод распространяется в пределах нескольких водоносных горизонтов. Наиболее удобно при классификации использовать геоморфологические особенности рельефа изучаемых районов, так как водоносные горизонты, как правило, приурочены к определенным выше названным геоморфологическим структурам (табл. 2).

К первому типу наводнений относятся наводнения, при которых уровень воды в водоемах (реках) не превышает критических для него значений, а площадь подтопления не выходит за пределы высокой поймы. Второй тип наводнений характеризуется превышением критического уровня воды в реках в паводок, когда подтопление может выйти за пределы высокой поймы; в случае, когда подтопление достигает низких надпойменных террас – наводнение классифицируется как катастрофическое, а при условии выхода за их пределы – как чрезвычайно катастрофическое.

ОЦЕНКА РИСКА ПОДТОПЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ ГРУНТОВЫМИ ВОДАМИ ОТ НАВОДНЕНИЙ

Вероятностный подход

На рисунке приведен профиль развития подпора грунтовых вод от наводнения различного масштаба от нормального до критического и чрезвычайно катастрофического.

Наибольший интерес представляют экстремальные наводнения, когда подъем уровня воды в реках превышает критический уровень, а зона влияния (подпора) достигает максимальных величин. Источниками опасности возникновения подпора от наводнений будем считать экстремальный подъем уровня воды в реке ($\Delta h = h_q - h_k$) и избыточную инфильтрацию на уровень грунтовых вод ($\Delta w = w_q - w_n$); первый член соответствует инфильтрационному питанию при чрезвычайно катастрофическом наводнении, второй – средней инфильтрации при нормальных наводнениях, м/год. При реализации этой опасности произойдет подъем уровня грунтовых вод (подпор уровня грунтовых вод на расстояние от уреза воды в реке) или границы затопления поверхности земли на расстояние $R_{\text{вл}}^k$, м (ширина зоны подтопления).

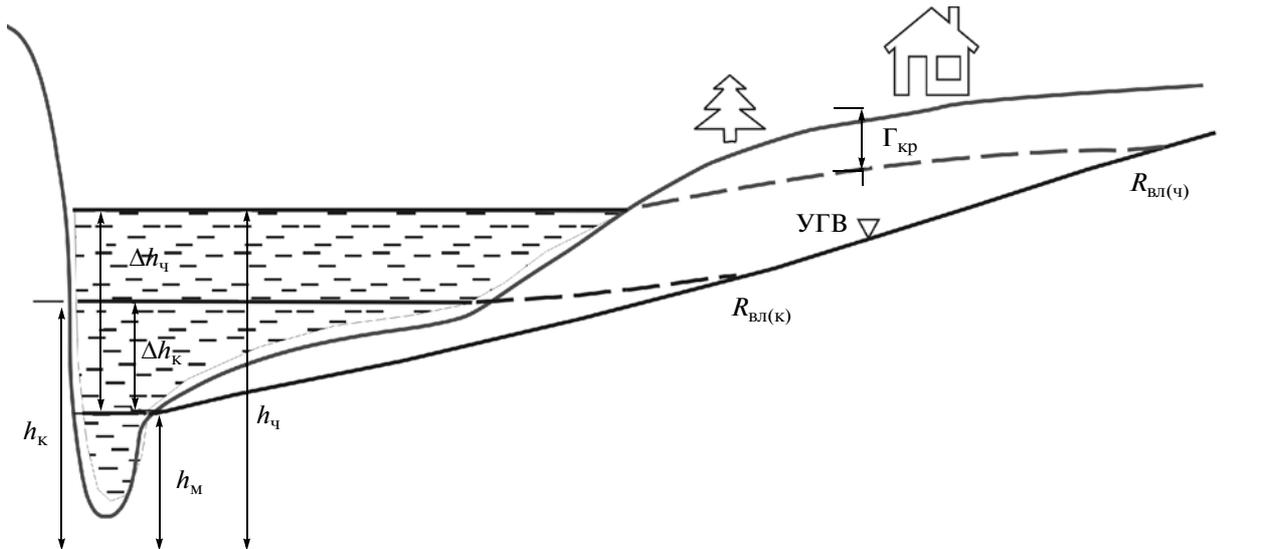


Схема формирования подпора грунтовых вод от критического h_k и чрезвычайно критического h_q наводнений. $\Gamma_{кр}$ – критическая глубина, выше которой грунтовые воды будут наносить ущерб различным объектам окружающей среды, h_m – меженный уровень реки; $R_{вл(к)}$ и $R_{вл(ч)}$ – ширина зоны влияния соответственно катастрофического и чрезвычайно катастрофического наводнений, УГВ – уровень грунтовых вод.

Тогда линейный физический риск подтопления $R_{(п)}$ можно записать следующим образом [9, 13, 24]

$$R_{(п)} = (\Delta h P(\Delta h) + \Delta w P(\Delta w)) P(R_{вл}^k) R_{вл}^k, \quad (4)$$

где $P(\Delta h)$ – вероятность реализации экстремально-го уровня воды в реке, $P(\Delta w)$ – вероятность реализации избыточной инфильтрации, $P(R_{вл}^k)$ – вероятность развития процесса подтопления территории грунтовыми водами, отражающая защищенность данной территории от подтопления. Не вся территория в пределах зоны влияния будет подтопленной, а только те участки, где уровень грунтовых вод поднимется выше критических глубин, обеспечивающих защищенность объектов хозяйства и социальной сферы от высоко стоящих грунтовых вод; в этом случае $P(R_{вл}^k)$ можно заменить соотношением длин участков подтопления $l_{п}$ и критической ширины зоны влияния $l_{п}/R_{вл}^k$.

Следуя выше приведенным примерам, примем вероятность реализации экстремального уровня воды в реке $P(\Delta h)$ и вероятность реализации повышенной инфильтрации $P(\Delta w)$ равными 1 (так как прогнозировать вероятность экстремальных наводнений и атмосферных осадков очень сложно, как было показано, а повторность экстремальных наводнений в начале нового столетия и в прошлые годы различны).

Линейный риск (4) имеет только демонстративный характер, для реальных оценок необходимо рассчитать площадной физический риск подтопле-

ния от наводнения на всей площади подпора грунтовых вод

$$R_{S(п)} = (\Delta h P(\Delta h) + \Delta w P(\Delta w)) P(S_{пд}^k) S_{пд}^k, \quad (5)$$

где $S_{пд}^k$ – площадь подпора грунтовых вод при зоне влияния $R_{вл}^k$; $P(S_{пд}^k) = S_{п}/S_{пд}^k$, $S_{п}$ – площадь подтопленных территорий, где уровень поднявшихся грунтовых вод установился выше критической глубины.

При $P(\Delta h)$ и $P(\Delta w)$, равных 1, сумма Δh и Δw в уравнении (5) имеет размерность м/год (что соответствует скорости подъема уровня грунтовых вод) и определяется интенсивностью подъема уровня воды в реке и приращением уровня грунтовых вод за счет избыточной инфильтрации. Физический смысл искомого риска (5) выражается через вероятную площадь подтопления при заданной интенсивности подъема уровня грунтовых вод, а в целом характеризует объем подтопленной территории (по площади и глубине) (размерность риска, м³/год). В терминах опасности уравнение (5) при указанных допущениях можно переписать следующим образом

$$R_{S(п)} = \Pi_{оп} \Pi_{уз},$$

где $\Pi_{оп} = (\Delta h + \Delta w)$ – параметр опасности подтопления, $\Pi_{уз} = (S_{п}/S_{пд}^k) S_{п}$ – параметр уязвимости.

Удельный физический риск на единицу площади R_y можно получить при делении (5) на площадь подпора грунтовых вод

$$R_y = R_{S(п)}/S_{пд}^k.$$

Экономический риск R_3 , характеризующий в стоимостных показателях возможные потери объекта от одной или нескольких опасностей, определяется следующим образом [24]:

$$R_3 = R_{S(n)} d_6, \quad (6)$$

где d_6 — плотность национального богатства, руб/м³.

Уравнение (6) можно записать и следующим образом:

$$R_3 = R_{S(n)} Ущ^y,$$

где $Ущ^y$ — удельный ущерб, нанесенный 1 м³ подтопленной территории (включая наземные коммуникации, здания, сооружения, сельскохозяйственные земли и другие объекты, а также подземные коммуникации, посевы и другое).

Заменив в (18) d_6 на d_n (плотность населения, чел/м²), получим значения социального риска R_c — показатель возможных потерь определенной группы населения, находящейся в зоне возможного поражения, в виде потерь этой группы с различным исходом (потеря жилища, болезнь и другое) [24]

$$R_c = R_{S(n)} d_n.$$

Детерминированный подход

Как уже отмечалось выше, вероятностные методы оценки рисков проявления экстремальных природных явлений в настоящее время не позволяют достоверно прогнозировать эти явления и оценивать риски и ущербы от них. Поэтому актуальны также и детерминированные методы оценки рисков негативных процессов.

Автором ранее были разработаны подходы к оценке рисков и ущербов подземным водам от загрязнения детерминированным методом [4]. Данный метод базируется на системе индикаторов устойчивости качества подземных вод к загрязнению, и риск их загрязнения оценивается как произведение индикатора уязвимости грунтовых вод на ущерб грунтовым водам от этого загрязнения.

Для использования этого метода необходимо разработать структуру индикаторов подпора и подтопления грунтовыми водами территорий при наводнениях. Если проанализировать уравнение (4), то можно увидеть, что две первые пары его членов характеризуют источники опасности, т.е. они, по сути, соответствуют индикатору воздействия (за исключением членов, содержащих вероятностную оценку), а последние члены характеризуют состояние (защищенность) грунтовых вод после воздействия на них и являются индикатором состояния. Индикаторы и индексы формируются путем сравнения последствий чрезвычайно катастрофического — экстремального (Δh_q , Δw_k , $R_{вл}^H$) и катастрофического (Δh_k , Δw_k , $R_{вл}^K$) наводнений.

Индикатор воздействия характеризуется двумя индексами

индекс гидрологического подпора (на урезе реки) $I_{гл} = \Delta h_q / \Delta h_k$;

индекс избыточного питания (инфильтрации) $I_w = \Delta w_q / \Delta w_k$.

Индикатор состояния описывается следующими индексами:

индекс гидрогеологического подпора (в водоносном горизонте) $I_{гг} = R_{вл}^H / R_{вл}^K$;

индекс подтопления (в водоносном горизонте) $I_{п} = \Delta h_q^x / \Delta h_k^x$;

обобщенный индекс подтопления $I_{по} = S_{п}^H / S_{пд}^H$; этот индекс объединяет два других индекса, характеризующих индикатор состояния подземных вод, в его состав входят площадь подпора $S_{п}$, определяемая с помощью ширины зоны влияния подпора, и площадь подтопления $S_{пд}$, учитывающая только те площади, где подъем уровня грунтовых вод превышает критические глубины.

Как уже было сказано, стоимостной риск, отражающий возможный экономический ущерб при одноразовом проявлении одной и нескольких опасностей определенного генезиса и интенсивности на оцениваемом объекте, руб [24], может быть определен как произведение индекса уязвимости грунтовых вод и ущерба [4]. В данном случае индекс уязвимости грунтовых вод к подтоплению от наводнения будет представлять собой произведение индексов, характеризующих опасность подтопления и защищенность их от этой опасности, и тогда стоимостной риск $R_{ст}(п)$ можно выразить следующим образом:

$$R_{ст}(п) = I_y Ущ = ((I_{гл} + I_w) / I_{по}) Ущ,$$

где I_y — индекс уязвимости ($I_y = (I_{гл} + I_w) / I_{по}$), характеризующий кратность превышения риска от чрезвычайно катастрофического наводнения по отношению к катастрофическому, $Ущ$ — ущерб от катастрофического наводнения, руб. Ущерб от подтопления территорий подземными водами наносится сельскохозяйственным землям, городским и сельским застройкам, водозаборам, лесному хозяйству, промышленным и сельскохозяйственным объектам, транспорту, грунтам и породам, населению и другим объектам в зоне подтопления.

В данном случае риск (7) оценивается через некоторую базовую характеристику ущерба (по отношению к которой формируются индексы изучаемого экстремального наводнения), значение которой увеличивается умножением на кратность превышения уязвимости территории к этому наводнению. Практическое применение этого метода удобно для случаев, когда уже происходили наводнения катастрофического уровня и был оценен ущерб от него. Для прогнозирования и оценки риска чрезвычайно катастрофического наводнения можно оцененный

ущерб увеличить за счет индекса уязвимости по уравнению (7).

Для определения площадей подтопления грунтовыми водами, подъема их уровня в процессе наводнения и продолжительности распространения подпора и зоны влияния, используемых в вероятностном и детерминированном подходах определения рисков, применяются известные в практике гидродинамических расчетов аналитические решения уравнений фильтрации и подпора [1, 10, 12, 13, 25, 27].

ВЫВОДЫ

При оценке рисков подтопления территорий грунтовыми водами при наводнениях можно использовать вероятностные и детерминированные методы оценок, хотя и в первых методах делаются допущения детерминированного свойства. Ввиду сложности практического использования вероятностных методов необходимо развивать детерминированные подходы, основанные на анализе предвестников экстремальных стихийных явлений, что позволит существенно снизить потери.

При оценке рисков подтопления при экстремальных наводнениях детерминированными и вероятностными методами необходимо

ведение мониторинга состояния природной среды в регионах, где возможны чрезвычайные ситуации;

наличие комплекта карт гидроизогипс, глубин залегания грунтовых вод, критических глубин залегания грунтовых вод, защищенности грунтовых вод;

разработка сценариев развития вероятных экстремальных явлений (в данном случае наводнений) на основе данных мониторинга; для каждого сценария – расчет максимальной ширины зоны подпора и максимальных подъемов уровней грунтовых вод, а на их основе и на базе перечисленных карт – площади подпора и подтопления территорий грунтовыми водами;

построение карт природной и техногенной нагрузки для данного региона и нанесение на них площадей подтопления для различных сценариев развития экстремальных наводнений;

расчет рисков и ущербов двумя методами для разных сценариев развития процессов;

рассмотрение мероприятий по минимизации рисков подтопления территорий грунтовыми водами при реализации экстремальных наводнений.

В заключение следует отметить, что процесс подтопления территорий грунтовыми водами при наводнениях имеет не только негативные последствия, но и благоприятные, способствующие улучшению водного режима почв и восполнению запасов подземных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьянов С.Ф.* Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод. М.: Колос, 1981. 355 с.
2. *Акимов В.А., Лесных В.В., Соколов Ю.И.* Риски катастрофических наводнений на территории России в начале XXI века: анализ и управление. Матер. конф. "Оценка и управление природными рисками. Риск 2003". М.: Изд-во Рос. ун-та дружбы народов, 2003. Т. 1. С. 293–297.
3. *Алымов В.Т., Тарасова Н.П.* Техногенный риск. Анализ и оценка. М.: Академкнига, 2004. 118 с.
4. *Белоусова А.П., Гавич И.К., Лисенков А.Б., Попов Е.В.* Экологическая гидрогеология. Учебник для Вузов. М.: Академкнига, 2006. 397 с.
5. *Болгов М.В., Дзекцер Е.С.* О вероятностно-детерминистических моделях в гидрогеологических прогнозах на застраиваемых территориях // Вод. ресурсы. 1992. № 1. С. 16–25.
6. *Болгов М.В., Дзекцер Е.С.* О пространственной изменчивости показателей процесса подтопления застраиваемых территорий // Геоэкология. 1995. № 1. С. 103–109.
7. *Болгов М.В., Дзекцер Е.С.* Стохастические закономерности подтопления застраиваемых территорий грунтовыми водами // Геоэкология. 1995. № 4. С. 104–117.
8. *Болгов М.В., Дзекцер Е.С., Писаренко В.Ф.* Статистический анализ подтопления застраиваемых территорий // Вод. ресурсы. 1998. Т. 25. № 5. С. 534–540.
9. *Бурова В.Н.* Модели и методы оценки абразионно-оползневой опасности. Матер. конф. "Оценка и управление природными рисками. Риск 2006". М.: Изд-во Рос. ун-та дружбы народов, 2006. С. 169–172.
10. *Веригин Н.Н.* Неустановившееся движение грунтовых вод вблизи водохранилища // Докл. АН СССР. 1940. Т. 28. № 5. С. 57–63.
11. *Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И.* Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы. М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2003. 352 с.
12. *Гавич И.К., Данилов В.В., Крысенко А.М., Ленченко Н.Н. и др.* Практикум по динамике подземных вод. М.: МГРИ, 1984. 127 с.
13. *Дзекцер Е.С.* Методологические аспекты проблемы геоэкологической опасности и риска // Геоэкология. 1994. № 3. С. 4–10.
14. *Добровольский С.Г., Истомина М.Н.* Наводнения мира. М.: ГЕОС, 2006. 254 с.
15. *Долгонос Б.М., Корчагин К.А.* Вероятностные закономерности неблагоприятных гидрохимических явлений // Вод. ресурсы. 2005. Т. 32. № 4. С. 452–458.
16. *Кофф Г.Л., Борсукова О.В.* Оценка риска цунами (на примере морских береговых зон острова Сахалин). Матер. всерос. конф. "Риск – 2006. Оценка и управление природными рисками". М.: Изд-во Рос. ун-та дружбы народов, 2006. С. 202–204.
17. *Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов В.Н. и др.* Применение физико-математических моделей формирования речного стока для оценки степени опасности катастрофических наводнений // Метеорология и гидрология. 1994. № 4. С. 93–100.

18. *Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов В.Н.* Расчет вероятностных характеристик максимального стока по метеорологическим данным с использованием динамико-стохастических моделей // Метеорология и гидрология. 2002. № 5. С. 83–94.
19. Методические рекомендации по оценке риска и ущерба при подтоплении территорий. М.: ФГУП НИИ ВОДГЕО, 2001. 60 с.
20. *Нежиховский Р.А.* Гидролого-экологические основы водного хозяйства. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 229 с.
21. *Осипов В.И.* Оценка и управление природными рисками. Матер. шестой науч.-практ. конф. “Управления рисками чрезвычайных ситуаций”. М., 2001. С. 34–45.
22. *Писаренко В.Ф., Болгов М.В., Осипова Н.В., Рукавишников Т.А.* Применение теории экстремальных событий в задачах аппроксимации распределений вероятностей максимальных расходов воды // Вод. ресурсы. 2002. Т. 29. № 6. С. 645–657.
23. *Проценко А.М., Махутов Н.А., Артемьев А.Е.* Безопасность населения и окружающей среды Москвы: исследования и проблемы управления // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. М.: ВИНТИ, 1997. Вып. 2. С. 75–86.
24. *Рогозин А.Л.* Современное состояние и перспективы оценки и управления природными рисками в строительстве // Анализ и оценка природного и техногенного риска в строительстве. М.: ПНИИ-ИС, 1995. С. 7–25.
25. Управление риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. М.: Наука, 2000. 431 с.
26. *Фалеев М.И.* Программно-целевой метод решения проблем снижения рисков и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций. Матер. шестой науч.-практ. конф. “Управления рисками чрезвычайных ситуаций”. М., 2001. С. 26–34.
27. *Шестаков В.М.* Гидрогеодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1995. 368 с.
28. Policy and Practice for Protection of Groundwater. London: Environment Agency of UK, 1998. 57 p.