

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КАТАСТРОФЫ

Том II

**ГЕОЛОГИЯ УРАНА,
ГЕОЭКОЛОГИЯ, ГЛЯЦИОЛОГИЯ**

Москва
2011

УДК 504.0
ББК 26.2
Г35

Экстремальные природные явления и катастрофы : в 2 т. / Отв. ред. А.О. Глико;
ИФЗ РАН. – М. : ИФЗ РАН, 2010; 2011.

ISBN 978-5-91682-012-6

Г35 Т. 2 : Геология урана, геоэкология, гляциология / Отв. ред. В.М. Котляков, ИГ РАН;
отв. сост. А.Л. Собисевич, ИФЗ РАН; – М. : ИФЗ РАН, 2011.

ISBN 978-5-91682-014-0

Во втором томе коллективной монографии изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований, связанных с изучением актуальных проблем современной геологии урановых месторождений, геоэкологии и гляциологии, имеющих целью обеспечение безопасности населения и важных промышленных объектов на территории Российской Федерации. Анализируются основные промышленно-генетические типы урановых месторождений; рассмотрены новые прогрессивные технологии добычи радиоактивных материалов; изучено поведение актинидов в условиях долгосрочного хранения и захоронения отработанного ядерного топлива. Полученные научные результаты отражают современные проблемы безопасности атомной энергетики.

Приведены новые научные данные, связанные с изучением эволюции Антарктического и арктических ледниковых покровов, от состояния которых зависит уровень Мирового океана. Достаточно внимания уделено геоэкологическим проблемам Северного Кавказа. Анализируются уникальные данные, полученные при проведении глубокого kernового бурения ледника на Западном плато вулканической постройки Эльбруса.

Изучены наиболее опасные геоэкологические процессы на территории РФ, которые могут привести к гибели людей, ранениям и потере здоровья, а также к значительным материальным ущербам; разработан специальный ГИС-проект, который является готовым к использованию продуктом со всеми элементами, присущими автоматизированной информационной системе специального назначения, содержащей развернутые базы данных.

Полученные новые научные результаты и разработанные технологии уже востребованы на практике.

Для специалистов в области наук о Земле, строительства и чрезвычайных ситуаций.

УДК 504.0
ББК 26.2

The Volume II of the collective monograph presents the results of both theoretical and experimental studies of actual problems of modern geology of uranium deposits, geoecology and glaciology in order to mitigate issues on public safety and potentially hazardous industrial facilities and consequent risks on the territory of Russian Federation. Primary types of industrial uranium ore deposits are analysed, new progressive technologies of prospecting of radioactive materials are considered, the behaviour of actinides in long-time storages and nuclear waste burial sites are studied. The results obtained represent modern safety problems of nuclear power engineering.

New scientific data related to evolution of glaciers in Arctic and Antarctica governing the global level of world ocean are presented. Specific attention is paid to geoecological problems in Northern Caucasus. Genuine data gathered in the course of deep core drilling on the Western plateau of the Elbrus volcano.

Most significant hazardous geoecological processes on the territory of Russian Federation, threatening populated areas in terms of human health and injury, substantial property damage are studied. The specialized geographical information system (GIS) is the database driven product with high level of automation and it has been developed in frames of the actual research initiative.

The new fundamental scientific results obtained and the new technologies developed are of particular interest for practical applications.

The book will satisfy the needs of specialists in Earth sciences, industrial construction applications and hazard assessment.

ISBN 978-5-91682-014-0
ISBN 978-5-91682-012-6

© Российская академия наук, 2011
© Коллектив авторов, 2011

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ И ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МАСШТАБОВ И РИСКА КАТАСТРОФИЧЕСКИХ НАВОДНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА

Учреждение Российской академии наук Институт водных проблем РАН

ВВЕДЕНИЕ

Катастрофическими наводнениями условно принято называть явления, обусловленные выдающимися паводками, максимальные расходы, объемы или уровни которых имеют вероятность превышения (обеспеченность) меньше 1 % [Нежиховский, 1988; Воробьев и др., 2003]. При этом неявно предполагается, что расходы или уровни воды такой обеспеченности близки к некоторым значениям этих величин, при превышении которых резко увеличивается экономический или экологический ущерб. Такой рост ущерба можно объяснить тем, что характеристики гидрологических систем вследствие изменения условий формирования стока изменяются нелинейно от расходов и уровней воды. Некоторые изменения характеристик гидрологической системы происходят в зависимости от расходов воды достаточно плавно, однако возможны и нелинейные изменения типа реле (например, выход воды из речного русла на широкую пойму, повышение уровня грунтовых вод до поверхности водосбора, резкое увеличение водонепроницаемой площади, образование ледяной корки на поверхности водосбора, изменение водосборной площади или русловой сети и др.). При достижении определенных пороговых значений расходов воды роль таких нелинейностей может резко возрасть. В результате иногда высказываются предположения, что катастрофические наводнения являются следствием динамической неустойчивости гидрологических систем, следовательно, для их описания можно пытаться использовать общие результаты математических теорий катастроф (напри-

мер, [Арнольд, 2009]). Так, в некоторых публикациях (см. [Найденов, 2004]) была сделана попытка объяснить катастрофические повышения расходов воды или уровней возникающими в гидрологической системе автоколебательными процессами (эта идея привела также к парадоксальным выводам, что многолетние колебания стока также представляют собой следствие автоколебательных процессов в гидрологических системах). Однако многочисленные исследования гидрологических систем, преобразующих метеорологические воздействия на поверхность водосбора в речной сток, показывают, что автоколебательные процессы в таких системах встречаются крайне редко.

Многие практические задачи, связанные с исследованием и прогнозированием речного стока, успешно решаются при предположении, что речной бассейн можно рассматривать как линейную (или кусочно-линейную) динамическую систему с сосредоточенными параметрами, входом которой служат осредненные по площади водосбора осадки, а выходом – гидрограф стока. Реакции речных водосборов на кратковременные осадки (импульсные переходные функции или в гидрологической терминологии – единичные гидрографы) были получены на основе экспериментальных наблюдений для тысяч рек в разных физико-географических районах земного шара, и их анализ позволяет считать речные водосборы аperiodическими динамическими системами, в которых автоколебания практически не играют роли. Очевидно, это может быть объяснено тем, что входные воздействия на речной водосбор преобразуются в гидрологической системе в основном под действием диссипативных факторов (силы трения, задержания воды в бессточных емкостях, уве-

личения водосборной площади, потерь водной массы на инфильтрацию и испарение и других), при этом высокочастотные составляющие фильтруются, и возможные положительные обратные связи играют незначительную роль. Таким образом, основной причиной катастрофических наводнений, если не происходит каких-либо антропогенных или геологических разрушений гидрологической системы, служат экстремальные значения или необычные сочетания внешних воздействий на речной бассейн. Поэтому развитие теории катастрофических наводнений должно быть направлено в первую очередь на совершенствование физико-математических моделей гидрологических систем для более полного учета сложных нелинейных связей внутри этих систем и воспроизведения их поведения при всевозможных физически осуществимых гидрометеорологических условиях.

В настоящее время для оценки повторяемости и масштабов выдающихся половодий и паводков в гидрологической практике сложилось два принципиально отличающихся подхода. Первый из подходов, являющийся основным для определения вероятностных характеристик максимальных расходов в России и ряде других стран, основан на построении статистического распределения наивысших за год максимальных расходов паводков или половодий по имеющимся наблюдениям за стоком и затем экстраполяции этих распределений в область малых вероятностей превышения. Однако длины рядов наблюдений за стоком редко превышают 100 лет, в то же время для определения риска и возможных ущербов от катастрофических наводнений нередко нужны оценки максимальных расходов повторяемостью 1 раз в 1000 лет и реже. Кроме этого, использование этого подхода означает принятие гипотезы о стационарности рядов наблюдений за стоком, и при наличии антропогенных или климатических изменений статистические распределения максимальных расходов приходится строить либо по очень коротким, либо по неоднородным гидрологическим рядам, что значительно увеличивает погрешность определения расчетных максимальных расходов воды заданной обеспеченности. Для обеспечения безопасности при проектировании важных гидротехнических сооружений вводится так называемая гарантийная поправка в величину расчетного максимального расхода, что может снижать научную и экономическую обоснованность результатов проектирования.

Второй подход, применяющийся при проектировании наиболее ответственных гидротехнических сооружений в США, Японии и других странах и, в отличие от первого, позволяющий получить детерминистические оценки максимально возможных гидрографов, основан на гипотезе о существовании некоторых физических пределов величин осадков, обусловленных климатическими и физико-географическими особенностями территории. Проведена большая работа по разработке специальных методов определения максимально возможных (преимущественно жид-

ких) осадков по имеющимся метеорологическим наблюдениям, и построены карты таких величин для разных физико-географических районов и продолжительностей осадков. Поскольку точность определения максимально возможных осадков по таким картам считается в целом недостаточной, для расчетов стока по этим осадкам используются упрощенные модели, приводящие к сознательному значительному завышению максимальных расходов и объемов паводков. Такой подход оказывается оправданным при проектировании особо важных сооружений, когда вероятность превышения расчетного максимального расхода должна быть близка к нулю. Для практических водохозяйственных расчетов обычно используются уменьшенные значения рассчитанных расходов и объемов стока, однако при этом степень риска становится неопределенной.

В работе [Кучмент и др., 2002] была предложена методика определения вероятностных характеристик максимального стока на основе совместного применения физико-математических моделей формирования стока на водосборе и генераторов погоды (стохастических моделей метеорологических воздействий на водосбор) с использованием метода Монте-Карло. С помощью генератора погоды воспроизводятся возможные случайные сочетания метеорологических воздействий на водосбор, рассчитывается большое число возможных гидрографов стока с учетом заданных изменений на водосборе, и строятся распределения вероятностей максимальных расходов или других характеристик максимального стока по большому числу точек. Такой подход позволяет свести к минимуму случайные ошибки оценок этих вероятностей, которые при коротких рядах наблюдений за стоком могут быть особенно велики для малых вероятностей превышения. Однако при этом не устраняются ошибки вычислений характеристик стока, связанные с адекватностью используемых моделей и точностью калибровки их параметров. При величинах метеорологических воздействий и стока, значительно превышающих значения, наблюдавшиеся и использовавшиеся при калибровке и валидации моделей, ошибки расчета вероятностных характеристик стока могут возрасти независимо от числа смоделированных гидрографов. Ошибки такого рода связаны, в первую очередь, с построением стохастических генераторов погоды, где моделируются несколько переменных и используются сравнительно короткие выборки. Представляется, что эти ошибки могут быть заметно уменьшены при привлечении новой информации, которая обычно используется при детерминистических оценках максимально возможных расходов или объемов. Это в особенности относится к значению максимального талого стока, когда роль дождевых осадков не является определяющей, и точность определения максимально возможного воздействия достаточно высокая.

Отмеченные возможности рассмотрены нами на примере расчета характеристик максимального талого стока р. Вятка.

ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА Р. ВЯТКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА

Вятка – река преимущественно снегового питания: больше 60 % годового стока проходит во время весеннего половодья. Половодье начинается в среднем в первой половине апреля и продолжается до середины июня. Среднемноголетний максимальный расход весеннего половодья в замыкающем створе г. Вятские Поляны составляет 5145 м³/с. Наиболее высокое весеннее половодье за период инструментальных наблюдений зафиксировано в 1979 г. (максимальный расход 8200 м³/с).

Использовавшаяся физико-математическая модель формирования стока р. Вятка основана на конечно-элементной схематизации водосбора до замыкающего створа г. Вятские Поляны (площадь водосбора 124 000 км²). Русловая сеть разбита на 84 элемента русловой сети. К каждому такому элементу примыкают участки склонов, с которых вода поступает в русловую сеть. На склонах выделены 477 элементов площади со считающимися однородными почвами, растительным покровом и топографией (рис. 1).

Уравнения, использовавшиеся для описания учитываемых в модели процессов формирования речного стока, представлены в работе [Кучмент и др., 2008]. Расчеты по модели велись с использованием среднесуточных данных метеорологических наблюдений в бассейне р. Вятка за 37 лет (1940–1943; 1945–1954; 1956–1965, 1967–1969; 1971–1980 гг.). Большая часть параметров разработанной модели задавались по имеющимся данным измерений на водосборе р. Вятка. Шесть параметров (коэффициенты фильтрации почвы и коэффициенты в формуле расчета испарения для полевых и лесных участков, величина максимальной емкости поверхностного задержания, параметр скорости распространения паводковых волн в русле) калибровались по гидрографам стока р. Вятка в замыкающем створе за 18 лет (1940–1943; 1945–1954; 1956–1959 гг.).

Два параметра (коэффициенты стока для поля и леса) калибровались по данным о толщине снежного покрова, измеренной во время снеготаяния 1977–1980 гг. на 21 полевом и 12 лесных пунктах снегомерных наблюдений в бассейне Вятки. Проверка модели производилась по гидрографам стока в створах основного русла р. Вятка за 19 лет (1960–1965; 1967–1969; 1971–1980 гг.). На рис. 2 сравниваются рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока р. Вятка в створе г. Вятские Поляны для последних 12 из 19 половодий проверочного ряда.

В табл. 1 даны результаты расчетов объемов и максимальных расходов всех 37 весенних половодий, данные по которым использовались для калибровки и проверки модели. Среднеквадратическая погрешность расчета слоя стока в замыкающем створе за весь период составила 8,6 мм, ее отношение к среднеквадратическому отклонению фактических величин слоя стока равно 0,24. Среднеквадратическая погрешность расчета максимального расхода составила 486 м³/с, а ее отношение к среднеквадратическому отклонению фактических величин максимального расхода равно 0,39.

Использовавшийся стохастический генератор погоды, представленный нами ранее в работе [Кучмент и др., 2008], включает модели временного хода осадков, среднесуточных температур воздуха и дефицитов влажности воздуха с 1 марта по 30 июня. При выборе структуры и подборе параметров моделей использовались данные ежедневных метеорологических наблюдений на метеостанции г. Киров за 109 лет в период с 1881 по 1995 г.

Последовательность дней с осадками и без осадков представлялась моделью дискретной марковской цепи с постоянными параметрами в течение рассматриваемого сезона с 1 марта по 30 июня. Слой осадков в день их выпадения моделировался как гамма-распределенная случайная величина со средним значением, меняющимся для разных месяцев рассматриваемого сезона и с постоянным внутри всего сезона коэффициентом вариации.

Дефицит влажности воздуха для дней с осадками принимался равным нулю, а в дни без осадков представлялся как логнормально распределенная случайная величина. Для моделирования хода среднесуточных использовался метод фрагментов.

Для задания начальных условий (состояния водосбора перед началом снеготаяния) по имеющимся данным наблюдений были построены статистические распределения запасов воды в снежном покрове, влажности метрового слоя почвы и глубины промерзания почвы на 1 марта. Для их аппроксимации использовалось двухпараметрическое гамма-распределение. При выборе возможных сочетаний величин начальных снегозапасов и глубины промерзания почвы учитывалась корреляция между этими величинами.

Процедура расчета гидрографов стока с помощью разработанной динамико-стохастической модели р. Вятка заключалась в следующем. Вначале методом Монте-Карло моделировались величины запасов воды в снежном покрове, влажности и глубины промерзания почв на 1 марта и временные последовательности суточных величин осадков, среднесуточных значений температуры и дефицита влажности воздуха с 1 марта по 30 июня. Затем сгенерированные показатели начального состояния водосбора и временные метеорологические последовательности задавались на входе физико-математической модели формирования стока, с помощью которой воспроизводились процессы фор-



Рис. 1. Конечно-элементная схематизация водосбора р. Вятка

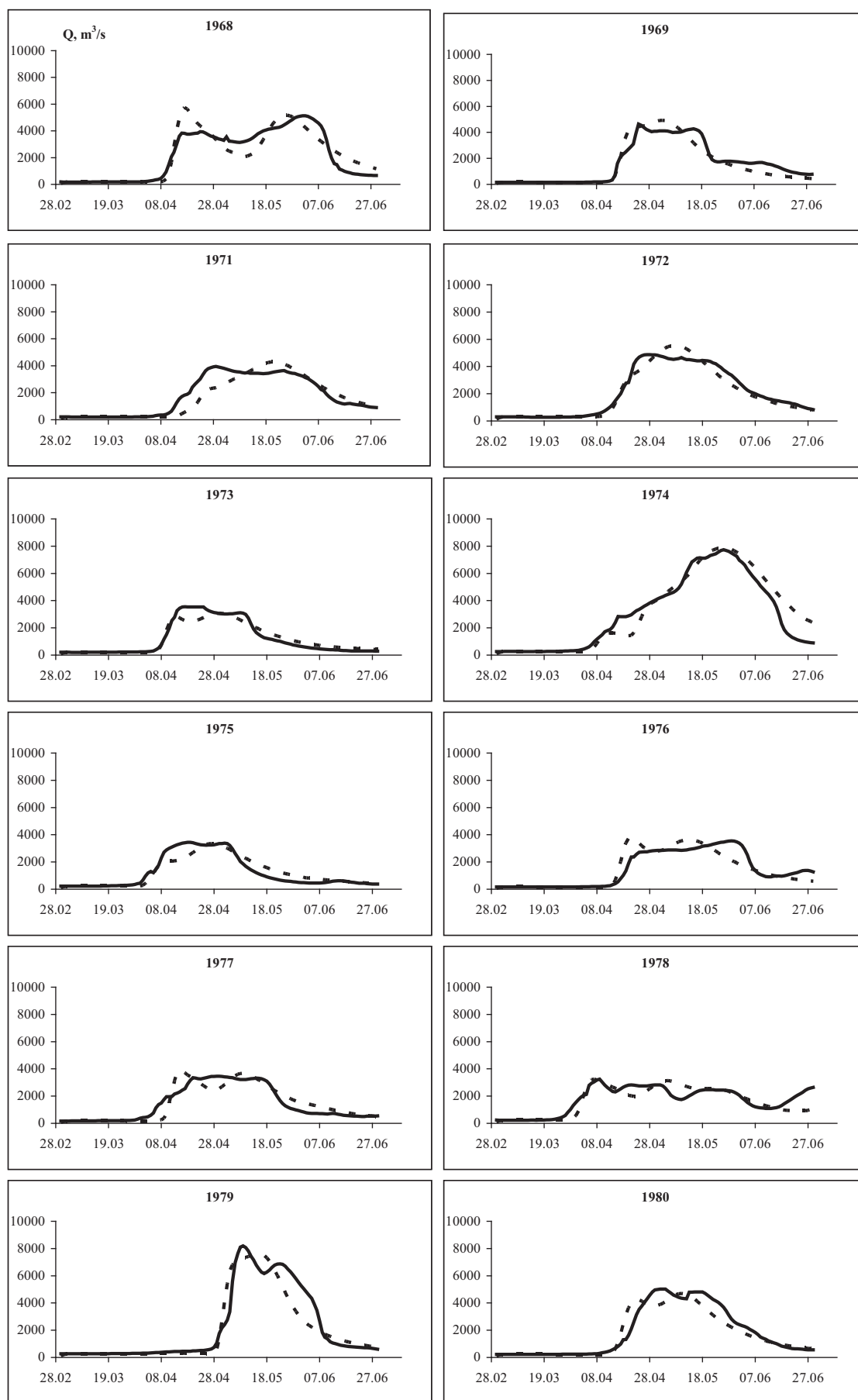


Рис. 2. Фактические (жирная линия) и рассчитанные (пунктир) гидрографы стока р. Вятка (г. Вятские Поляны)

Таблица 1. Сопоставление фактических и рассчитанных характеристик стока р. Вятка за период с 1 марта по 30 июня (серым выделены годы, использовавшиеся для калибровки модели)

	Год	$Y_{\text{набл.}}, \text{ мм}$	$Y_{\text{расч.}}, \text{ мм}$	Относит. ошибка, %	$Q_{\text{набл.}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{\text{расч.}}, \text{ м}^3/\text{с}$	Относит. ошибка, %
1	1940	160	144	–10	5320	6012	13
2	1941	150	136	–9	4560	4975	9
3	1942	156	150	–4	5290	5627	6
4	1943	170	174	2	5800	5563	–4
5	1945	138	125	–9	3470	3539	2
6	1946	149	146	–2	5410	5871	9
7	1947	242	233	–4	6070	7137	18
8	1948	146	152	4	5140	4819	–6
9	1949	121	127	5	4030	4375	9
10	1950	116	115	0	4430	3971	–10
11	1951	137	130	–5	4450	4714	6
12	1952	108	102	–5	3700	3343	–10
13	1953	149	137	–8	5380	5343	–1
14	1954	108	108	0	3850	3736	–3
15	1956	146	150	3	4400	4935	12
16	1957	210	222	6	8010	8251	3
17	1958	188	192	2	5520	5253	–5
18	1959	145	155	7	5810	5497	–5
19	1960	132	123	–7	4600	4798	4
20	1961	151	139	–8	3590	5184	44
21	1962	142	131	–8	4530	4919	9
22	1963	132	144	10	5700	5712	0
23	1964	124	120	–3	3850	3849	0
24	1965	170	165	–3	5670	5721	1
25	1967	102	115	12	5050	4226	–16
26	1968	182	185	2	5130	5749	12
27	1969	135	127	–6	4640	4927	6
28	1971	148	137	–7	3950	4300	9
29	1972	173	165	–4	4870	5543	14
30	1973	97	96	–1	3550	3079	–13
31	1974	254	270	6	7740	7906	2
32	1975	100	100	0	3450	3360	–3
33	1976	122	121	–1	3550	3818	8
34	1977	118	122	4	3460	3905	13
35	1978	143	136	–5	3250	3243	0
36	1979	180	166	–8	8200	7640	–7
37	1980	152	141	–7	5030	4697	–7
Среднее		149	146	–2	4877	5015	3

Таблица 2. Статистические характеристики максимального расхода весеннего половодья р. Вятка, определенные по измеренным расходам и рассчитанные с помощью динамико-стохастической модели

Длина ряда	Среднее, м³/с	Стандарт. отклонение, м³/с	Коэфф. вариации	Квантили заданных обеспеченностей, м³/с				
				0,5 %	1 %	3 %	5 %	10 %
Измеренные расходы								
60	5146	1225	0,25	–	–	7706	7319	6756
Рассчитанные расходы								
10000	4972	1465	0,29	9472	8900	8039	7562	6891

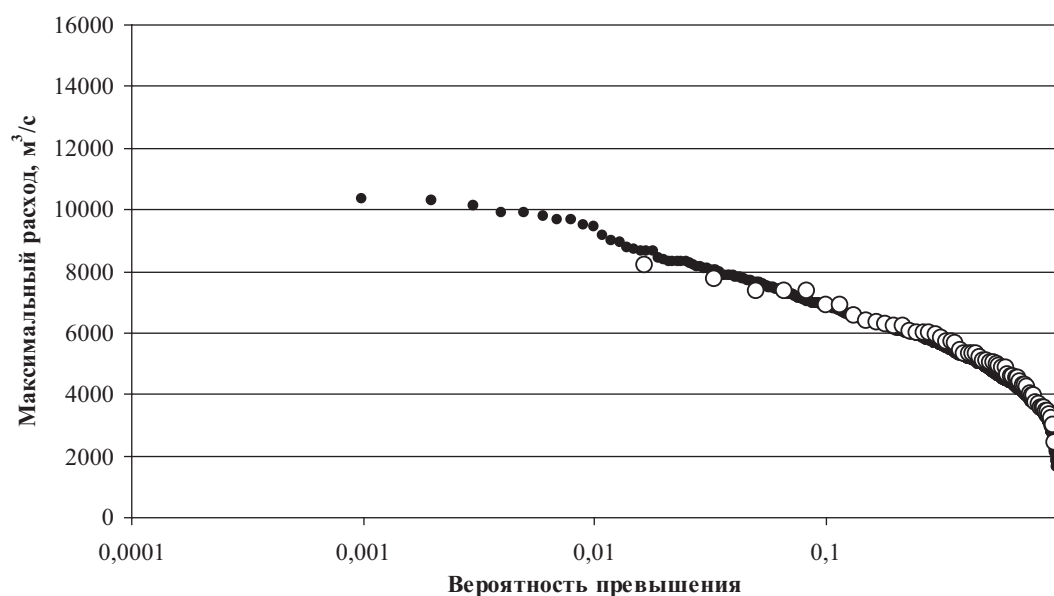


Рис. 3. Вероятности превышения максимальных расходов весеннего половодья на р. Вятка (крупные точки – фактические расходы из 60-летнего ряда наблюдений, мелкие точки – расчет по динамико-стохастической модели)

мирования речного стока, и рассчитывались гидрографы стока в разных створах речной сети. В результате были рассчитаны 10 000 гидрографов стока р. Вятка.

На рис. 3 вероятности превышения максимальных расходов, определенные по имеющемуся 60-летнему ряду наблюдений за стоком на р. Вятка, сравниваются с величинами, рассчитанными по динамико-стохастической модели, а в табл. 2 приведены статистические характеристики сравниваемых рядов.

Как видно из рис. 3 и табл. 2, разработанная динамико-стохастическая модель позволила с удовлетворительной точностью оценить статистические характеристики максимальных расходов р. Вятка в области, освещенной наблюдениями за стоком, а также рассчитать максимальные расходы, намного превышающие наибольший расход (8200 м³/с) из имеющегося многолетнего ряда наблюдений за стоком, и оценить вероятность их формирования.

ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

При достаточно больших снегозапасах и малых потерях стока на впитывание в почву определяющую роль в формировании экстремально высокого половодья играет максимально возможная интенсивность снеготаяния S_{\max} за период, равный времени добега талой воды до замыкающего створа водосбора. Величина S_{\max} зависит в первую очередь от по-

ступления солнечной радиации, и она определяется с гораздо большей точностью, чем максимально возможные жидкие осадки. Однако процесс снеготаяния может сопровождаться выпадением дождей и важно оценить, насколько выпадение жидких осадков влияет на максимально возможную интенсивность снеготаяния за время добега. Для такой оценки были проведены численные эксперименты с помощью физико-математической модели формирования снежного покрова и снеготаяния [Кучмент, Гельфан, 2004] по данным метеорологических и снегомерных наблюдений на территории Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории (ВНИГЛ). Исследовалось влияние на интенсивность снеготаяния и водоотдачу снежного покрова притока тепла, приносимого с жидкими осадками и выделяющегося при их замерзании в толще снега.

Численные эксперименты показали, что поток тепла, приносимого жидкими осадками на тающий снежный покров, намного меньше других составляющих теплового баланса на поверхности снега, и его влиянием на интенсивность снеготаяния можно пренебречь. Например, как видно из рис. 4, выпадение 40 мм жидких осадков с температурой +2 °С усилит снеготаяние за счет притока тепла лишь на 1 мм/сут.

Вместе с тем, выпадение дождя на снежный покров, имеющий отрицательную температуру, приводит к замерзанию части впитываемой воды и повышению температуры снега, что может ускорить начало снеготаяния. Помимо повышения температуры снега, замерзание дождевой воды приводит к уплотнению снега и снижению его водоудерживающей способности. Влияние этого эффекта на характер снеготаяния можно проиллюстрировать результатами расче-

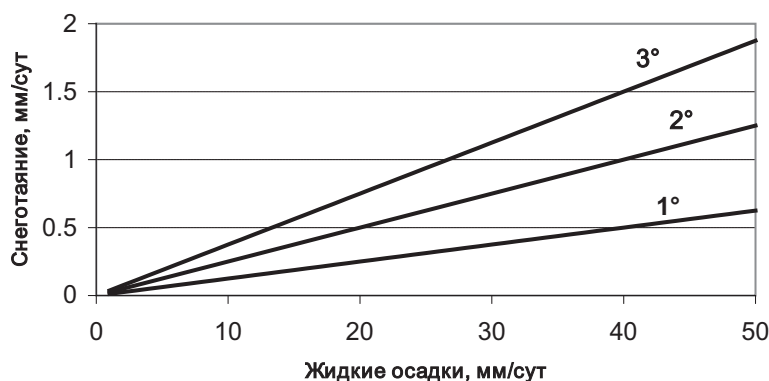


Рис. 4. Рост снеготаяния за счет потока тепла, приносимого с жидкими осадками разной интенсивности и температуры (цифры у линий – температура осадков)

тов снеготаяния на полевом водосборе Усадьевский (ВНИГЛ) весной 1977 г. Как показали расчеты по модели, начиная с конца марта несколько раз днем выпадали дожди на достаточно глубокий снег (свыше 60 см). Дождевая вода удерживалась в снеге капиллярными силами, а при возврате холодов в ночное время замерзала. Процесс выпадения жидких осадков и их замерзания в снеге в ночное время повторялся несколько раз. В результате метаморфизма к началу снеготаяния снег оказался сухим, крупнозернистым с большим количеством ледяных включений, а средняя плотность снежного покрова возросла до $0,40 \text{ г/см}^3$ (рис. 5). Несмотря на отсутствие в снеге жидкой воды, его водоудерживающая способность резко снизилась, что способствовало быстрой водоотдаче уже в начале снеготаяния.

Таким образом, проведенные расчеты показали, что выпадение жидких осадков перед снеготаянием

приводит к росту содержания в снеге жидкой воды и льда и ускорению начала водоотдачи снежного покрова. Вместе с тем, выпадение жидких осадков на тающий снежный покров не увеличивает интенсивность снеготаяния и может не учитываться при определении максимально возможной интенсивности снеготаяния S_{\max} .

Величина S_{\max} (в мм/сут) на заданную дату определялась из уравнения теплового баланса тающего снежного покрова по формуле [Кучмент и др., 2008]:

$$S_{\max} = 0,26Q_0(1 - \alpha_s) + 4,86T_{\max}(0,18 + 0,098\bar{U}), \quad (1)$$

где Q_0 – максимальная интенсивность солнечной радиации при безоблачном небе ($\text{Вт}\cdot\text{м}^2$), определяемая в зависимости от широты местности, сезона и времени суток; α_s – альbedo поверхности снега; T_{\max} – максимальная среднесуточная температура воз-

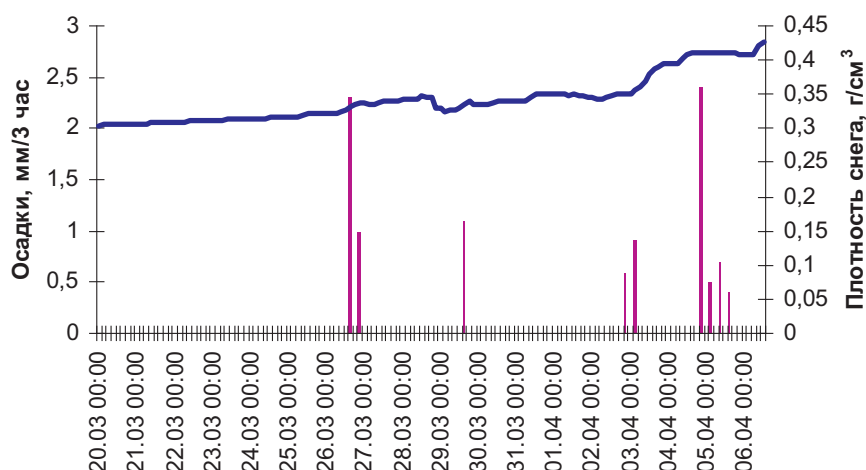


Рис. 5. Рассчитанные изменения плотности (линия) снежного покрова вследствие замерзания в снеге дождевых осадков (столбцы) (ВНИГЛ, весна 1977 г.)

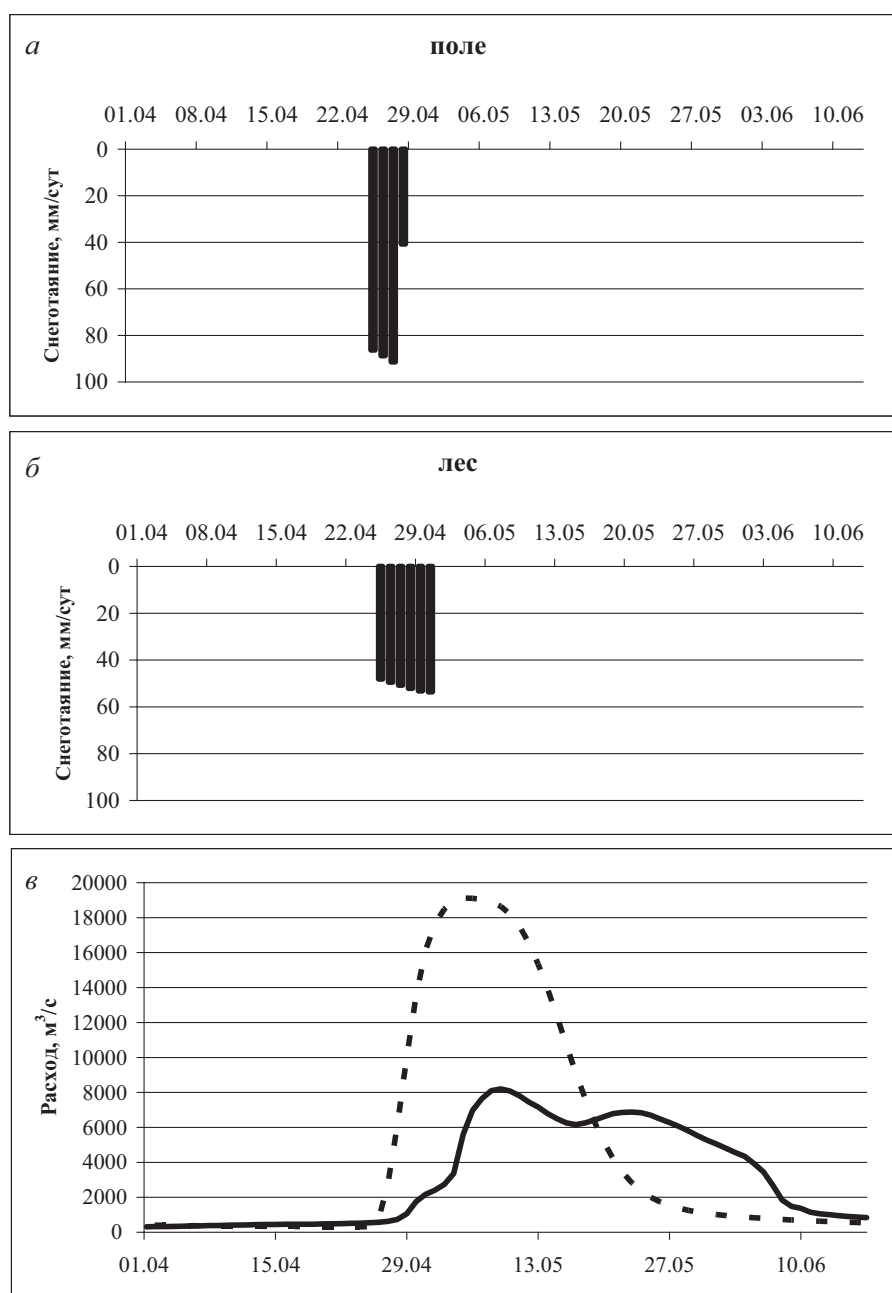


Рис. 6. Ход максимально возможного снеготаяния в бассейне Вятки (а, б) и рассчитанный гидрограф максимального возможного половодья (в; пунктир) в сравнении с гидрографом наибольшего половодья за период наблюдений на р. Вятка

духа на заданную дату ($^{\circ}\text{C}$); \bar{U} – средняя скорость ветра за период снеготаяния ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$).

Максимально возможная интенсивность снеготаяния в бассейне Вятки рассчитывалась по формуле (1) отдельно для открытых и залесенных участков. При расчете максимально возможного снеготаяния в лесу в формулу вводились поправки, учитывающие уменьшение суммарной радиации и скорости ветра под пологом леса [Кучмент, Гельфан, 2004].

При оценке максимально возможного гидрографа для больших водосборов, т. е. при больших временах добегания (время добегания может составлять несколько недель и даже месяцы), лимитирующим фактором может быть величина запасов воды в снеге на речном

водосборе перед началом таяния. Методика расчета предельных величин снегозапасов перед снеготаянием предложена в работе [Кучмент и др., 2008], и для бассейна р. Вятка они получились равными 310 мм.

На рисунках б, а, б показан ход максимально возможного снеготаяния на полевых и лесных участках водосбора р. Вятки, рассчитанного при снегозапасах 310 мм, начиная с 25 апреля – наиболее поздней даты начала снеготаяния в бассейне Вятки в 1979 г., когда сформировалось наибольшее половодье за период наблюдений.

На рис. 6, в показан гидрограф максимально возможного половодья в бассейне Вятки, рассчитанного с помощью физико-математической модели, на входе

которой задавалось максимально возможное снеготаяние. При этом для минимизации потерь талого стока почва на всем водосборе считалась водонепроницаемой и учитывались только потери стока на заполнение бессточных углублений рельефа.

Для сравнения на этом же рисунке показан гидрограф половодья 1979 г. Пиковый расход максимально возможного половодья получился равным 19 100 м³/с, что более чем вдвое превышает максимальный расход за период наблюдений (8200 м³/с).

УТОЧНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ОЦЕНОК МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ СТОКА С УЧЕТОМ МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОГО РАСХОДА

Для аппроксимации кривой вероятности превышения максимальных расходов Г.Г. Сванидзе [1977] использовал представление о наличии предельных значений расходов воды и предложил использовать статистическое распределение S_B Джонсона. Это распределение имеет четыре параметра (два параметра формы, вычисляемых по среднему значению и коэффициенту вариации, и два параметра, задающие верхнюю и нижнюю границы изменений случайной величины) и из него, как частные случаи, можно получить гамма- и логнормальное распределения, традиционно используемые для гидрологических расчетов.

Распределение S_B Джонсона можно представить в виде:

$$f(Q) = \frac{\eta}{\sqrt{2\pi}} \frac{\lambda}{(Q-\varepsilon)(\lambda-Q-\varepsilon)} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\gamma + \eta \ln \left(\frac{Q-\varepsilon}{\lambda-Q-\varepsilon} \right) \right]^2 \right\}, \quad (2)$$

$$\varepsilon \leq Q \leq \lambda; \quad \eta > 0; \quad -\infty < \gamma < \infty; \quad \lambda > 0; \quad -\infty < \varepsilon < \infty,$$

где γ и η – параметры формы; ε и $\lambda + \varepsilon$ – нижняя и верхняя границы распределения, соответственно.

Это распределение мы использовали для ряда из 10 000 смоделированных значений максимальных расходов. Параметры γ и η оценивались по формулам:

$$\gamma = -\frac{1}{C_v^*}; \quad \eta = \frac{1}{\sigma^*}, \quad (3)$$

где C_v^* и σ^* – оценки коэффициента вариации и среднеквадратического отклонения, определенные методом

моментов по ряду величин $Q_i^* = \ln \left(\frac{Q_i - \varepsilon}{\lambda - Q_i - \varepsilon} \right)$;

Q_i – величины рассчитанных расходов воды ($i = 1, 2, \dots, 10\,000$).

Параметры γ и η получились равными $\gamma = 2,81$; $\eta = 2,49$. Параметр ε (нижняя граница распределения) задавался равным нулю. Параметр λ принимался равным 19 100 м³/с – предельно возможному расходу, определенному с помощью физико-математической модели формирования стока.

Вероятности превышения рассчитанных максимальных расходов, аппроксимированные распределением S_B Джонсона с верхним пределом, равным 19 100 м³/с, показаны на рис. 7.

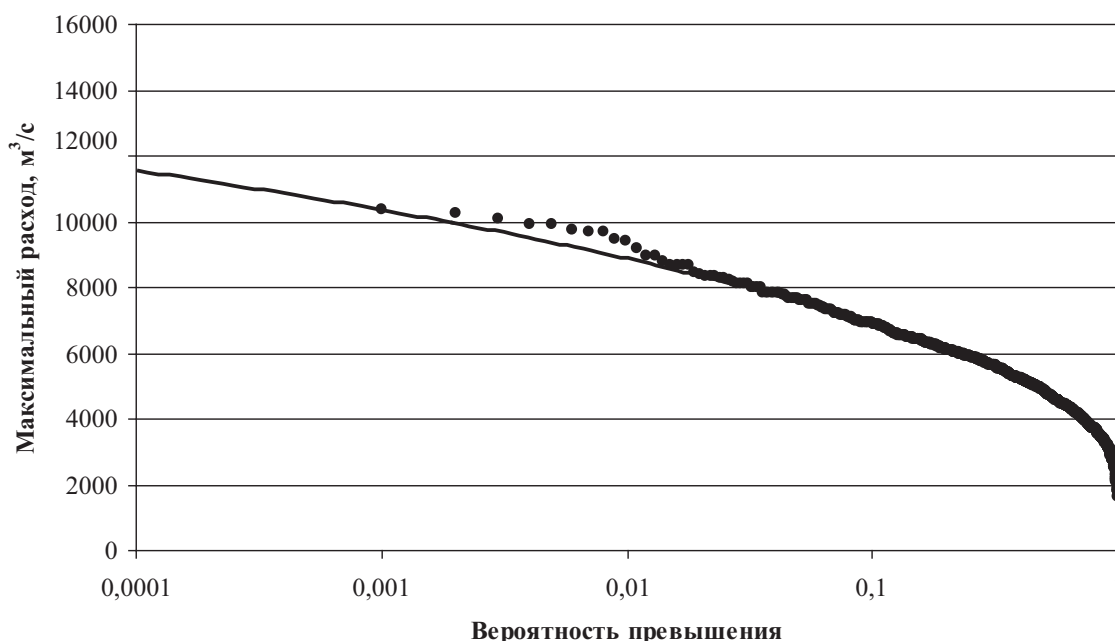


Рис. 7. Вероятности превышения максимальных расходов весеннего половодья на р. Вятка (точки – расчет по динамико-стохастической модели, линия – распределение S_B Джонсона с верхним пределом, определенным с помощью физико-математической модели формирования стока)

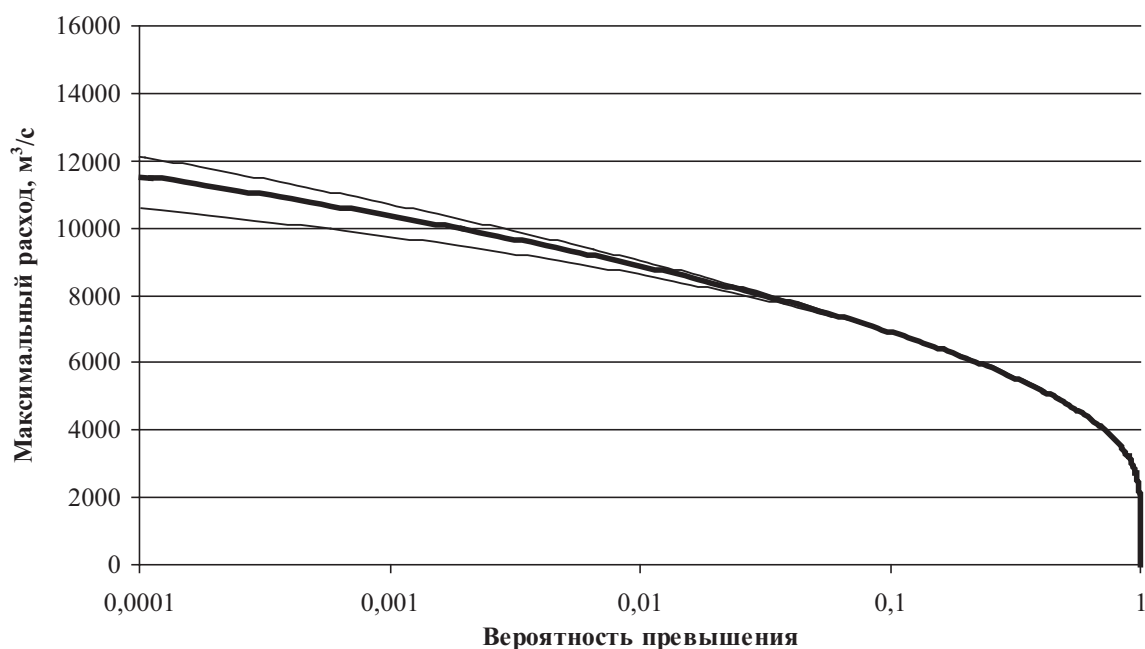


Рис. 8. Чувствительность кривой вероятности превышения максимальных расходов р. Вятка к погрешностям определения максимально возможного расхода:

Жирная линия – распределение S_B Джонсона с верхним пределом 19 100 м³/с; тонкие линии – то же распределение с верхними пределами 14 000 и 24 000 м³/с

Для того чтобы оценить насколько влияют ошибки в определении максимально возможного расхода на расходы с вероятностью превышения 0,01–0,0001 (наиболее часто используемый диапазон), проведен

анализ чувствительности расчета вероятности превышения максимальных расходов половодья к погрешностям определения максимально возможного расхода. Максимально возможный расход воды р. Вятка

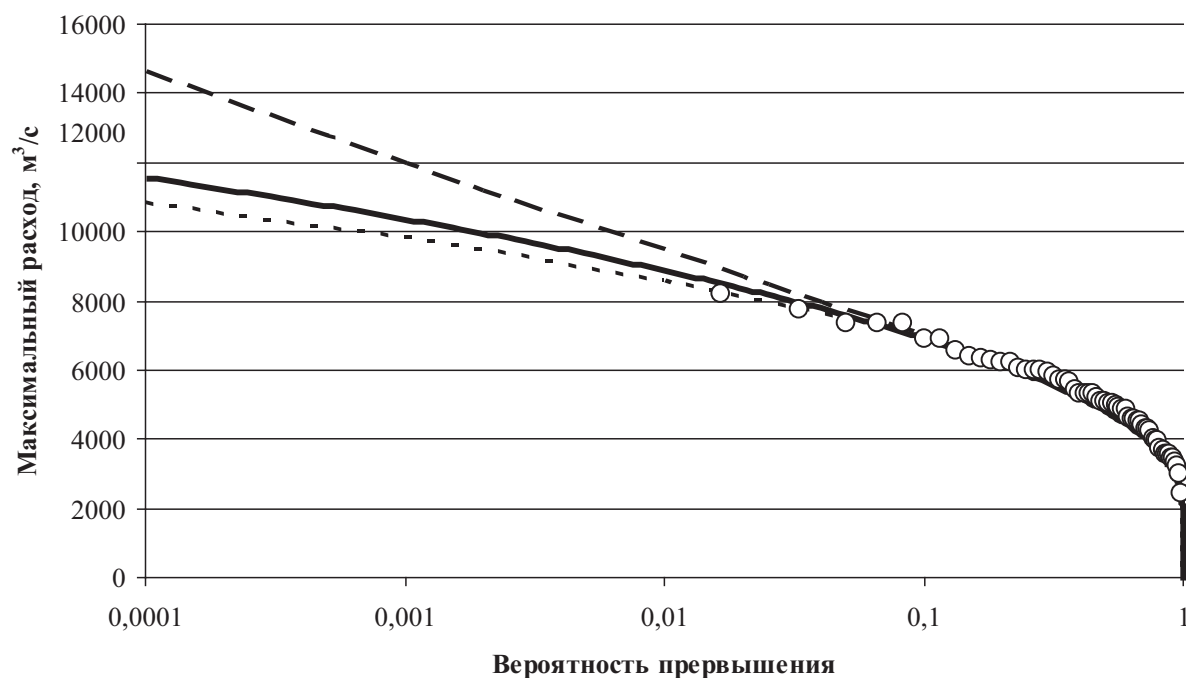


Рис. 9. Кривые вероятностей превышения максимальных расходов р. Вятка:

Сплошная линия – распределение S_B Джонсона, подобранное по рассчитанным расходам; длинный и короткий пунктир – лог-распределение Пирсона и трехпараметрическое гамма-распределение, соответственно, подобранные по данным наблюдений (точки)

менялся в диапазоне $19\,000 \pm 5000 \text{ м}^3/\text{с}$ ($\pm 26 \%$). Затем определялись соответствующие величины расходов воды малых вероятностей превышения по кривой распределения S_B Джонсона, построенной по ряду смоделированных величин стока. На рис. 8 показаны кривые вероятности превышения, построенные при принятых крайних значениях максимально возможного расхода: $14\,000$ и $24\,000 \text{ м}^3/\text{с}$. Как видно из рис. 8, величины стока малых вероятностей превышения оказались малочувствительны к погрешности определения максимально возможного расхода. Так, при задававшемся изменении максимально возможного расхода $\pm 26 \%$ отклонения от расчетной величины расхода воды $0,0001$ обеспеченности составили лишь от 5 до -9% .

Кривая вероятностей превышения максимальных расходов стока р. Вятка, построенная с помощью динамико-стохастической модели с учетом оценки максимально возможного расхода, сравнивалась с традиционно применяемыми в инженерной практике России и США с соответствующими кривыми трехпараметрического гамма-распределения и лог-распределения Пирсона, подобранными по имеющимся измерениям расходов воды. Результаты сравнения показаны на рис. 9. Построенная нами кривая распределения Джонсона практически совпадает с кривыми трехпараметрического гамма-распределения и лог-распределения Пирсона на участке вероятностей превышения от $0,01$ до 1 . В области более низких вероятностей превышения кривые, подобранные по данным наблюдений, заметно расходятся (например, максимальный расход с вероятностью превышения $0,0001$, рассчитанный по кривой Пирсона, оказался на 30% выше рассчитанного по гамма-распределению), и, таким образом, значения расходов с малыми вероятностями превышения в значительной мере определяются выбором распределения. В то же время использование распределения Джонсона позволяет

зафиксировать верхнюю границу максимальных расходов, найденную из физических соображений.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы № 16 Президиума РАН «Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы».

ЛИТЕРАТУРА

- Арнольд В.И. Теория катастроф. М.: Едиториал УРСС, 2009. 136 с.
- Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Катастрофические наводнения начала XX века: уроки и выводы. М.: Дэкс-Пресс, 2003. 350 с.
- Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Физико-математическая модель формирования снежного покрова и снеготаяния в лесу // Метеорология и гидрология. 2004. № 5. С. 85–95.
- Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов В.Н. Расчет вероятностных характеристик максимального стока по метеорологическим данным с использованием динамико-стохастических моделей формирования стока // Метеорология и гидрология. 2002. № 5. С. 83–94.
- Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов В.Н. Оценка возможных масштабов и риска катастрофических наводнений на основе физико-математических моделей формирования стока // Опасные природные явления на поверхности суши: механизмы и катастрофические следствия / Отв. редактор В.М. Котляков. М.: Изд-во Ин-та географии РАН, 2008. С. 124–147.
- Найденев В.И. Нелинейная динамика поверхностных вод суши. М.: Наука, 2004. 384 с.
- Нежиковский Р.А. Наводнения на реках и озерах. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 184 с.
- Сванидзе Г.Г. Математическое моделирование гидрологических рядов. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 311 с.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Ю.Г. Гатинский, Д.В. Рундквист, Г.Л. Власова, Т.В. Прохорова</i> СЕЙСМО-ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГЛАВНЕЙШИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ РОССИИ И БЛИЖНЕГО ЗАРУБЕЖЬЯ	13
<i>В.И. Осипов, Н.И. Фролова, С.П. Суцев, В.И. Ларионов</i> ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО И ПРИРОДНОГО РИСКА ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ И ТЕРРИТОРИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	28
<i>В.И. Величкин, Б.П. Власов, М.В. Шумилин</i> ОСНОВНЫЕ ПРОМЫШЛЕННО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БЫВШЕГО СССР И РОССИИ	49
<i>С.А. Дмитриев, В.И. Величкин, Б.И. Омеляненко</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЖИДКИХ ОТХОДОВ НИЗКОГО И СРЕДНЕГО УРОВНЕЙ РАДИОАКТИВНОСТИ	64
<i>В.И. Величкин, В.И. Мальковский, Н.Н. Тарасов, Ю.П. Диков</i> АНАЛИЗ УСЛОВИЙ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ В РАЙОНЕ ОЗЕРА КАРАЧАЙ (ЧЕЛЯБИНСКАЯ ОБЛАСТЬ)	77
<i>Б.И. Омеляненко, В.И. Величкин, С.В. Юдинцев</i> ПОВЕДЕНИЕ АКТИНИДОВ В УСЛОВИЯХ ДОЛГОСРОЧНОГО ХРАНЕНИЯ И ЗАХОРОНЕНИЯ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА	86
<i>С.В. Юдинцев, Б.И. Омеляненко</i> ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТЕХНЕЦИЯ	99
<i>И.Н. Солодов, А.К. Лисицин</i> ПОЛИЭЛЕМЕНТНЫЕ ЭКЗОГЕННЫЕ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА: ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ И МЕТАЛЛЫ, ИЗВЛЕКАЕМЫЕ СЕРНОКИСЛОТНЫМ ПОДЗЕМНЫМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ	109
<i>В.А. Петров, В.В. Полуэктов, Р.М. Насимов, А.А. Бурмистров, С.И. Щукин, Й. Хаммер</i> ИЗУЧЕНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА УРАНОВОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ В ГРАНИТАХ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОЯТ	124
<i>В.М. Котляков, Л.Н. Васильев, М.Ю. Москалевский</i> БАЛАНС МАССЫ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЛЕДНИКОВОГО ПОКРОВА	139

<i>Ю.Я. Мачерет, А.Ф. Глазовский, И.И. Лаврентьев</i> ВОДА В ПОЛИТЕРМИЧЕСКИХ И ТЕПЛЫХ ЛЕДНИКАХ	152
<i>В.Н. Михаленко, С.С. Кутузов, О.В. Нагорнов, С.А. Тюфлин, И.И. Лаврентьев, С.А. Марченко, В.И. Окопный</i> СТРАТИГРАФИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ФИРНОВО-ЛЕДЯНОЙ ТОЛЩИ НА ЗАПАДНОМ ПЛАТО ЭЛЬБРУСА	180
<i>Ю.П. Масуренков, А.Л. Собисевич</i> ЭЛЬБРУССКОЕ ОЛЕДЕНЕНИЕ – ИНДИКАТОР ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО И ФЛЮИДНОГО СОСТОЯНИЯ ВУЛКАНА	189
<i>А.Н. Хименков, Г.З. Перльштейн, Д.О. Сергеев, А.Н. Власов, В.П. Мерзляков, Ю.В. Халилова</i> ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ РИСКА ОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ	205
<i>Е.В. Коротеева, Е.И. Вейсберг, Н.Б. Куянцева, С.А. Лесина</i> ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИКУ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ВОСТОЧНЫХ ПРЕДГОРИЙ ЮЖНОГО УРАЛА	213
<i>А.Ю. Кудеярова</i> ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНЫХ СОРБЦИОННЫХ БАРЬЕРОВ ПРИ ЗАФОСФАЧИВАНИИ КИСЛЫХ ПОЧВ	223
<i>И.В. Галицкая, И.А. Позднякова, Л.С. Томс</i> МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ПРОГНОЗА И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОПРИРОДНЫМ ГЕОХИМИЧЕСКИМ РИСКОМ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ	239
<i>Л.С. Кучмент, А.Н. Гельфан</i> СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ И ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МАСШТАБОВ И РИСКА КАТАСТРОФИЧЕСКИХ НАВОДНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА	252
<i>В.В. Адушкин, П.П. Фирстов</i> ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ И ИХ ПРОЯВЛЕНИЕ В ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ В АТМОСФЕРЕ	264
<i>А.Ю. Озеров</i> МЕХАНИЗМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ФОНТАНИРОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ВУЛКАНОВ (ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ И ПРИРОДНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ)	279
<i>О.В. Руденко, А.Л. Собисевич, Л.Е. Собисевич</i> О ФИЗИКЕ АКУСТИЧЕСКИХ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ И МЕДЛЕННЫХ ВОЛНАХ В ГРАНУЛИРОВАННОЙ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ	299
<i>В.Н. Николаевский</i> ОЧАГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ – СОБЫТИЯ И ПРЕДВЕСТНИКИ УДАРА	316
<i>Б.В. Левин, Г.В. Шевченко, В.М. Кайстренко, Т.Н. Ивельская, Т.К. Пинегина, Н.Г. Разжигаева</i> ПРОБЛЕМА ЦУНАМИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ (ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ АСПЕКТ)	332
<i>В.А. Семенов, И.И. Мохов, М. Латиф</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В РЕГИОНАХ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ	355

Ю.Н. Авсюк, А.Л. Собисевич

ПРИЛИВНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯ – ЛУНА – СОЛНЦЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЗЕМЛИ	373
--	-----

В.Ч. Хон, И.И. Мохов

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА К ИЗМЕНЕНИЮ ОРБИТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И КОНЦЕНТРАЦИИ АНТРОПОГЕННЫХ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ	392
---	-----

*В.М. Григорьев, Л.В. Ермакова, А.В. Мордвинов, Ю.А. Наговицын, А.Г. Тлатов,
В.Г. Иванов, Е.В. Милецкий, Е.Ю. Наговицына, А.И. Хлыстова, С.А. Язев*

ВОЗНИКНОВЕНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ, ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО ГЛОБАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В 11-ЛЕТНЕМ ЦИКЛЕ И НА ДЛИТЕЛЬНОЙ ШКАЛЕ ВРЕМЕНИ	399
---	-----

С.И. Сороко, В.П. Рожков, Е.Г. Сергеева, С.С. Бекшаев, С.С.Андреева, И.В.Николаев

ОСОБЕННОСТИ MORFOFУНКЦИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ И ГЕМОДИНАМИКИ МОЗГА У ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ В УСЛОВИЯХ ЕВРОПЕЙСКОГО И ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО СЕВЕРА	413
---	-----

Научное издание

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КАТАСТРОФЫ

В 2 томах

Том 2

ГЕОЛОГИЯ УРАНА, ГЕОЭКОЛОГИЯ, ГЛЯЦИОЛОГИЯ

*Печатается по решению Научного совета Программы
фундаментальных исследований президиума РАН № 4*

Ответственный составитель д.ф.-м.н. *Собисевич Алексей Леонидович*

Технический редактор *В.И. Горбенко*
Компьютерная верстка *К.А. Мордвинцев*
Корректор *С.Б. Сулова*

Подписано в печать 05.09.11. Формат 60×90/8
Гарнитура Таймс. Бумага мелованная. Печать офсетная
Усл. печ. л. 54. Тираж 200 экз.

ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН
123995 ГСП-5, Д-242, Москва, ул. Б. Грузинская, 10

Отпечатано в типографии издательства «ПРОБЕЛ 2000»
109544 Москва, ул. Рабочая, 91