

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ГИДРОЛОГИИ СУШИ

УДК 556.06

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЗАТОПЛЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА¹

© 2023 г. И. Н. Крыленко^{a, b, *}

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
географический факультет, Москва, 119991 Россия

^bИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: krylenko_i@mail.ru

Поступила в редакцию 28.09.2022 г.

После доработки 02.12.2022 г.

Принята к публикации 13.01.2023 г.

Представлена методика гидродинамического моделирования характеристик затопления пойм с учетом сценариев изменения климата на основе результатов численных экспериментов с моделью формирования речного стока при использовании результатов ансамблевых расчетов по глобальным климатическим моделям. Модельные расчеты выполнены на основе российских программных комплексов ECOMAG и STREAM_2D. Для ключевого участка р. Лены у г. Якутска (г.п. Табага) расчеты по всем сценариям и моделям диагностируют возможное увеличение стока к середине XXI в. и обусловленное ростом стока увеличение площадей и глубин затопления на 9–15%.

Ключевые слова: численное моделирование, формирование стока, гидродинамика, затопление, изменения климата, ECOMAG, STREAM_2D.

DOI: 10.31857/S0321059623040156, **EDN:** QIYBWH

ВВЕДЕНИЕ

В регионах, где под воздействием климатических изменений ожидается рост стока [2], одним из негативных последствий становится увеличение количества и масштабов наводнений, что требует заблаговременной адаптации всей хозяйственной инфраструктуры в речных долинах. Ключевая проблема при разработке методов оценки изменений характеристик водного режима при изменениях климата — существенная разномасштабность исследуемых процессов [6]. Так, климатические изменения оцениваются на основе глобальных моделей циркуляции атмосферы и океана, так как только они позволяют рассматривать основные возможные сценарии радиационного воздействия [9]. Только в последнее десятилетие пространственное разрешение глобальных и связанных с ними региональных климатических моделей стало достаточным для использования их данных для моделирования на основе региональных гидрологических моделей с удовлетворительным качеством [6]. Региональные гидрологические модели

позволяют оценить изменения стока в любом створе исследуемого речного бассейна, однако для перехода к более детальным оценкам характеристик наводнений, включая зоны затопления и другие характеристики потока на конкретных участках речной сети, они должны дополняться моделями движения водного потока. Несмотря на очевидные преимущества в детальности получаемых оценок, ввиду большой ресурсоемкости двумерных гидродинамических моделей для долгосрочных прогнозов часто используются упрощенные одномерные и квази-двумерные модели либо проводятся упрощенные расчеты с учетом только наиболее выдающихся наводнений.

Представлены разработанная автором методика применения моделей гидрометеорологического цикла начиная от получения определяющих водный режим территории исходных метеорологических данных на основе глобальных моделей циркуляции атмосферы, являющихся исходными данными для моделирования процессов формирования стока на водосборе и поступления воды в речную сеть, и дальнейший анализ условий движения воды на конкретных участках речной сети на основе двумерной гидродинамической модели. За основу расчетов взяты широко распространенные и успешно применяемые в России модель формирования стока ECOMAG (автор Ю.Г. Мо-

¹ Работа выполнена по госзаданию кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ, раздел I.10 (ЦИТИС 121051400038-1 — модельные расчеты), Института водных проблем РАН (FMWZ-2022-0001 — оценка изменений характеристик затопления на период климатического прогноза).

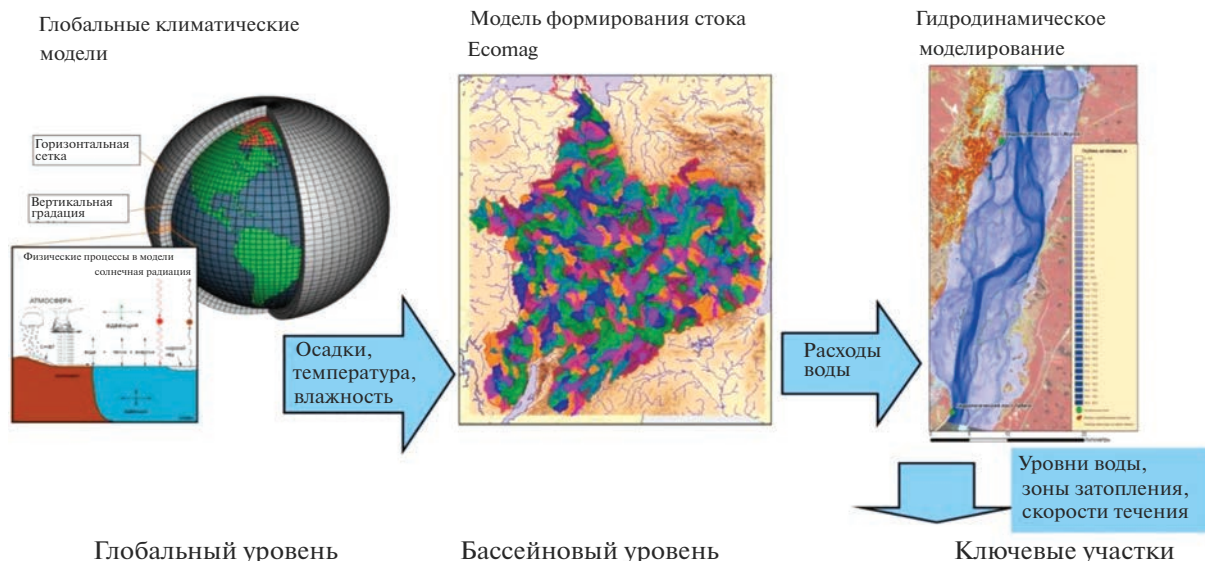


Рис. 1. Схема применения моделей гидрометеорологического цикла.

товилов) [4, 9] и двумерная гидродинамическая модель STREAM_2D (автор В.В. Беликов) [1, 5].

В качестве объекта исследования выбран участок р. Лены у г. Якутска. Это наиболее освоенный участок р. Лены со значительными изменениями стока [6], в его пределах сосредоточены многочисленные инженерные и водохозяйственные объекты, для безопасного функционирования которых необходимо учитывать особенности водного режима реки. На рассматриваемом участке р. Лены протяженностью 75 км находятся три гидрологических поста. В верхнем течении расположен расходный пост Табага, замыкающий часть бассейна р. Лены площадью 897000 км². В средней части исследуемого участка расположен водомерный пост г. Якутск. Нижняя граница находится у водомерного поста Кангалассы.

МЕТОДИКА

Предлагаемый подход основан на совместном моделировании процессов формирования стока на основе модели ECOMAG, в качестве входных данных для которой используются данные как метеорологических станций, так и реанализов (WATCH и WFDEI), и моделей циркуляции атмосферы проекта CMIP5 (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, NorESM1-M), в том числе на период климатического прогноза в XXI в. с учетом различных сценариев эмиссии парниковых газов. Полученные на основе модели формирования стока многолетние ряды расходов воды — входные данные для двумерной гидродинамической модели STREAM_2D (рис. 1). Привлечение двумерной модели суще-

ственно расширяет количество определяемых на основе разрабатываемой методики характеристик затопления, определяющих гидрологическую опасность: площадь, средняя глубина, скорость течения, продолжительность затопления, интенсивность потока, — и позволяет получить оценки данных характеристик на период климатического прогноза.

Следует отметить, что оценки изменений стока в бассейне р. Лены базируются на результатах адаптации модели ECOMAG для задач климатического прогноза стока, полученных в предыдущие годы с участием автора настоящей статьи [6]. Также всестороннюю проверку на основе натурных материалов и космических снимков прошла гидродинамическая модель ключевого участка р. Лены у г. Якутска [3, 7]. Поэтому в данном случае опустим описание этапов адаптации моделей к реальным объектам (подготовка информационного обеспечения моделей, выполнения процедур калибровки параметров и валидации моделей), представленное в более ранних статьях, и более подробно остановимся именно на проведении модельных расчетов на основе гидродинамической модели по данным модели формирования стока с учетом климатического прогноза.

Модельные расчеты на основе гидродинамической модели были организованы следующим образом: в годовом разрезе моделирование проводилось только за периоды, в которые происходит затопление пойм, при этом было учтено, что поймы р. Лены могут значительно затопливаться и в летний период при паводках, поэтому гидродинамическое моделирование за каждый год проводилось с 1 мая по 30 сентября. В качестве базо-

вого исторического периода был выбран 20-летний период — с 1982 по 2001 г. Для этого периода на основе предварительно прошедшей калибровки и верификацию гидродинамической модели [3, 7] проведена серия расчетов с учетом следующих вариантов граничных условий на верхних границах гидродинамической модели:

фактические ряды расходов воды;

расходы воды, полученные на основе расчетов по модели ECOMAG по данным реанализа WATCH [10] (так как именно на эту базу данных были настроены климатические модели и с ее использованием проведена адаптация модели ECOMAG для расчетов по климатическим моделям);

расходы воды, полученные по модели ECOMAG при моделировании на основе данных климатических моделей GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM.

Отметим, что даже с использованием наиболее современной версии программного комплекса STREAM_2D CUDA с распараллеленными вычислениями на видеокарте моделирование каждого варианта за 20-летний период с суточным шагом требует >2 сут машинного счета, таким образом решаемая задача — весьма ресурсоемкая. Это обусловило выбор базового 20-летнего расчетного периода вместо наиболее часто используемого в климатических прогнозах 30-летнего базового периода.

Для климатического прогноза характеристик затопления был рассмотрен 20-летний период — 2046–2065 гг., в качестве граничных условий на верхней границе гидродинамической модели использовались гидрографы стока, полученные по модели ECOMAG при моделировании на основе данных климатических моделей GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM для двух сценариев эмиссии парниковых газов — rcp2.6 и rcp8.5. Далее полученные результаты моделирования на каждом расчетном шаге осреднялись по расчетной области и отдельно по пойме, что позволило получить осредненный временной ход характеристик затопления (площадей, средних глубин, скоростей течения) с суточным шагом, а также по периодам, что стало основой для анализа возможных изменений характеристик затопления на период климатического прогноза. Для определения возможных аномалий характеристик затопления на середину XXI в. полученные за период климатического прогноза результаты сравнивались с расчетами за исторический период, полученные по расчетам с использованием этих же моделей.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ЗА ИСТОРИЧЕСКИЙ ПЕРИОД

В результате моделирования с использованием полученных с помощью модели ECOMAG расходов воды на основе реанализа WATCH получено хорошее совпадение смоделированных и фактических уровней воды по гидрологическим постам Якутск и Табага за 1982–2001 гг. без дополнительной калибровки гидродинамической модели относительно калибровки, проведенной до этого на фактических данных. Критерий соответствия Нэша—Сатклифа смоделированных и наблюдаемых суточных уровней воды при использовании в качестве граничных условий расходов, рассчитанных по модели ECOMAG на основе реанализа WATCH, составляет 0.88 для обоих постов (рис. 2).

Анализ гидрографов, используемых для гидродинамического моделирования за исторический период 1982–2001 гг., показал, что все варианты граничных условий, задаваемых на основе результатов моделирования по модели ECOMAG на основе различных метеорологических входов (реанализа WATCH и четырех климатических моделей), обеспечивают хорошее воспроизведение средних максимальных расходов воды за исторический период. Это обуславливает хорошее совпадение смоделированных на основе этих данных средних максимальных характеристик затопления (глубины, скорости, площади затопления) по сравнению с результатами моделирования на основе фактических расходов воды, относительные ошибки осредненных за исторический период максимальных значений характеристик затопления в основном $\geq 5\%$. Исключение представляют результаты моделирования на основе данных модели IPSL, превышающей среднемноголетний максимальный расход за исторический период на 12%, что приводит к относительным ошибкам средних многолетних глубин и площади затопления пойм на 13 и 7% соответственно (табл. 1).

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАТОПЛЕНИЯ НА ПЕРИОД КЛИМАТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА

Анализ входных гидрографов на середину XXI в. (2046–2065 гг.) показывает, что расчеты по всем климатическим моделям для створа Лена—Табага диагностируют увеличение максимальных расходов воды половодья и смещение половодья на более ранние сроки. В среднем по ансамблю моделей на середину XXI в. получено увеличение средних многолетних максимальных расходов воды половодья от 12% при сценарии изменения климата rcp2.6 до 20% при наиболее жестком сценарии rcp8.5. Наименьшие аномалии средних максимальных расходов воды получены при расчетах по данным модели GFDL-ESM2M: от 2% при

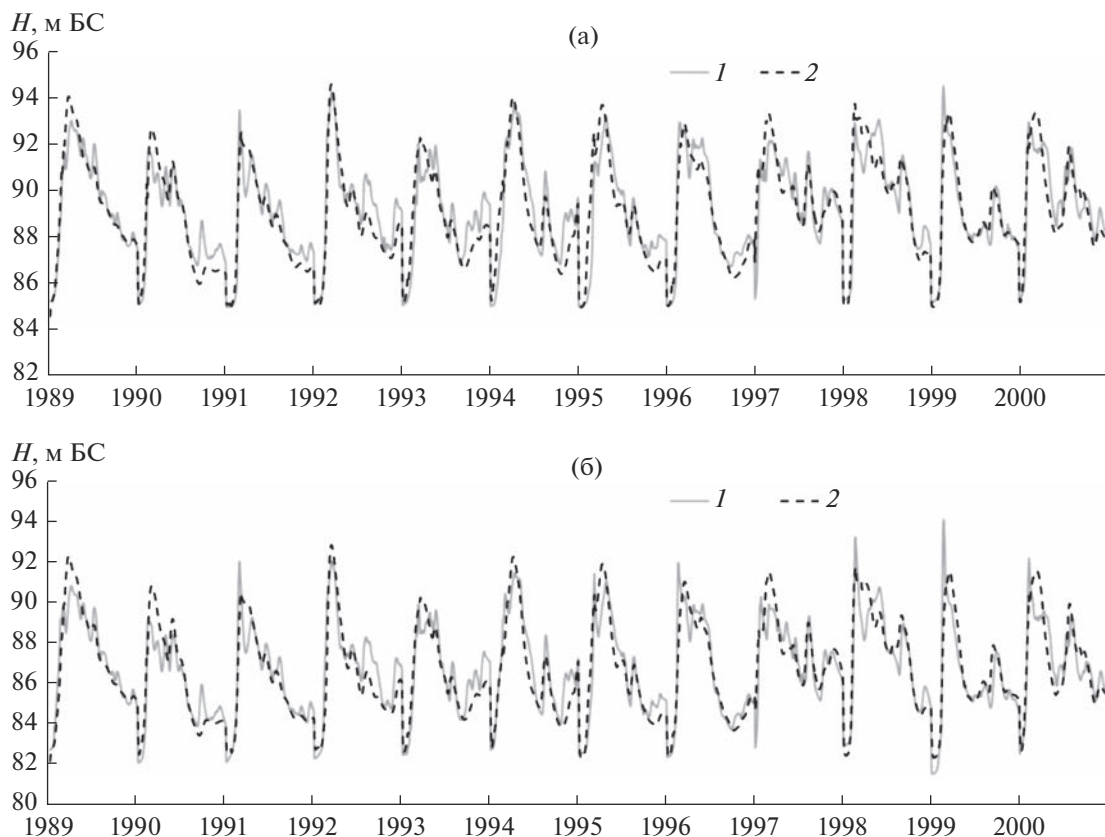


Рис. 2. Ход уровней по постам Лена–Табага и Лена–Якутск: 1 – фактический, 2 – смоделированный на основе гидродинамической модели STREAM_2D при использовании в качестве верхнего граничного условия расходов воды из модели ECOMAG на основе метеорологических данных реанализа WATCH.

сценарии гср2.6 до 12% при сценарии гср8.5, наибольшие (увеличение до 28%) – при расчетах по данным климатической модели IPSL-CM5A-LR для сценария гср8.5.

По результатам гидродинамического моделирования на основе модели STREAM_2D с использованием данных о расходах воды на период климатического прогноза из модели ECOMAG показывает, что на ключевом участке р. Лены у г. Якутска практически для всех сценариев и входных данных из различных моделей ожидается рост средних максимальных и среднегодовых площадей, глубин затопления и скоростей течения на пойме, обусловленный ростом расходов воды. Увеличение площади затопления пойм для наиболее мягкого сценария гср2.5 – в среднем 9%, для наиболее жесткого сценария гср8.5 – в среднем 15% (рис. 3), средние максимальные глубины затопления пойм увеличиваются на 14 и 25% для сценариев гср2.5 и гср8.5 соответственно (табл. 2).

Увеличение расходов воды и соответствующих им площадей и глубин затопления для ключевого участка у г. Якутска, однозначно диагностируемое по всем расчетным сценариям и моделям,

может привести к увеличению опасности затопления жилых кварталов Якутска, Нижнего Бестяха и других сельских населенных пунктов и ферм, к интенсификации разрушения мерзлоты в русле и на берегах. Это потребует дополнительных работ по инженерной защите населенных пунктов. При проектировании инфраструктуры на поймах и в русле р. Лены необходимо учитывать возможное увеличение стока и соответствующих ему характеристик затопления.

Дальнейшие исследования на данном участке должны быть связаны с оценкой влияния изменений климата на расходы редкой обеспеченности, повторяемость ледовых заторов, изменения в тенденциях русловых процессов, однако каждый из перечисленных вопросов – предмет отдельного большого исследования и выходит за рамки данной статьи.

ВЫВОДЫ

Представлена методика моделирования характеристик затопления с учетом климатических прогнозов на основе комплекса моделей гидрометеорологического цикла, включая моделирова-

Таблица 1. Среднегодовые максимальные расходы воды и характеристики затопления за исторический период 1982–2001 гг. р. Лены у г. Якутска при моделировании по гидродинамической модели STREAM_2D с использованием величин расхода воды, полученных на основе модели ECOMAG по данным реанализа и глобальных климатических моделей

Исходные данные	Средний максимальный расход воды, м ³ /с	Характеристики затопления					
		вся область			пойма		
		глубина, м	скорость, м/с	площадь, км ²	глубина, м	скорость, м/с	площадь, км ²
Факт	36125	4.91	0.92	644	2.48	0.25	400
ECOMAG_WATCH	34281	4.80	0.90	636	2.38	0.23	392
ECOMAG_Hadgem	36691	4.97	0.92	643	2.54	0.25	399
ECOMAG_IPSL	40537	5.14	0.92	673	2.80	0.27	429
ECOMAG_GDFL	34481	4.87	0.92	624	2.37	0.24	380
ECOMAG_MIROC	36102	4.90	0.91	642	2.47	0.24	399
Относительная ошибка при сравнении с моделированием по фактическим данным о расходах воды, %							
ECOMAG_WATCH	–5.1	–2.4	–2.0	–1.3	–3.9	–5.0	–1.9
ECOMAG_Hadgem	1.6	1.2	–0.6	–0.2	2.3	0.9	–0.3
ECOMAG_IPSL	12.2	4.7	0.1	4.5	12.9	8.5	7.2
ECOMAG_GDFL	–4.6	–0.8	–0.6	–3.2	–4.3	–3.8	–4.9
ECOMAG_MIROC	–0.1	–0.3	–0.7	–0.3	–0.3	–2.0	–0.4

ние процессов формирования стока по данным глобальных климатических моделей (ИМК ECOMAG) и дальнейшее использование полученных рядов стока для детальной оценки характеристик затопления за многолетний период с применением гидродинамической модели (STREAM_2D).

На примере ключевого участка р. Лены у г. Якутска показано, что на основе сквозного расчета с использованием в качестве верхнего граничного условия для двумерной гидродинамиче-

ской модели гидрографов, полученных по модели ECOMAG на основе метеорологических данных реанализа WATCH, можно получить хорошее соответствие смоделированных и фактических уровней воды за многолетний период в ключевых створах с суточным шагом.

Получено хорошее совпадение смоделированных средних максимальных характеристик затопления (глубины, скорости, площади затопления) с использованием граничных условий, задаваем-

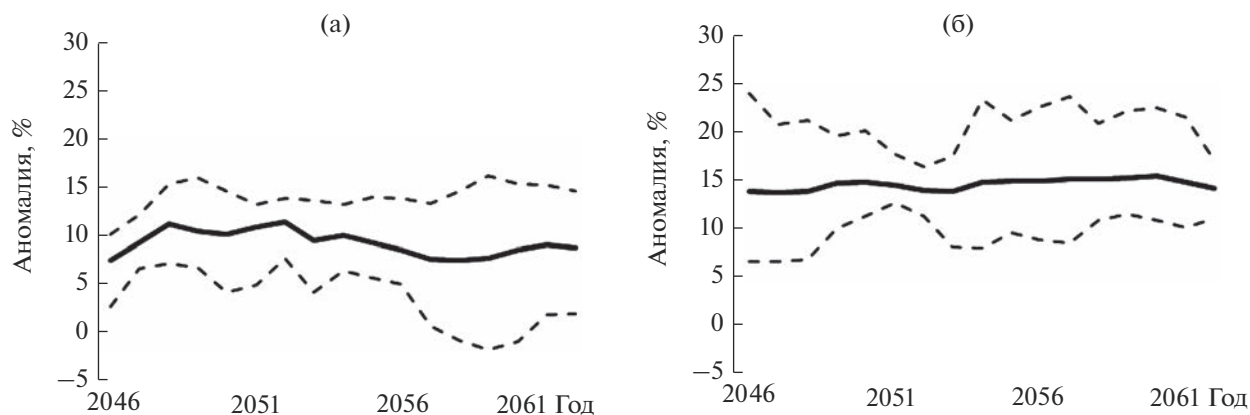


Рис. 3. Относительные аномалии изменений средней максимальной площади затопления пойм (скользящее среднее за 5 лет) на период климатического прогноза 2046–2065 гг. по сравнению с современным периодом (1982–2001 гг.) для ключевого участка р. Лены при сценариях изменения климата: а – rcp2.5, б – rcp8.5.

Таблица 2. Аномалии характеристик затопления на период климатического прогноза 2045–2065 гг. для р. Лены у г. Якутска при моделировании по гидродинамической модели STREAM_2D на основе величин расходов воды, полученных по модели ECOMAG при использовании результатов ансамблевых расчетов по глобальным климатическим моделям

Исходные данные	Средний максимальный расход воды, м ³ /с	Характеристики затопления					
		вся область			пойма		
		глубина, м	скорость, м/с	площадь, км ²	глубина, м	скорость, м/с	площадь, км ²
rcp2.5							
ECOMAG_Hadgem	14.4	7.5	−1.5	7.0	17.8	14.9	10.5
ECOMAG_IPSL	11.3	7.1	−2.0	5.2	13.8	12.9	7.7
ECOMAG_GDFL	1.8	−0.1	−3.2	3.6	2.7	1.0	5.6
ECOMAG_MIROC	18.8	10.2	−2.0	8.2	22.9	20.1	12.8
Среднее	11.6	6.2	−2.2	6.0	14.3	12.2	9.2
rcp8.5							
ECOMAG_Hadgem	20.0	10.5	−1.5	9.1	24.6	19.2	14.1
ECOMAG_IPSL	28.1	19.3	−1.5	13.8	38.3	25.0	21.2
ECOMAG_GDFL	12.7	5.0	−2.6	7.7	15.7	12.1	12.0
ECOMAG_MIROC	19.6	10.9	−1.8	8.3	24.3	21.2	12.9
Среднее	20.1	11.4	−1.8	9.7	25.7	19.4	15.0

мых по результатам моделирования по модели ECOMAG на основе различных метеорологических входов (реанализа WATCH и четырех климатических моделей), с результатами моделирования на основе фактических расходов воды. Относительные ошибки осредненных за исторический период максимальных значений характеристик затопления $\leq 10\%$.

На ключевом участке р. Лены у г. Якутска к середине XXI в. возможен рост площадей и глубин затопления, связанный с прогнозируемым увеличением стока, полученным на основе ансамблевых расчетов по данным климатических моделей, на величину от 9 до 15%. При любом проектировании необходимо учитывать возможное увеличение стока и соответствующих ему характеристик затопления. Дополнительное внимание должно быть уделено инженерной защите населенных пунктов и инфраструктуры на поймах от наводнений, уточнению высотных отметок гребней сооружений и оценке их эксплуатационного состояния, а также повышению готовности населения к действиям в период паводковой опасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беликов В.В., Алексюк А.И.* Модели мелкой воды в задачах речной гидродинамики. М.: РАН, 2020. 346 с.
2. *Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М.* Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // *Фундаментал. и приклад. климатология*. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79.
3. *Корнилова Е.Д., Крыленко И.Н., Головлев П.П., Сазонов А.А., Никитский А.Н.* Верификация двумерной гидродинамической модели р. Лены у г. Якутск по разновременным данным космической съемки // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 5. С. 169–178 <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-169-178>
4. *Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с.
5. *Aleksyuk A.I., Belikov V.V.* The uniqueness of the exact solution of the Riemann problem for the shallow water equations with discontinuous bottom // *J. Computational Physics*. 2019. V. 390. P. 232–248. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.04.001>

6. *Gelfan A., Kalugin A., Krylenko I., Nasonova O., Gusev Y., Kovalev E.* Does a successful comprehensive evaluation increase confidence in a hydrological model intended for climate impact assessment? // *Climatic Change*. 2020. V. 163. P. 1165–1185.
<https://doi.org/10.1007/s10584-020-02930-z>
7. *Golovlyov P., Kornilova E., Krylenko I., Belikov V., Zavadskii A., Fingert E., Borisova N., Morozova E.* Numerical modeling and forecast of channel changes on the river Lena near city Yakutsk // *Proc. Int. Association Hydrol. Sci.* 2019. V. 381. P. 65–71.
<https://doi.org/10.5194/piahs-381-65-2019>
8. *Motovilov Y., Gottschalk L., Engeland K., Rodhe A.* Validation of a distributed hydrological model against spatial observations // *Agric. For. Meteorol.* 1999. V. 98–99. P. 257–277.
[https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00102-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00102-1)
9. *Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A.* An overview of CMIP5 and the experiment design. // *Bull. Am. Meteor. Soc.* 2012. V. 93. P. 485–498.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
10. *Weedon G.P., Balsamo G., Bellouin N., Gomes S., Best M.J., Viterbo P.* The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data. // *Water Resour. Res.* 2014. № 50. P. 7505–7514.
<https://doi.org/10.1002/2014WR015638>