

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
Федеральное государственное бюджетное учреждение
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Экстремальные паводки в бассейне Амура: гидрологические аспекты

Под редакцией
В.Ю. Георгиевского

Санкт-Петербург
2015

УДК 556.535.5

ББК 26.22.5

Экстремальные паводки в бассейне Амура: гидрологические аспекты / Сб. работ по гидрологии / под ред. Георгиевского В.Ю., ФГБУ «ГТИ», СПб, ООО «ЭсПэХа», 2015.- стр.171.

Рассматривается история амурских наводнений и причины их возникновения. Анализируются факторы формирования исторического паводка 2013 г., динамика его прохождения по рекам бассейна, последствия наводнения. Приводятся материалы исследований ГТИ непосредственно в период паводка 2013 г., включая натурные наблюдения. Анализируются гидрологические и гидроморфологические особенности формирования высоких уровней воды Амура у Благовещенска, Хабаровска и Комсомольска-на-Амуре. Дается гидрологическая оценка противопаводковой роли Зейского водохранилища. Приводятся результаты статистического анализа максимальных расходов и наивысших уровней воды с учетом исторического паводка 2013 г. Приводится методика прогноза максимальных заторных уровней воды р. Амур. Рассматриваются вероятные изменения стока в бассейне р. Амур на ближайшие десятилетия на основе климатических моделей.

Сборник может представить интерес для специалистов в области гидрологии и гидротехники – научных работников, инженеров–проектировщиков, экологов, а также студентов и аспирантов в данной области знания.

Extreme floods in the Amur River basin: hydrological aspects. Papers on hydrology / Ed. V.Ju. Georgievsky, FSBI "SHI", St. Petersburg, SPH, 2015.- page 171.

Extreme floods in the Amur River basin: hydrological aspects. Papers on hydrology / Ed. V. Yu. Georgievskiy, FSBI "SHI", St. Petersburg, SPH, 2015.- page 171.

The publication considers the history and causes of floods in the Amur River basin. Analysed are the factors which contributed to the occurrence of the unprecedented flood in 2013, the dynamics of its propagation throughout the basin and the consequences. The research results used are those collected by SHI in the course of the 2013 flood including field data. Analysed are the hydrological and hydromorphological features of high water levels in the Amur River near Blagoveshchensk, Khabarovsk and Komsomolsk-on-Amur. The flood-proofing efficiency of the Zeya Reservoir and its influence on the 2013 flood are analysed from the hydrological point of view. The results of the statistical analysis of peak discharges and stages taking account of the record flood in 2013 are given. A technique for forecasting maximum ice-jam stages on the Amur River is proposed. Possible changes in runoff from the Amur River basin in the coming decades are considered based on climate models.

This publication can be of interest to professionals working in the areas of hydrology and hydraulic engineering – researches, design engineers, environmental scientists, as well as to students, both undergraduate and postgraduate.

Extreme floods in the Amur River basin: hydrological aspects. Papers on hydrology / Ed. V.Yu. Georgievskiy, FSBI "SHI", St. Petersburg, SPH, 2015.- page 171.

ISBN 978-5-944321-40-4

© Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Государственный гидрологический институт»
© Оформление ООО «ЭсПэХа»

ПРЕДИСЛОВИЕ

В июле-сентябре 2013 г. в бассейне р. Амур произошло катастрофическое наводнение, по своим масштабам и последствиям значительно превосходящее происходившие ранее за весь период наблюдений. Наводнение охватило весь район Среднего и Нижнего Амура, где практически повсеместно наблюдались рекордные отметки уровня воды, на 1,5-2 метра превышающие исторические максимумы. Огромный удар стихии пришелся на крупные промышленные города Дальневосточного федерального округа: на р. Амур у г. Хабаровска сформировался выдающийся максимальный расход воды, повторяемость которого оценивается как один раз в 200-250 лет; в районе г. Комсомольск-на-Амуре уровень воды превысил отметку опасного явления более чем на 2,5 метра.

Причиной экстремального паводка послужили интенсивные ливневые дожди, охватившие весь бассейн Амура на территории как Российской Федерации, так и Китая, и продолжавшиеся около двух месяцев. По данным наблюдений на метеорологических станциях Росгидромета количество выпавших в период паводка осадков в Амурской области, Еврейской АО и Хабаровском крае достигло или даже превысило годовую норму. Аналогичные осадки зафиксированы и на китайских метеостанциях в бассейне Амура.

В результате были частично затоплены территории многих населенных пунктов, включая крупные города Благовещенск, Хабаровск и Комсомольск-на-Амуре, обширные сельскохозяйственные угодья. Были затоплены тысячи жилых домов, многие из которых не подлежат восстановлению. Десятки тысяч людей были эвакуированы, многие потеряли жилье и имущество. По окончательной оценке МЧС России наводнение причинило прямой ущерб экономике страны на сумму 85-90 миллиардов рублей, а также косвенный – на 439 миллиардов рублей. Общая сумма ущерба от наводнения 2013 года составляет 527 миллиардов рублей. Не менее значительный ущерб был причинен северо-восточным провинциям Китая, где к тому же не обошлось и без человеческих жертв.

В Указе Президента Российской Федерации В.В.Путина от 31 августа 2013 г. № 693, в частности, было поручено «Правительству Российской Федерации совместно с Российской академией наук ... обеспечить проведение научных исследований экстремального паводка в бассейнах рек Амур, Зея, Буряя и Уссури в целях определения влияния изменений климата на гидрологический режим рек и установления новых требований к условиям обеспечения безопасности территорий и гидротехнических сооружений».

В настоящем сборнике приводятся результаты научных исследований, проведенных ФГБУ «ГГИ» при участии Дальневосточного УГМС и Департамента Росгидромета по ДФО в рамках выполнения Указа №693 и соответствующих поручений Правительства Российской Федерации, а также ФЦП «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах».

Рассматривается история амурских наводнений и причины их возникновения. Анализируются факторы формирования исторического паводка 2013 г., динамика его прохождения по рекам бассейна, последствия наводнения. Приводятся материалы исследований ГГИ при участии Дальневосточного УГМС и Департамента Росгидромета по ДФО непосредственно в период паводка 2013 г., включая натурные наблюдения.

Анализируются гидрологические и гидроморфологические особенности формирования высоких уровней воды Амура у Благовещенска, Хабаровска и Комсомольска-на-Амуре. Дается гидрологическая оценка противопаводковой роли Зейского водохранилища.

Приводятся результаты статистического анализа максимальных расходов и наивысших уровней воды с учетом исторического паводка 2013 г. Приводится методика прогноза максимальных заторных уровней воды р. Амур. Рассматриваются вероятные изменения стока в бассейне р. Амур на ближайшие десятилетия на основе климатических моделей.

Сборник может представить интерес для специалистов в области гидрологии и гидротехники – научных работников, инженеров–проектировщиков, экологов, а также студентов и аспирантов в данной области знания.

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ПАВОДКИ В БАССЕЙНЕ РЕКИ АМУР В XIX–XX СТОЛЕТИЯХ

Грек Е.А., Иванов В.А., Молчанова Т.Г.

ФГБУ «ГГИ», Санкт-Петербург. elena_greck@mail.ru

Приводится информация о выдающихся наводнениях в бассейне реки Амур в XIX–XX столетиях, данные о наивысших уровнях воды и максимальных расходах воды за весь период наблюдений, описания отдельных наводнений на основе сведений, опубликованных в печатных изданиях XIX и XX веков

Приамурье хорошо известно своими частыми наводнениями. Сильные паводки с достижением и превышением опасных отметок (ОЯ) уровня воды имеют повторяемость 1 раз в 10-20 лет на Верхнем Амуре, 1 раз в 7-8 лет на Среднем Амуре и 1 раз в 12-15 лет на Нижнем Амуре (рисунок 1). Колебания уровня в русле реки относительно межи достигают от 10-15 м на Верхнем и Среднем Амуре до 6-11 м - на Нижнем Амуре.

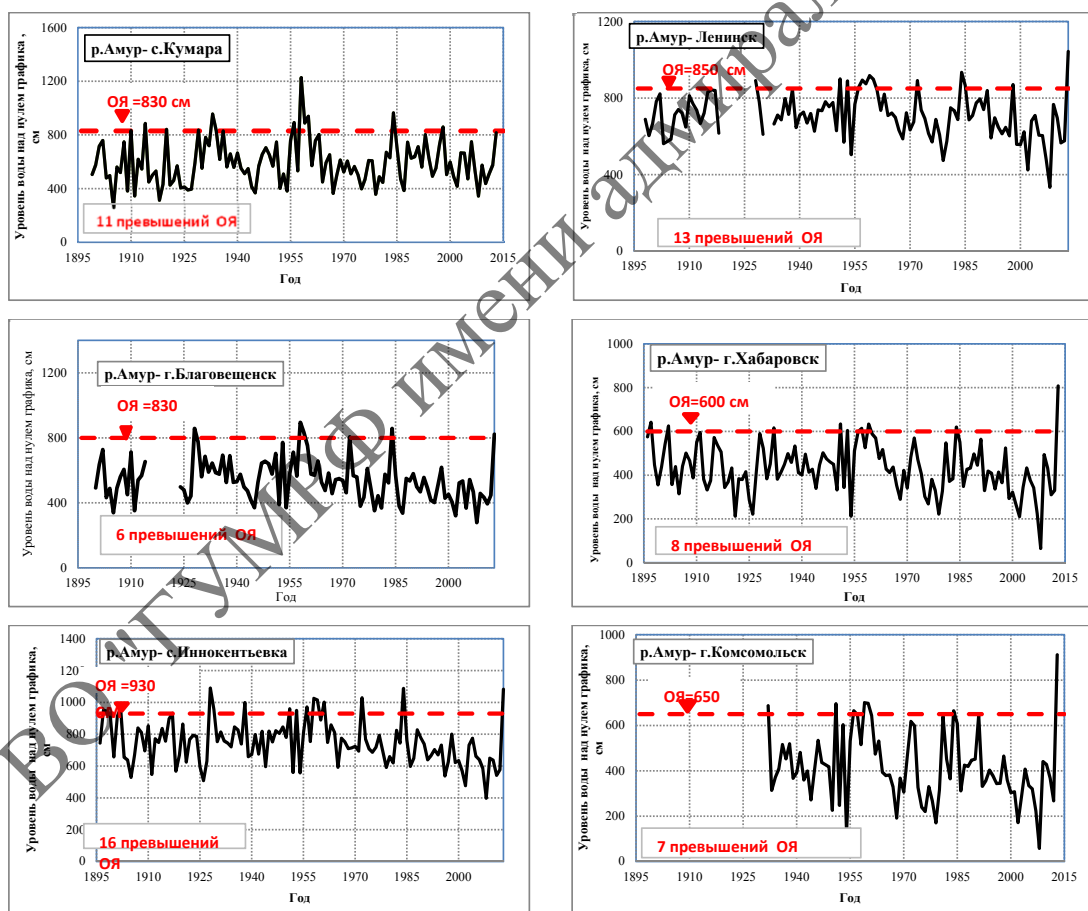


Рисунок 1 - Наивысшие уровни воды по гидрологическим постам на р. Амур и отметки ОЯ

Интенсивные дожди охватывают, как правило, ограниченные по площади районы и определяют наводнения на Верхнем Амуре или Зее и не во всех случаях - разливы Амура в Хабаровском крае. Если паводочные расходы на Зее и Верхнем Амуре превышают пропускную способность русла Амура ниже Благовещенска, то они могут являться причиной возникновения наводнений на Среднем и Нижнем Амуре. Когда на паводочную волну, идущую с Верхнего Амура, накладываются паводки на Бурее, Сунгари и Уссури и других притоках, наводнения могут иметь катастрофический характер с превышением отметок ОЯ на всем протяжении Амура.

1. Наводнения в XIX столетии и ранее

Письменные свидетельства катастрофических наводнений на Амуре появились еще в XVII веке. В **1681** году первые русские поселенцы остались без урожая, поскольку поля были затоплены водой. Через год произошло ещё одно наводнение и тоже с потерями.

Систематические наблюдения за уровнем воды в верхней части Амурского бассейна начаты в конце XIX века. Первые водомерные посты на Амуре были открыты в 1894 г. у селений Покровка и Черняево и на пер. Бекетовский. Сведения об исторических паводках наиболее полно представлены в работе Б.Д. Зайкова, где обобщены материалы Ф.Ф. Шперка, Г.Е. Грум-Гржимайло, А.Е. Назарова, А.Н. Пушечникова; использованы сведения, опубликованные в газетах «Санкт-Петербургские ведомости», «Сибирь», «Восточное обозрение», «Журнал министерства внутренних дел».

Наиболее значительные наводнения в XIX столетии отмечались в 1831, 1861, 1872, 1881, 1897 гг.

1831 год. В результате подъема воды на реках Аргунь, Шилка, Газимур, Унда и других, вызванного сильными дождями, с 19 по 21 мая было затоплено большинство населенных пунктов по берегам этих рек, в особенности на р. Аргунь. В соответствии с информацией, представленной в Журнале министерства внутренних дел за 1831 г (Журнал, 1931 г., ч. V) «После выпавшего в Нерчинском заводском округе, с 19 (1 мая) по 28 (10 мая) апреля, глубокого снегу и после бывшей за тем большой оттепели, пошел сильный дождь с утра 7 (19) мая и продолжался до полдня 9 (21) числа. Дождь сей согнал снег, глубоко лежавший на вершинах и склонах гор, и причинил всеобщее наводнение, гибель скоту и большой вред казне и всем жителям. Дороги испортились, мосты везде снесены и на некоторое время не было никакого сообщения. Бедствие же всех было живущих при реках: Газимуре, Шилке, Унде и Талунгуе и в особенности при р. Аргуне; ибо приток воды со всех сторон был так велик, что из старожилов никто такого наводнения не запомнит. Гибель от всего происшедшая тем бедственнее была, что прилив воды случился ночью на 9 (21) число и посему никто не мог ничего спасти из своего имущества. Во всех селениях совершенно потоплены дома, амбары с хлебом, магазины ..., расположенные по берегам р. Аргуни, и жилища по-

селян со всеми пристройками и имуществом; из известных селений затоплены реками: Аргунью, Аргунской волости деревни: Клинская, Булдуруйская, Усть-Серебрянка, Онохойская, Олоченская, Ключевская, Луговская, Имачинская, Аргунский острог и селение Чайбучинского кожевенного завода; Ундою и Талангуем, Ундинской волости деревни: Купрякова, Шелопушна, Кавыкучинская, Баншикова, Коровина, Тергенская, Козакова, Ундинская слобода, Колобова, Верхяшнская, Грובה, Жаравлева и Верхильдиканская; Городищенской волости, деревни: Семенова, Матусова, Какуйская, Ложникова, Верхнегалгате́йская и Новотроицкая слобода; Газимуром затоплены заводы Александровский и Газимурский, деревни Трубачева и Бунская.

Тем же наводнением речек, несмотря на все принятые предосторожности, размыло заводские плотины и русла в Кутомарском, Екатерининском, Александровском и Дучарском заводах, отчего и плавильное действие, до исправления, остановилось».

1861 год. Большое наводнение в бассейне Амура произошло в 1861 году. Вода, вышедшая из берегов, затопила пашни, покосы, поселения. Уровень воды у Благовещенска поднялся на 10 м.

Подъем воды на р. Зе́е начался 10 июля и 13 июля составил 747 см относительно своего среднего уровня, затопив покосы и огороды в селениях, расположенных на правом берегу Зеи; особенно сильно пострадало Белогорье. В августе было зафиксировано два подъема воды: с 20 по 26 августа и с 31 августа по 10 сентября; к этой воде присоединилась еще довольно значительная вода, шедшая с верховьев Амура, вследствие чего в некоторых местах на Амуре, лежащих ниже г. Благовещенска, уровень воды поднимался на 853 см и 1067 см. На р. Бурее также наблюдался подъем воды, и поэтому в это наводнение преимущественно пострадали на Амуре места, лежащие за впадением Буреи (Шперк..., 1885).

В 1861 году наблюдалось наводнение и на реке Уссури. В соответствии с информацией представленной в петербургской газете (Северная..., 1862 г., № 118) «... Реки сравнялись с берегами; вода пошла по лугам и затопила сено. Потом разлилась по пашням, закрыла их, и все погибло. Реки (Уссури) превратились в озера, на низких местах не видно было берегов, а в горах реки разлились от хребта до хребта».

1872 год. Через 11 лет в 1872 году на Амуре снова произошло катастрофическое наводнение, охватившее почти весь бассейн р. Амур. По телеграфу тогда передавали сообщение о том, что «вода идет валом». Это наводнение называли потопом. Вода смыла несколько деревень, уничтожила все посе́вы. А по улицам Благовещенска плавали пароходы, подвозившие пассажиров к домам и гостиницам.

В станицах Покровской и Албазино 28 и 29 июня и уровень воды поднялся на 7½ саж. (1600 см) выше среднего своего стояния; эта невероятная прибыль воды зависела главным образом от большой воды, шедшей из Аргуни. В г. Благовещенске максимальный уровень воды наблюдался 15 июля, вода поднялась до 1017 см, затопило половину города. Из 27 станиц, пострадавших от

наводнения, снесено почти совершенно. Из станиц особенно сильно пострадали, начиная с верховья Амура, следующие: Покровская, Амазар, Игнашино, Сгибнево; Орлово, Албазино, Воскресенское, Бейтонова, Толбузино, Черняево, Степаново. Станицы Корсаково и Бусеево нельзя было найти. Ниже г. Благовещенска лежащие по Амуру казачьи станицы пострадали от наводнения значительно меньше (Шпек..., 1885). На основе анализа материалов по проектированию железнодорожного моста через р. Амур установлено, что уровень воды у Хабаровска в 1872 г. достиг отметки 722 см (Методические указания № 92..., 1979).

На рисунке 2 показан многолетний график максимальных уровней воды р. Зеи по наблюдениям в г. Благовещенске, куда помещена также точка за 1872 г. Как видно, максимальный уровень 1872 года (1017 см) был почти на 2 м выше, чем в 2013 г. (819 см).

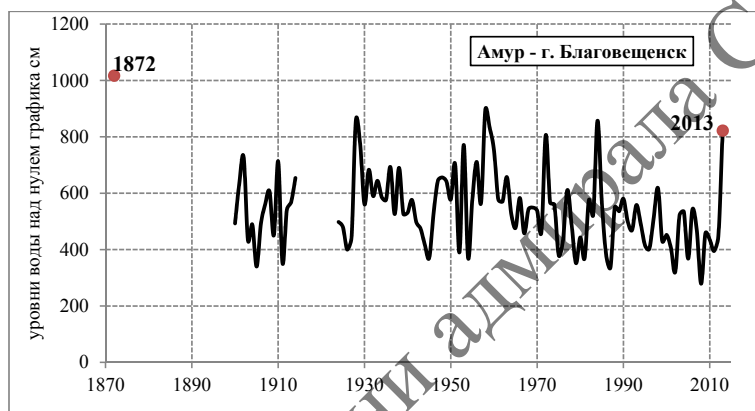


Рисунок 2 - Наивысшие уровни воды р. Амур в г. Благовещенске

В соответствии с информацией представленной в петербургской газете «Биржевые ведомости за 1873 г. (Биржевые..., 1873, №17) «Вначале дожди шли на самом верховье Амура, около 6 недель подряд, вызвав первое наводнение; потом перешли в долины рек Зеи и Буреи, но в южных реках, в Сунгари прибыль воды была невелика, а по Уссуре была даже положительная засуха. В средней части Амура, не говоря уже о домах, все, что поддерживает хозяйство - пашни, огороды, сено - истреблено...».

На р. Зея у Мазанова был найден (по опросу) высокий горизонт 1872 г., который оказался 984 см, что на 1 м выше паводка 1928 г., считавшегося тогда необычным и небывалым. Максимальный уровень воды в паводок 1928 г. наблюдался 27 июля и возвышался над нулем графика водомерного поста (155,28 м абс.) на 884 см. Максимальный уровень воды р. Селемджа у с. Экимчан составил 622 см над нулем графика (в 1928 г. он составил 412 см) (Болдаков..., 1941).

1881 год. По информации, опубликованной в книге Грум-Гржимайло (Грум-Гржимайло..., 1894) «Летом 1881 г. уровень воды в Амуре и Зее повышался 6 раз, Амуро-Зейская равнина затоплялась до прекращения в ней всякого сообщения. 1 июня вода в Зее была уже на возвышенном

уровне, 3 июня начала сбывать, что продолжалось до 5 июня. При наибольшем достигнутом ею уровне, вода стояла однакоже позади д. Владимировки сажени на две ниже берега, 6 июня вода снова начала прибывать в Зее, а с 13 июня и в Амуре 23 июня она достигла наибольшего своего уровня, окружила д. Владимировку и затопила некоторые ее дворы и огороды. 24 июня вода начала сбывать и к 6 июля сбывла до майского максимального уровня ($2\frac{1}{2}$ саж. ниже берега у д. Владимировки). Третья прибыль воды началась 24 июля и достигла наивысшего уровня 29 июля. Вода опять окружила Владимировку, затопила дворы и даже сени некоторых изб. 31 июля вода начала сбывать и сбывала до 18 августа, причем опустилась на $2\frac{1}{2}$ саж. ниже берега у пос. Низменного. 23 августа вода опять начала прибывать, достигла того же высшего стояния как и 23 июня, но затем начала убывать, а к 4 сентября у пос. Низменного была уже ниже берега на $2\frac{1}{2}$ саж. Два менее значительные повышения уровня Зеи были еще в начале сентября».

1897 год. В 1897 г. катастрофическое наводнение на реках Забайкалья отмечалось дважды – в мае и августе. Майский разлив воды считался для Забайкалья «довольно редким явлением и вызван был большими дождями и в особенности глубоким снегом, выпавшим по верхнему течению Ингоды в середине мая... В августе в течение целой недели почти повсеместно в Забайкалье, и в особенности на Яблоновом хребте, падали проливные дожди» (Зайков..., 1954), вызвавшие катастрофическое наводнение на реках Ингоде, Ононе и верхнем участке Шилки. Затоплены были гг. Чита, Сретенск и другие. В 1897 году наводнением была выведена из строя только что запущенная Забайкальская железная дорога. «Этот год надолго останется в памяти жителей Забайкалья как год страшной катастрофы» – писали позже газеты. На водомерном посту р. Шилка - г. Сретенск максимальный уровень воды 14 августа 1897 г. составил 964 см над нулем графика и является наивысшим за весь период инструментальных наблюдений с 1896 г. (рисунок 3).

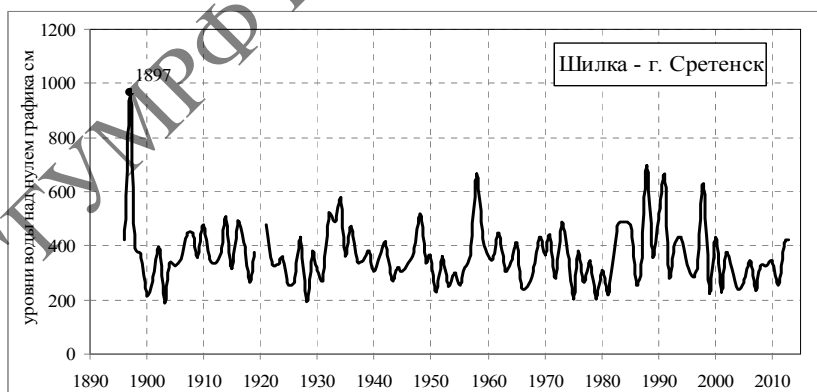


Рисунок 3 - Наивысшие уровни воды р. Шилка – г. Сретенск

От Читы до Сретенска значительная часть полотна дороги находилась глубоко под водой. По рассказам очевидцев, на пространстве многих верст, в местах, где раньше виднелись выемки и

насыпи, во время наводнения стремительно несся бурный поток и, когда, наконец, вода спала, правильные очертания полотна оказались исковерканными, изрытыми промоинами, а в некоторых местах оно совершенно было смыто.

А.Н. Пушечников в своей книге «О мерах, которые необходимо принять на Забайкальской ж. д. для защиты ее от повреждений наводнениями» (Пушечников, 1914) пишет:

«...Осмотр линий убедил меня и моих сотрудников (начальников участков и производителей работ), что наводнение 1897 г. было совершенно необыкновенное, не повторявшееся по крайней мере сто лет, так как:

1) Никаких воспоминаний, основанных на личных впечатлениях или на рассказах давно умерших стариков, у старожилов не сохранилось;

2) Село Доронинское, благополучно существовавшее в отношении наводнений в течение более 150 лет, во время наводнения 1897 г. сильно пострадало; много жилых домов этого села было затоплено водою и частью унесено;

3) Областной город Чита, благополучно существовавший около 100 лет, был сильно затоплен и поврежден в своих частях, расположенных в низменных местах, при впадении Читы в Ингоду (часть домов была унесена наводнением 1897 г.);

4) Старинные села, основанные более 100 лет тому назад в долинах Ингоды и Шилки, были сильно затоплены до чердаков последним наводнением и значительно повреждены (некоторые дома совсем унесены);

5) Многие, возникшие за 50-60 лет перед наводнением поселки, например Кручина, почти совершенно разрушены и унесены наводнением 1897 г.

6) Громадное наводнение 1897 г., подобного которому никто из жителей Забайкалья раньше не наблюдал, затопило много пашен и лугов, причем в местах, где течение было сильное, размыло на больших площадях и унесло растительный слой земли до каменной подпочвы».

Уровень Амура у Хабаровска достиг 642 см. Набережная в городе была полностью затоплена. Реки Плюснинка и Чердымовка разлились и затопили близстоящие дома. Станица Михайло-Семеновская (современное село Ленинское ЕАО) целиком ушла под воду.

2. Наводнения в XX столетии

1928 год был катастрофическим для Приамурья. В этот год было 4 наводнения. Более всего тогда пострадали поселения на реке Зее. А в городе Зее река практически полностью смыла Романовскую Набережную улицу, контору «Союззолото», здание золотосплавочной лаборатории, лесничество, горное управление, лесопильный завод, милицию, тюрьму и деревянную церковь, затопила продовольственные склады. Были «снесены совершенно» зейские деревни Сиян, Успеновка, Петропавловка, Алексеевка, Журбан, Усть-Деп и Заречная Слобода (позже все они вновь отстраи-

вались уже на другом месте) а другие «частично разорены». Рекордным остался и максимальный среднесуточный расход в районе Зейского створа – 14 200 м³/сек (рисунок 4), теперь здесь сток регулируется водохранилищем Зейской ГЭС.

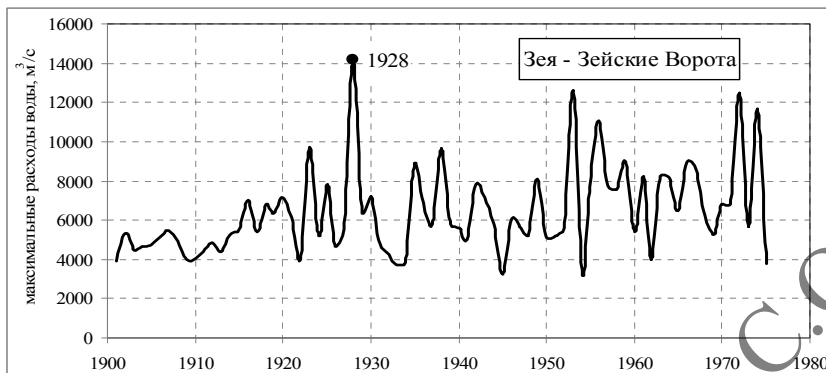


Рисунок 4 - Максимальные расходы воды р. Зея - уроч. Зейские ворота

Но из берегов в то лето вышла не только Зея, досталось и селам, расположенным на Амуре, и Благовещенску, чьи улицы стали напоминать венецианские. Только в столице Приамурья повреждения разной тяжести получило более 650 домов. Пострадали многие прибрежные села, были размыты железнодорожные пути, прервалась связь с Хабаровском. Не обошлось без человеческих жертв. В Благовещенске нарастала паника перед наступающей водой, газетные публикации были похожи на фронтовые сводки. «Амурская правда» информировала об уровне воды, объявила о сборе денег для пострадавших. Убытки, нанесенные наводнением Амурскому округу, были оценены в 10 миллионов рублей.

Наводнение 1928 года стало основанием для организации научных исследований гидрологического режима Верхнего Амура и его притоков: была расширена сеть гидрологических постов.

Катастрофическое наводнение 1928 года сохранилось на старых фотографиях: затопленные улицы Благовещенска (рисунок 5).



Рисунок 5 - Затопленные улицы г. Благовещенска. Слева - перекрёсток улиц Комсомольской и Кооперативной, справа – ул. Бусевская (ныне ул. Шимановского)

На самом Амуре опасные отметки уровня были превышены на всем его протяжении.

1958 год. Наводнение 1958 года на Верхнем Амуре явилось максимальным по уровню за весь период наблюдений. В Благовещенске он превысил прежний показатель 1928 года на 37 см и достиг исторического значения 895 см над нулем графика. Одной из особенностей этого наводнения явилась его дружность. Максимальные значения уровня воды были достигнуты за относительно короткий период времени, практически сразу же после окончания весеннего половодья и были вызваны интенсивными ливневыми осадками в верховьях Амура. Анализ хода паводка 1958 года выполнен по совмещенным гидрографам уровня воды рек Амур и Зея (рисунок 6).

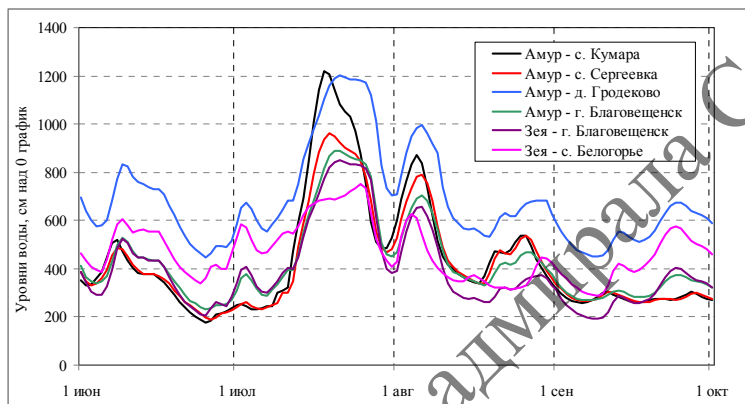


Рисунок 6 - Совмещенные гидрографы уровня воды Верхнего Амура и Зеи в 1958 г.

После весеннего половодья минимальные значения уровня воды на Верхнем Амуре и в бассейне р. Зея отмечались в третьей декаде июня. С начала июля на реках начался плавный подъем воды, который продолжался вплоть до конца первой декады месяца. Первая волна паводка 1958 года была сформирована ливневыми дождями, прошедшими в верховьях Амура в период с 25 июня по 17 июля (м/ст Джалинда – 151 мм, Могоча – 272 мм, Сквородино – 121 мм). С 11 июля уровень воды на Амуре по г/п Кумара, Сергеевка, Благовещенск начал интенсивно расти и достиг максимального значения соответственно 18, 19 и 20 июля. При этом амплитуда паводка уменьшалась вниз по течению с 9,8 м (Кумара) до 5,8 м (Благовещенск), а средняя интенсивность подъема воды изменялась от 113 до 83 см/сутки.

Спад первой волны паводка проходил вплоть до 30 июля и был неравномерным. До 25 июля интенсивность спада составляла около 13 см/сут., а затем увеличилась до 75 см/сут. На фоне общего спада после прохождения первой волны паводка на гидрографах можно выделить еще 2 дождевых пика с максимумами уровней 5-6 августа и 25-26 августа.

Подъем уровней воды на г/п Зея-Белогорье так же, как и на Амуре, начался в конце июня - начале июля. Вода поднималась около 30 дней со средней интенсивностью около 14 см/сутки.

Суммы осадков, которые сформировали этот паводок, составили по данным метеостанций от 67 до 307 мм на фазе подъема и от 177 до 288 мм на фазе спада.

На ветви общего подъема с 29 июня по 2 июля зафиксировано резкое увеличение уровня воды с амплитудой 1,9 м и средней интенсивностью подъема и спада около 63 см в сутки. В формировании этого кратковременного дождевого пика участвовали ливневые осадки, выпавшие практически на всей территории Амурской области в период с 25 по 27 июня. На Амуре этого подъема уровней не зафиксировано.

Вклад р. Зея в паводок 1958 года на р. Амур можно оценить, сравнивая гидрографы уровней по г/п Белогорье и Благовещенск (р. Зея) и Кумара, Сергеевка, Благовещенск и Гродеково (р. Амур). В отличие от паводка на Амуре, паводок на реке Зея в этот год не был выдающимся. Уровень воды по г/п Белогорье достиг максимального значения 25 июля, на 5 дней позже максимума на Амуре в Благовещенске и составил 753 см над нулем графика поста, что на 170 см ниже наблюдаемого в 1953 году.

Дождевой паводок на Верхнем Амуре в 1958 году носил исторический характер. Общая продолжительность паводка с учетом еще двух максимумов, прошедших на фоне спада экстремальных уровней, составила около двух месяцев. Расход воды по Амuru у г. Благовещенска при прохождении максимума более чем в два раза превысил сток по р. Зея. Паводок на Амуре у Благовещенска прошел на 6 дней раньше, чем на р. Зея.

Далее рассмотрим особенности продвижения сформировавшейся паводочной волны по Среднему и Нижнему течению Амура (рисунок 7). Максимальный расход воды, составивший около 30 тыс. м³/с ниже слияния Амура и Зеи (г/п Гродеково), далее на всем протяжении реки до Комсомольска оставался в пределах 29–32 тыс. м³/с.

На величину максимальных расходов в Среднем и Нижнем течении Амура определяющее значение имеют следующие факторы:

- объем и максимальный расход паводка, поступающего с Верхнего Амура;
- расплывание волны паводка в результате пойменного регулирования. Так, на участках Среднего Амура пропускная способность русла реки составляет 15-17 тыс. м³/с, при превышении которой вода выходит на пойму;
- боковая приточность, особенно основных притоков – Буреи, Сунгари, Уссури. При синхронном наложении паводков притоков на основную волну, идущую с Верхнего Амура, максимальные расходы воды могут значительно возрастать.

В 1958 г. на притоках Среднего и Нижнего Амура значительных паводков не отмечалось, поэтому максимальный расход воды, сформировавшийся после слияния Амура и Зеи, не претерпел существенного изменения по мере своего продвижения.

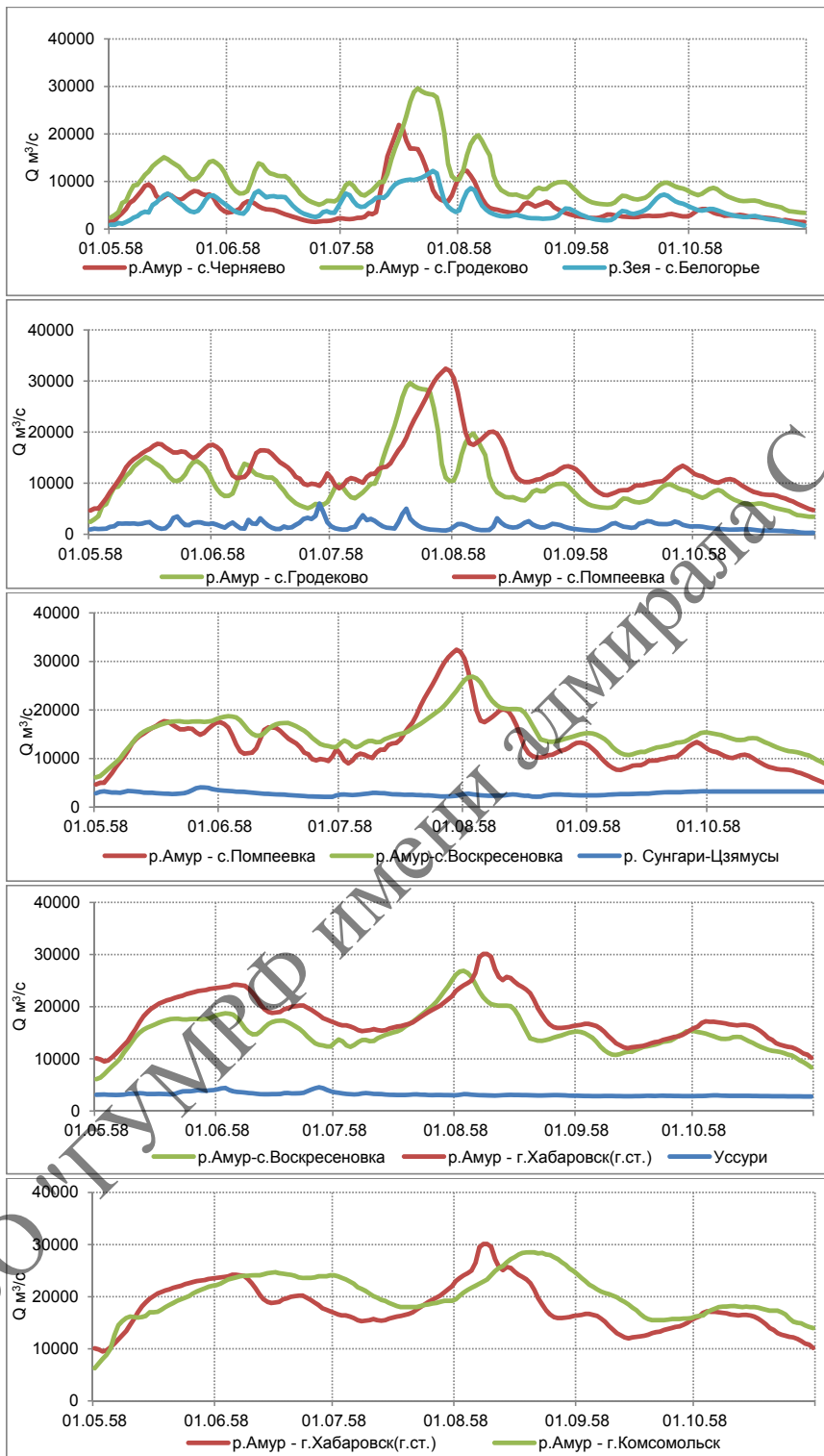


Рисунок 7 - Гидрографы паводочного стока на Амуре и его основных притоках в 1958 г.

1959 год. После наводнения 1958 года следующий год на Верхнем Амуре также выдался многоводным, но режим подъема уровней носил несколько иной характер. Интенсивные осадки начали выпадать повсеместно на территории Верхнего Амура и в бассейне р. Зеи с 15-16 июля. За период с 15 июля по 9 августа метеостанции Джалинда, Могоча и Сквородино зафиксировали соответственно 148, 228 и 116 мм осадков. Период дождей продлился до середины первой декады августа и вызвал подъем уровней воды почти повсеместно (рисунок 8). На реках Верхнего Амура подъем уровня носил несколько «рваный» характер, постепенный подъем сменялся короткими периодами стабилизации уровня, что связано с неравномерным выпадением осадков, как по территории, так и по времени. Подъем продолжался до 7 августа. Амплитуда первого подъема составила 5,7 и 5,3 м по г/п Амур-Кумара и Амур-Сергеевка соответственно. Средняя интенсивность подъема уровней воды по этим постам 34 и 28 см/сутки. Спад начался сразу за подъемом. Минимального значения уровни достигли по этим постам 18 и 19 августа. Средняя интенсивность спада составила около 36 см/сутки.

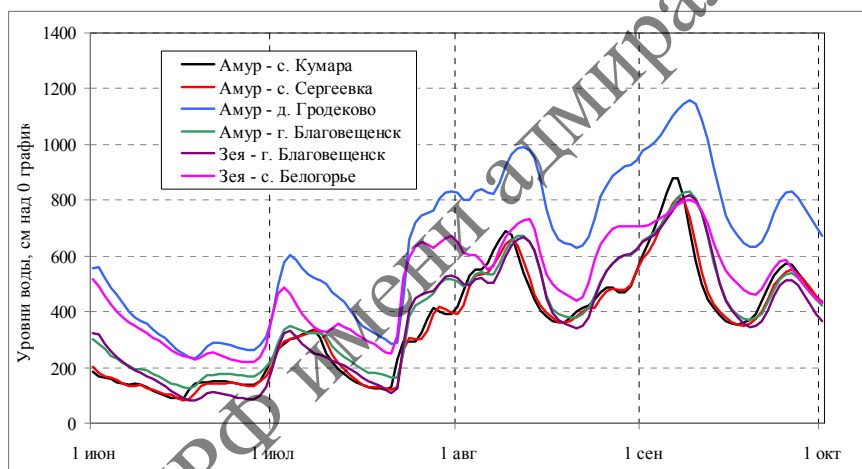


Рисунок 8 – Совмещенные гидрографы уровня воды Верхнего Амура и Зеи в 1959 г.

Вторую волну подъема уровней на Верхнем Амуре вызвали дожди, прошедшие в период с 16 августа по середину первой декады сентября. Они значительно уступали июльским осадкам, но сумели сформировать на Амуре максимальные уровни воды. Вторая волна подъема уровней воды на Верхнем Амуре началась 18 августа и превысила первую. До 29 августа в течение 11 дней уровень воды поднимался со средней интенсивностью около 11 см/сутки. Затем она возросла до 45 см/сут. Максимальные уровни по г/п Кумара и Сергеевка были зафиксированы 7 сентября. После достижения пика сразу же начался спад уровней, который продолжался до конца второй декады сентября с интенсивностью около 48 см/сут.

Общее количество осадков, выпавших в бассейне р. Зея в период с 16 августа по 9 сентября было значительно меньше июльских значений (м/с Бомнак – 102 мм, Экимчан – 61 мм), тем не менее, оказалось достаточным, чтобы сформировать волну дождевого паводка.

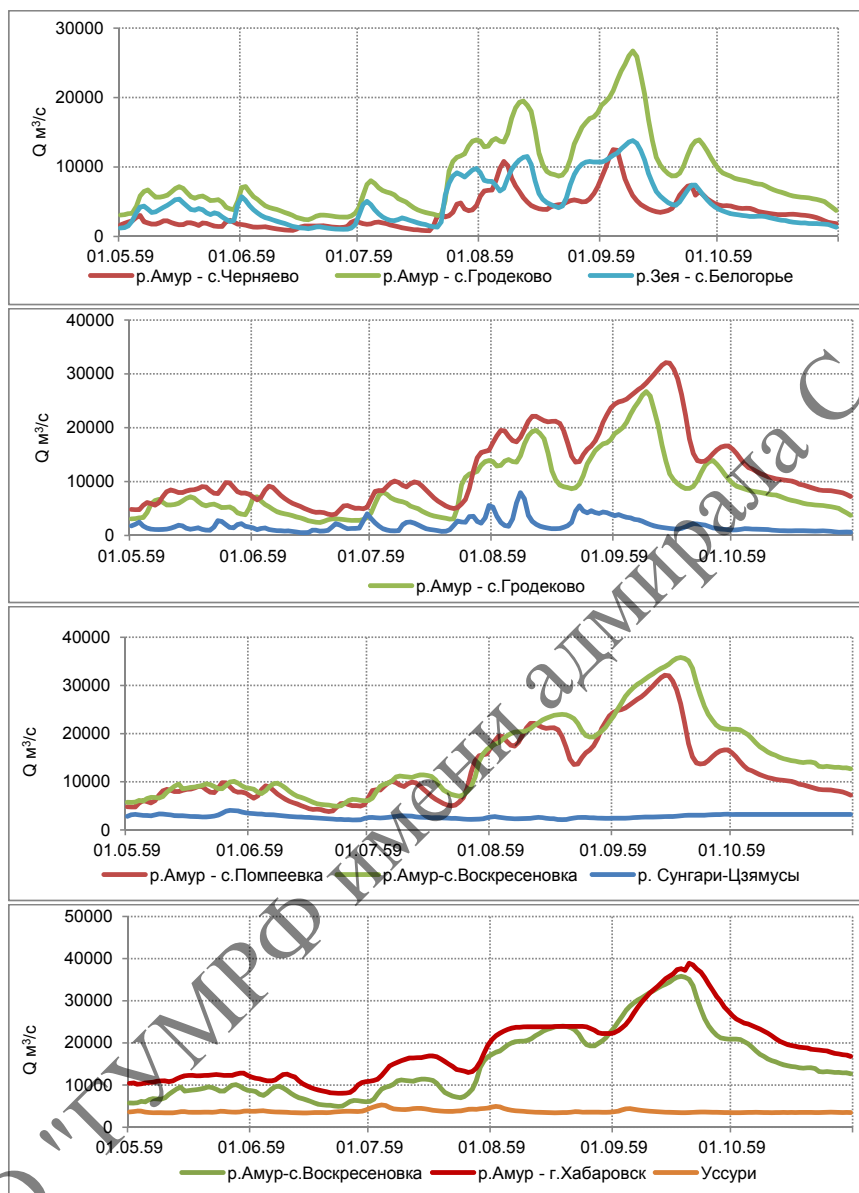
Вторая волна паводка на р. Зея проходила по аналогичному сценарию, как и первая – быстрый подъем уровней в начале, последующая стабилизация и плавное медленное повышение уровней до максимальных значений. Уровень воды по г/п Белогорье начал расти 21 августа и за 6 дней поднялся на 2,55 м. Затем интенсивность подъема уменьшилась до 8 см/сутки. Максимум зафиксирован 9 сентября, а общая амплитуда за весь период подъема составила 3,6 м. Падение уровней продолжалось до 20 сентября.

На Амуре у г. Благовещенска паводок 1959 года вызвал повышение среднесуточного уровня воды до 830 см над нулем графика, что на 65 см ниже исторического значения. Максимальные уровни наблюдались 9 сентября при прохождении второй волны паводка. По сценарию прохождения паводка гидрограф уровней полностью повторяет гидрограф Амура, по г/п Кумара и Сергеевка с учетом времени добегания, за исключением начальной стадии подъема первой волны паводка. Она по интенсивности и амплитуде больше повторяет гидрограф р. Зея. По водности Амур и Зея в узле слияния на момент стояния максимальных уровней были примерно равны, поэтому нет оснований считать их подпертыми друг другом.

Таким образом, максимальный дождевой паводок на Верхнем Амуре в 1959 году имел две волны подъема. Общая продолжительность паводка составила около двух месяцев. У г. Благовещенска при прохождении максимума расходы воды Амура и Зеи были сопоставимы. Пик паводка на Амуре у Благовещенска прошел в те же сроки, что и на Зее. В результате наложения паводочных волн с Верхнего Амура и Зеи в створе в/п Гродеково сформировался максимальный расход $\sim 27000 \text{ м}^3/\text{с}$. По мере прохождения Среднего и Нижнего Амура ввиду отсутствия значительных паводков на основных притоках (Буряя, Сунгари, Уссури) максимальный расход увеличивался лишь на величину их обычного притока. Ниже впадения Сунгари максимальный расход составил $\sim 36 \text{ тыс. м}^3/\text{с}$, в створе у г. Хабаровска $\sim 39 \text{ тыс. м}^3/\text{с}$, а у Комсомольска почти достиг $40 \text{ тыс. м}^3/\text{с}$ (рисунок 9).

1984 год. Наводнение 1984 года занимает особое место в общем списке дождевых паводков в верховьях Приамурья, прежде всего по количеству выпавших за лето осадков. После окончания весеннего половодья уровень воды в Амуре незначительно изменялся вплоть до третьей декады июля. Уверенный подъем воды начался после прохождения обильных ливневых дождей. Так, за период с 18 июля по 14 августа по м/ст Джалинда, Могоча и Сквородино зафиксировано соответственно 214, 220 и 224 мм осадков. За период меньше месяца м/ст Могоча зафиксировала почти

двухмесячную июльскую норму, а на спаде паводка – до 27 сентября – выпало всего около 50 мм осадков.



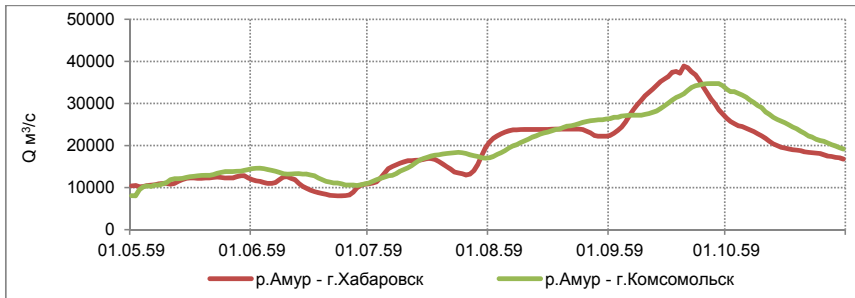


Рисунок 9 - Гидрографы паводочного стока на Амуре и его основных притоках в 1959 г.

Представленные на рисунке 10 гидрографы уровней воды Верхнего Амура и р. Зея подтверждают синхронность протекания процессов формирования дождевых паводков на всей рассматриваемой территории. Гидрологические посты на р. Амур – Кумара и Сергеевка – зафиксировали начало подъема уровня воды 22 и 23 июля. Подъем носил почти равномерный характер. За 22 дня уровень в реке вырос на 6,93 и 6,00 м соответственно. Пик паводка на г/п Кумара прошел 13 августа, а на г/п Сергеевка – на сутки позже. Средняя интенсивность подъема составила около 30 см/сутки. Период спада по его интенсивности можно разбить на два подпериода. До начала третьей декады августа скорость падения уровня составила около 64 см/сут., что, скорее всего, связано с коротким бездождным периодом. В дальнейшем уровень воды до 27 сентября упал на 1,9 м. На ветви спада зафиксированы две небольшие по амплитуде волны.

В бассейне р. Зея дожди носили более продолжительный и интенсивный характер. За период формирования максимальных уровней норма осадков по м/ст Экимчан (верховья Селемджи) была превышена в 2 раза, а по м/ст Бомнак (верховья р. Зея) – более, чем в 2 раза. Во время спада паводка, наоборот, осадков выпало в среднем менее нормы более чем в два раза.

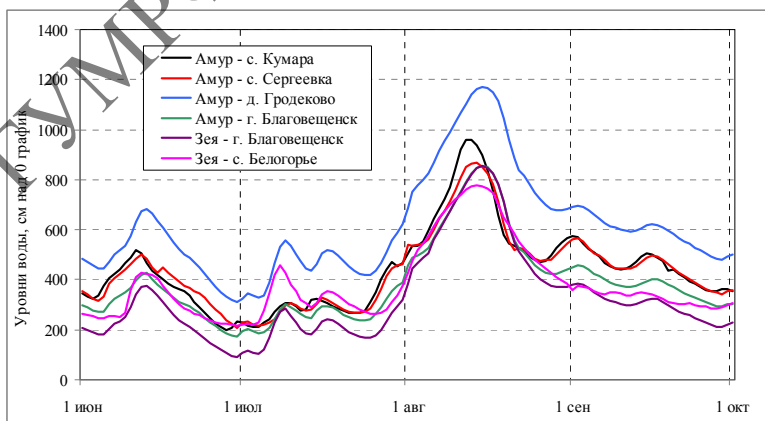


Рисунок 10 - Совмещенные гидрографы уровня воды Верхнего Амура и Зея в 1984 г.

На г/п Зея-Белогорье паводок начался на 4 дня позднее, чем на Амуре – 27 июля и достиг максимума 14 августа (778 см). Расход воды, соответствующий этому уровню, 12900 м³/сек.

Надо отметить, что сток по этому посту зарегулирован Зейским водохранилищем, которое в полном режиме начало функционировать в 1980 году. Однако Зейская ГЭС способна регулировать только 43% годового стока Зеи, а впадающие ниже реки Правый Урган, Деп и Селемджа могут привести к крупным наводнениям. Максимальный приток к Зейскому водохранилищу на 6 августа 1984 года составил около 13700 м³/сек. За июль и август Зейское водохранилище собрало 10 км³ воды и тем самым спасло Приамурье от тяжелых последствий.

У г. Благовещенска паводок 1984 года вызвал повышение уровня воды на 15 августа до 856 см над нулем графика, что на 39 см ниже исторического значения. Гидрографы уровня воды по водомерным постам Амур-Благовещенск и Зея-Благовещенск очень близки по своей форме и отличаются лишь амплитудой. Уровень поднимался 20 дней со скоростью около 30 см/сутки. Спад паводка проходил при меньшей интенсивности и занял продолжительный период времени. По водности Амур и Зея в узле слияния на момент стояния максимальных уровней были примерно равны (таблица 1), поэтому нет оснований считать их подпертыми друг другом.

Таблица 1 - Расчетные расходы воды рек Амур и Зея у г. Благовещенска за отдельные годы

Год	Максимальный среднесуточный уровень Амура в Благовещенске		Расход воды в узле слияния, м ³ /сек			
			Амур-Кумара		Зея-Белогорье	
	дата	Н, см	дата	Q	дата	Q
1958	20.07	891	18.07	22300	19.07	10400
1959	09.09	830	07.09	13900	08.09	13600
1984	15.08	854	13.08	15500*	14.08	12900
1998	30.06	614	28.06	12700*	29.06	4460

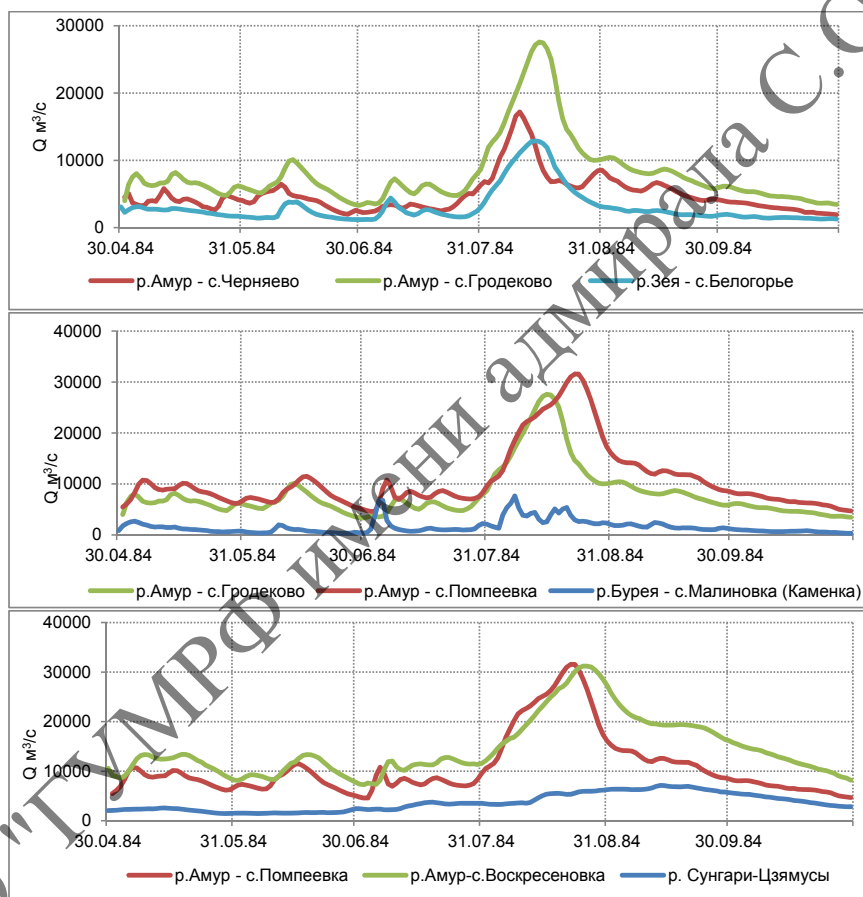
* - восстановленное значение.

По сценарию прохождения гидрограф уровней полностью повторяет гидрограф р. Амур по г/п Кумара и Сергеевка с учетом времени добега, за исключением начальной стадии подъема первой волны паводка. Она по интенсивности и амплитуде больше повторяет гидрограф р. Зея.

Дождевой паводок 1984 года был сформирован осадками, равномерно охватившими как территорию Верхнего Амура, так и бассейн р. Зеи. Паводок имел четко выраженный однопиковый гидрограф. Одной из отличительных особенностей паводка явилось то, что основной объем осадков выпал до середины августа. На его спаде величина осадков была значительно меньше месяч-

ных норм. Максимальные расходы в устье р. Зея были сформированы дождевыми осадками, прошедшими в основном на ее притоках. Зейское водохранилище уменьшило затопление большого количества населенных пунктов и предотвратило катастрофу в г. Благовещенске.

В 1984 г. на Амуре в створе в/п Гродеково сформировался паводок с максимальным расходом около 28 тыс. м³/с. При прохождении волны паводка по Среднему и Нижнему Амuru максимальный расход воды увеличился до 33-34 тыс. м³/с у городов Хабаровска и Комсомольска (рисунок 11). Увеличение максимальных расходов было обусловлено повышенной, хотя и не экстремальной водностью рек Бурья, Сунгари и Уссури в период прохождения паводка.



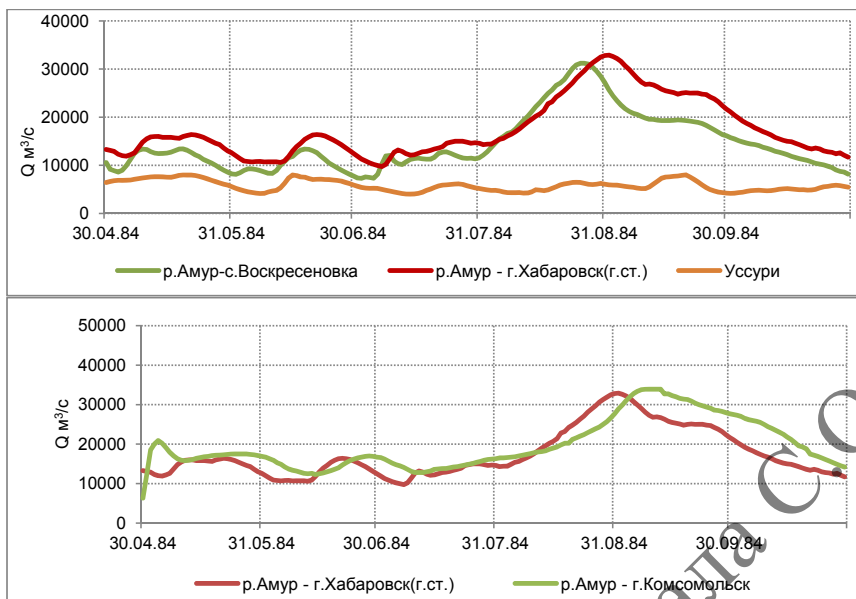


Рисунок 11 - Гидрографы паводочного стока на Амуре и его основных притока в 1984 г.

Список литературы

- «Биржевые ведомости», 1873, № 17.
«Владивосток», 1895, прибавл. к № 36.i
«Восточное обозрение», 1897, № 70.
«Восточное обозрение», 1897, № 98.
«Восточное обозрение», 1897, № 99.
«Журнал министерства внутренних дел», 1831, ч. V.
«Санкт-Петербургские ведомости» 1872, № 282.
«Северная почта», 1862, № 118.
«Сибирь», 1876, № 49.
«Сибирь», 1879, № 35.
«Сибирь», 1879, № 37.
«Сибирь», 1897, № 104.
«Сибирь», 1897, № 107.
Болдаков Е.В. Определение максимальных расчетных расходов. «Гидротехн. Строительство», № 4, 1941.
Грум-Гржимайло Г.Е. Описание Амурской области. СПб., 1894. -654 с.
Журнал мин. внутр. дел, 1831 г., ч. V.
Зайков Б.Д. Высокие половодья и паводки на реках СССР за историческое время. – Л., Гидрометеиздат, 1954. – 133 с.
Методические указания № 92 «Определение максимальных расходов воды по меткам уровня высоких вод, Л., Гидрометеиздат, 1979, 48 с.
Назаров А.Е. Военно-статистический очерк Амурской области. - СПб: Воен.-учен. ком. Глав. штаба, 1888. - XII, 365 с.

Пушечников А.Н. О мерах, которые необходимо принять на Забайкальской ж. д. для защиты ее от повреждений наводнениями. Известия собрания инженеров путей сообщения. СПб. 1913; Репр. изд. - Чита: 2010. - 30, [5] с.: ил., цв. ил.

Р. Маак. «Путешествие на Амур». СПб. 1859

Шперк Ф. Ф. Россия Дальнего Востока. СПб., 1885. [2], IV, 503 с., 1 граф.

ⁱ CATASTROPHIC FLOODS ON THE AMUR RIVER IN XIX–XX CENTURIES (*E.A. Grek, V.A. Ivanov, T.G. Molchanova*)

Information is provided on unprecedented floods which occurred in the Amur River basin in XIX–XX centuries, the highest water levels and maximum discharges on record, as well as on separate floods described in the publications of XIX and XX centuries

КАТАСТРОФИЧЕСКОЕ НАВОДНЕНИЕ 2013 ГОДА В БАССЕЙНЕ АМУРА: ПРИЧИНЫ, ОСОБЕННОСТИ, ПОСЛЕДСТВИЯ

Шальгин А.Л., Дугина И.О.

ФГБУ «ГГИ», Санкт-Петербург, shalygin@ggi.nw.ru

Рассматриваются причины возникновения исторического наводнения в бассейне Амура в 2013 г. Анализируются особенности формирования и прохождения экстремального паводка в различных частях амурского бассейна. Оценивается влияние Зейского, Бурейского и китайских водохранилищ на экстремальность паводка. Приводятся данные о последствиях катастрофического наводнения на российской и китайской территориях бассейна Амура

Введение

В июле-сентябре 2013 г. на реке Амур произошло сильнейшее за всю историю инструментальных наблюдений катастрофическое наводнение, вызванное экстремальными дождями, которые продолжались около двух месяцев. Наводнение охватило весь бассейн Амура, включая огромную территорию российского Дальнего Востока и северо-восточных районов Китая. Наивысшие уровни воды на участке Амура более 1000 км (от с. Нагибово в Еврейской автономной области до с. Тахта в Хабаровском крае) превысили исторические максимумы на 0,40-2,11 м. Продолжительность стояния высоких уровней (с превышением опасных отметок) составила в районе больших городов Хабаровск и Комсомольск-на-Амуре около месяца и более, а продолжительность затопления поймы на глубины 2-4 метра - до двух и местами более месяцев. На пике паводка у Хабаровска сформировался выдающийся максимальный расход воды в 46 тыс. м³/с, повторяемость которого оценивается как один раз в 200-250 лет.

1. Краткая характеристика бассейна Амура

Река Амур образуется слиянием рек Шилки и Аргуни и впадает в Сахалинский залив Охотского моря. Амур - главная река Дальнего Востока России и одна из крупнейших рек мира. Длина реки от слияния Шилки и Аргуни 2,8 тыс. км, площадь водосбора 1,85 млн. км². По водности Амур занимает четвертое место среди рек нашей страны, уступая лишь Оби, Енисею и Лене. Средний многолетний объем годового стока Амура у Хабаровска составляет 263 км³, у Комсомольска - 303 км³.

Бассейн Амура расположен в пределах трёх государств — России (995 тыс. км², около 54% площади бассейна), Китая (44%) и Монголии (2%). Амур - крупнейшая трансграничная река Российской Федерации. Государственная граница Российской Федерации и КНР проходит по рекам Аргунь, Амур, Уссури, Тур и Сунгача на протяжении более 3,5 тыс. км.

Приамурский регион включает среднегорные хребты и плоскогорья, сильно расчленённые бассейнами рек Зeya, Бурея, Уда, Тугура и Амгунь. Горный рельеф занимает 80% территории. Преобладает низко- и среднегорный рельеф, со средними высотами до 1000 м. над уровнем моря. Абсолютные высоты наиболее высоких вершин редко превышают 2500 м.

Горные хребты и системы простираются в основном в северо-восточном, почти меридиональном направлении. Вдоль побережья Японского моря и Татарского пролива протянулась горная система Сихотэ-Алиня, которая состоит из ряда хребтов, разделенных долинами многочисленных рек. Сихотэ-Алинь круто обрывается к Японскому морю и более пологим северо-западным склоном обращается в сторону рек Уссури и Амур.

К северо-западу от Сихотэ-Алиня почти параллельно ему расположены хребты Баджалский, Малый Хинган, Бурейский, Дуссе-Алинь и др. Северо-восточное направление имеют хребты Прибрежный, Джугджур и др. Между этими районами хребты имеют широтное направление (Майский, Джагды, Селемджинский).

Равнины занимают 15% площади и чаще всего приурочены к долинам рек Амура и других крупных рек. Самой большой равниной является Среднеамурская, вдоль которой проходит широкая пойма Амура, составленная из многочисленных проток и озер. На север и восток от Среднеамурской равнины, в нижнем течении Амура, расположены низменности с множеством мелких озер.

По особенностям строения речной долины выделяются три основных участка:

- Верхний Амур (длина 896 км) - от истока (слияния Шилки и Аргуни) до г. Благовещенска (выше устья р. Зеи) - река имеет преимущественно горный характер;
- Средний Амур (длина 994 км) - от г. Благовещенска (выше устья р. Зеи) до г. Хабаровска - река течет по Зейско-Бурейской равнине, затем, ниже устья р. Буреи прорезает хребет Малый Хинган, образуя единый мощный поток, и выходит на Среднеамурскую низменность. На этом участке Амур получает основное питание. Здесь в него впадают крупные притоки: слева - Зея и Бурея, справа - Сунгари и Уссури.
- Нижний Амур (длина 980 км) - начинается от г. Хабаровска и течет по Нижнеамурской низменности. Здесь река принимает только один значительный приток слева - р. Амгунь.

Дальний Восток в силу своего географического положения расположен в зоне, где климатические условия определяются муссонной циркуляцией, имеющей хорошо выраженный сезонный ход. В летнее время преобладающие ветры направлены с моря на сушу, в результате влажные массы воздуха перемещаются на континент, принося обильные осадки; зимой ситуация изменяется на обратную.

Самым холодным месяцем является январь, наиболее высокие температуры воздуха наблюдаются в июле.

Режим осадков в бассейне реки Амур определяется условиями муссонной циркуляции, циклонической деятельностью и характерами рельефа. Взаимодействие этих факторов обуславливает существенное различие между количеством осадков, выпадающим по сезонам года и распределением их по территории бассейна. Средняя многолетняя годовая сумма осадков меняется по территории от 450-500 мм в южных равнинных районах, до 700-1200 мм в горных районах и на побережье. Обычно сезон дождей начинается с конца июня и продолжается до середины сентября, максимальное количество осадков выпадает в июле или августе. Минимум осадков приходится на январь или февраль. Количество выпадающих твердых осадков составляет 20-30% годовой их суммы.

По условиям водного режима реки бассейна Амура относятся к дальневосточному типу, характерной чертой которого является хорошо выраженное преобладание дождевого стока. Основные черты водного режима этих рек определяет муссонный тип климата. Основным питанием рек является дождевое, его доля составляет 60-80% общего годового стока. На снеговое питание приходится 10-20%, на подземное - 10-20%.

Основной фазой водного режима рек являются дождевые паводки, наблюдающиеся в теплое время года. Паводочный период в среднем длится 150-170 дней в южных районах, до 130-150 дней в северной части бассейна, на него приходится большая часть годового стока рек. Муссонные летние дожди обложного характера иногда охватывают обширные площади на территории бассейнов Нижнего, Среднего и Верхнего Амура. В результате при большой интенсивности осадков и при условии значительной предварительной увлажненности почво-грунтов бассейна могут возникнуть мощные паводки и наводнения на многих реках. Дождевые паводки на реках наблюдаются вплоть до наступления холодов.

Другой важной фазой формирования водного режима рек рассматриваемого региона является снеговое половодье, характерное для всех рек бассейна. Весеннее половодье в бассейне Верхнего и Среднего Амура в среднем длится 20-30 дней, в бассейне Нижнего Амура - от 30 до 50 дней. Интенсивность подъема уровней воды во время половодья меньше, чем в периоды прохождения паводков. Однако при заторах льда на Амуре интенсивность нарастания уровней может достигать 3 м за сутки и более.

Зимой на реках бассейна наступает устойчивая межень. Многие малые и частично средние реки (преимущественно в северной части) промерзают, и сток в них прекращается.

Во внутригодовом распределении основной объем стока по рекам бассейна Амура проходит в период с мая по сентябрь. При этом за счет регулирования стока Зейским и Бурейским водохранилищами внутригодовое распределение стока Зеи, Буреи и Амура ниже устья Зеи существенно изменилось с момента ввода в строй в 1973 г. Зейского гидроузла в сторону увеличения меженного стока за счет срезки весенне-летних паводков.

За многолетний период наблюдений (по отдельным постам более 100 лет) в бассейне Амура отмечались ярко выраженные многоводные и маловодные периоды (рисунок 1). Как видно, величина стока Амура в 2013 г., составившая $14100 \text{ м}^3/\text{с}$, является исторической.



Рисунок 1 – Многолетняя динамика годового стока Амура у г. Хабаровска

В многолетней динамике максимальных расходов воды Амура за более чем вековой период наблюдений также отмечаются периоды высокой и низкой водности. Максимальный расход паводка 2013 г., составивший $46100 \text{ м}^3/\text{с}$, также является историческим (рисунок 2).



Рисунок 2 – Многолетняя динамика максимальных расходов воды Амура у г. Хабаровска

На р. Зея, самом крупном левобережном притоке Амура, в 1973 г. в 650 км от устья построена Зейская ГЭС, с регулирующей емкостью водохранилища $32,1 \text{ км}^3$. В 2003 г. на р. Бурей в 174,5 км от устья введена в строй Бурейская ГЭС с регулирующей емкостью водохранилища $10,7 \text{ км}^3$.

На территории КНР в бассейне р. Сунгари построены 7 водохранилищ общей регулируемой емкостью $21,1 \text{ км}^3$. На Амуре и его притоках с китайской стороны было построено более 3 тыс. км

противопаводковых дамб. Также на территории КНР осуществляется переброска части стока р. Аргунь (Хайлар) в оз. Далайнор по специально построенному каналу.

2. Формирование и прохождение экстремального паводка 2013 года

Комплексный анализ гидрометеорологических условий, сложившихся в бассейне Амура в конце 2012 г. и в 2013 г., позволил установить следующие основные факторы формирования и прохождения паводка:

- предшествующая гидрологическая обстановка;
- метеорологические условия 2013 г.;
- «каскадное развитие» паводка (наложение максимумов паводочных волн притоков на основную волну амурского паводка);
- изменение пропускной способности русла и пойм, в том числе строительство берегозащитных сооружений, противопаводковых дамб.

В настоящей статье рассматриваются первые три причины экстремальности паводка, а также роль Зейского, Бурейского и китайских водохранилищ в регулировании паводка.

2.1 Предшествующие гидрологические условия

На формирование паводка 2013 г. существенное влияние оказали предшествующие гидрометеорологические условия. Водность Амура в зоне влияния Зейского, Бурейского и китайских водохранилищ в зимний и предпаводочный периоды была значительно выше среднемноголетней. Осенью 2012 года в бассейне количество осадков превышало норму на 120-200%, местами до 250%. Таким образом, практически весь бассейн был переувлажнен. Повсеместно и особенно в восточной части бассейна Амура были сформированы поздние дождевые паводки, и Амур в основном ушел в зиму с высокой водностью.

Весеннее половодье на р. Амур в 2013 г. было поздним и высоким. Фаза летней межени, которая на Амуре наблюдается в июне – первой половине июля, практически не была выражена, а начавшиеся дожди формировали сток с минимальными потерями.

2.2 Метеорологические условия 2013 года

Особенностью атмосферных процессов в июле-августе 2013 г. явилось преобладание в тропосфере выраженного барического гребня, располагавшегося над северо-западной частью Тихого океана и Охотским морем, обеспечивая меридиональную циркуляцию атмосферы. Подъем влажного тропического воздуха в умеренные широты, характерный для муссонного климата, в 2013 году начался рано. Над районами Приамурья отмечалась продолжительная активная циклоническая деятельность.

В результате интенсивными и продолжительными дождями был охвачен практически весь водосбор Амура, причем с последовательным «подключением» всех притоков по мере смещения вниз по течению основной волны амурского паводка. Основная зона осадков пришлась на Верхний и Средний Амур, бассейны рек Аргунь, Зeya и Сунгари.

Суммы осадков, выпавших как на российской, так и на китайской территориях бассейна за июнь-август 2013 г., достигали 700-800 мм (рисунок 3); на российской части они превышали норму до 2-2,5 раз и достигали 100-150% годовой нормы.

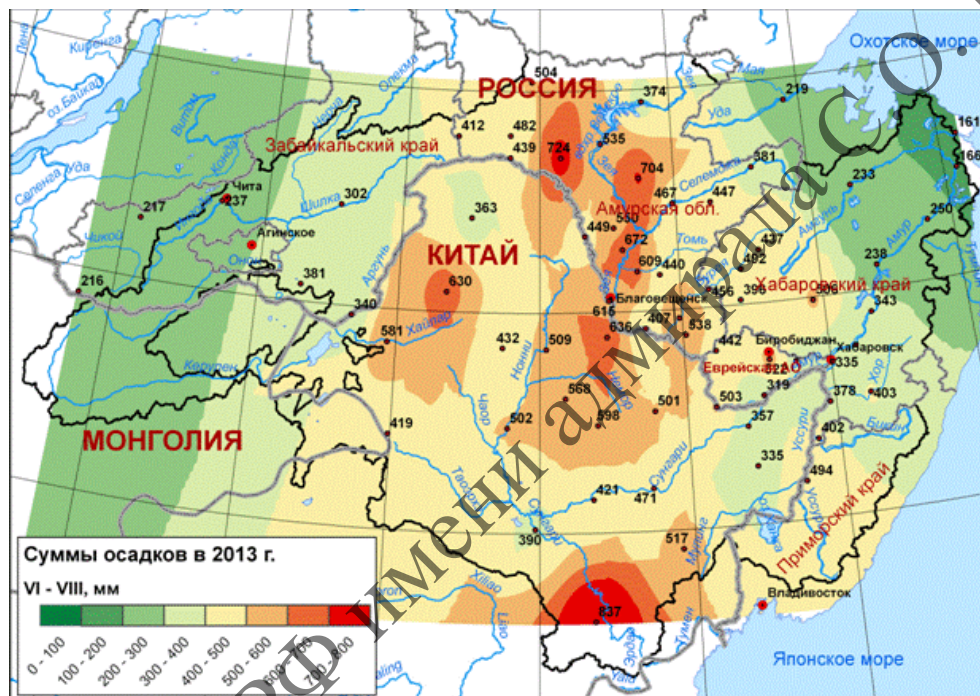


Рисунок 3 - Суммы осадков в бассейне Амура за июнь-август 2013 г.

2.3 Каскадное развитие паводка

Характерной особенностью амурского паводка 2013 г., ставшей одной из причин его экстремальности, является наложение паводочных волн притоков на основную волну амурского паводка. На рисунке 4 приведены графики хода уровней воды за июль-сентябрь по постам на Амуре, ближайших к устьям его основных притоков, и по самим этим притокам. Как видно, гребень паводка постепенно продвигался от Благовещенска до Хабаровска с 16.08 по 4.09, при этом на него накладывались максимумы паводочных волн основных притоков.

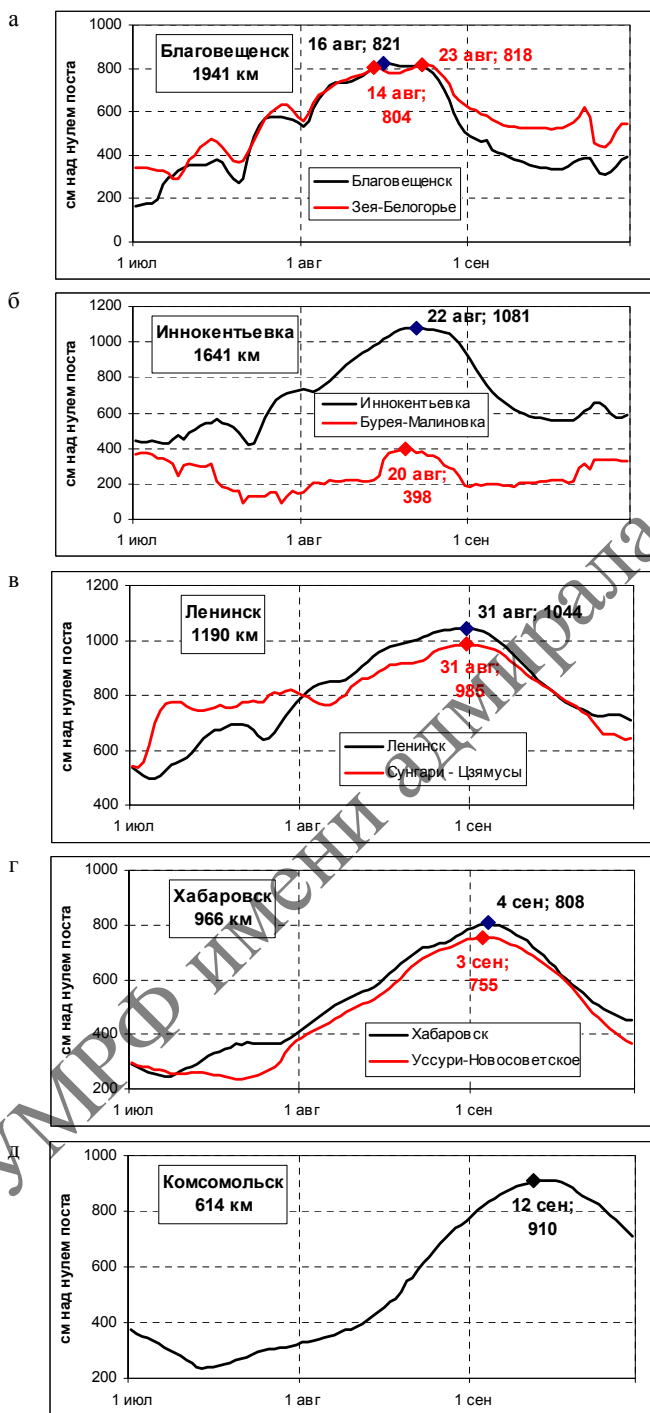


Рисунок 4 – Прохождение волны паводка 2013 г. по Амуру и его основным притокам. Под названием поста приведено расстояние от устья Амура

Верхний Амур

Амурский паводок 2013 г., приведший к масштабному наводнению, начинался в июле в западной части бассейна, где основные зоны осадков располагались над правобережной частью водосбора Зеи, над равнинной частью Верхнего и Среднего Амура в Амурской области, а также в КНР, над верховьями рек Сунгари, Нонни (приток Сунгари) и Хайлар (Аргунь). В результате сначала разлились притоки р. Зея. На р. Правый Урган (приток Зеи в 72 км ниже ГЭС) был превышен исторический максимум на 77 см, пойма реки была затоплена более месяца.

Сток Верхнего Амура не был экстремальным. Водность рек Шилки и Аргуни в июле и первой половине августа была повышенной, особенно – р. Аргунь, где в начале августа у с. Олоча была превышена отметка ОЯ на 133 см. Пойма р. Аргунь была подтоплена на 1,4–3,9 м. Истоки Аргуни расположены близко к истокам р. Нонни – главного притока р. Сунгари, именно на этой территории осадки были особенно интенсивными.

В бассейне Шилки периодически формировались паводки с выходом воды из берегов на отдельных участках, не достигавшие ОЯ. В результате максимальные уровни Верхнего Амура в Амурской области, наблюдавшиеся 16–18 августа, были ниже отметок ОЯ с глубиной затопления поймы около 0,5–1,0 м. Лишь на участке Верхнего Амура ниже впадения р. Хумархэ (КНР) глубина затопления поймы в середине августа составляла более трёх метров.

Паводок на Амуре в районе г. Благовещенска начался 5 июля, подъем продолжался до 14 августа. Максимум 822 см зафиксирован 16 августа. Устойчивый спад начался с 24 августа. Паводок в Благовещенске в 2013 г. превысил отметку ОЯ на 22 см, при этом он является четвертым в ряду наблюдаемых наивысших уровней, после 1928, 1958 и 1984 гг.

На территории КНР, как и в России, предпосылки большого наводнения начали накапливаться еще в мае, когда на ряде притоков образовалось высокое половодье (Симонов, 2013). Например, приток р. Хайлар (Аргунь) - река Имин, среднемноголетний сток которой оставляет около 35 м³/с, к 9 мая переполнила водохранилище Хунхуаерци и дала паводок с расходом 328 м³/с. С этого дня наводнения в бассейне Аргуни практически не прекращались.

Река Генъхе, стекающая с Большого Хингана и впадающая в Аргунь выше Приаргунска, была весьма полноводна еще с мая, а 27–29 июля по ней пошел самый большой паводок с расходом до 3400 м³/с (среднемноголетний расход 121 м³/с). Этот мощный паводок, следуя далее, затопил населенные пункты Аргунск, Зоргол, Ишага и Олочи в России.

30 июля - 2 августа максимальный за всю историю наблюдений паводок с расходом 1620 м³/с прошел в верховьях р. Хайлар. К 9 августа к водозабору канала Хайлар - озеро Далайнор пришел гребень паводка с расходом 1330 м³/с (среднемноголетний расход 114 м³/с), Канал работал на пределе (пропускная способность 121 м³/с), однако к 25 августа в 40 км ниже водозабора пойма Аргуни (Хайлара) на границе РФ и КНР была залита по бровку.

На самом Амуре 21-23 июля предупреждение о крупном паводке выдала станция Хума и далее станции ниже по течению до г. Хэйхэ (напротив Благовещенска). Уровень поднялся на 81 см выше отметки ОЯ. 9 августа расход в Верхнем Амуре у гидропоста Калуншан (выше г. Хэйхэ) оценивался в 21600 м³/с.

Средний Амур

Волна паводка, двигаясь с Верхнего Амура, 16 августа достигла г. Благовещенска практически одновременно с такой же волной, идущей по р. Зея (рисунок 5). В результате сложения этих волн паводок удвоился и практически совпадает с гидрографом на г/п Гродеково на Среднем Амуре со сдвижкой на время добегания около 2 суток. Максимальные уровни Среднего Амура в Амурской области, а также и самой Зеи 16-20 августа были очень высокими, превысив отметки опасных явлений на величины 0,22-1,74 м. Глубина затопления пойм составляла до 4.5 м, ширина разливов достигала 20-30 км.

Основной амурский паводок, смещаясь вниз по течению, на самом гребне волны принимал в себя большую воду основных притоков – Буреи, Сунгари и Уссури, а также многочисленных небольших притоков.

22 августа пик Амурского паводка принял максимум волны с Буреи (см. рисунок 4-б), 31 августа в пос. Ленинское сошлись максимумы Амура и Сунгари (см. рисунок 4-в). 4 сентября волна Амурского паводка достигла Хабаровска, в это же время сюда также подошел максимум по Уссури (см. рисунок 4-г). Таким образом, к Хабаровску одновременно (с учетом времени добегания) подошли максимумы паводочных волн практически со всего огромного Амурского бассейна.

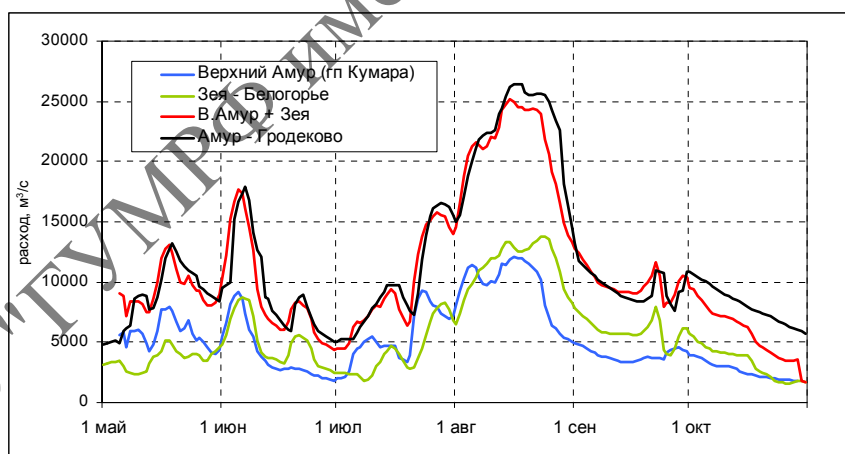


Рисунок 5 – Расходы воды в узле Верхний Амур – Зея – Средний Амур

На участке Среднего Амура от г. Благовещенска до с. Екатерино-Никольское паводок шёл, практически совпадая с паводком 1984 года (последним из наблюдавшихся катастрофических па-

водков в бассейне). Ниже по течению уровни Амура в 2013 году превысили исторические максимумы. Ниже устья Сунгари (у с. Ленинское) уровень Амура был уже более чем на метр выше, чем в 1984 году. При этом продолжительность стояния таких высоких уровней (с превышением исторических максимумов и опасных отметок) составила у крупных городов около и более месяца, а продолжительность затопления поймы на глубину 2-4 метра - до двух и местами более месяцев.

Как Сунгари, так и Уссури в 2013 году были более многоводными. Максимальный расход Сунгари у г. Цзямусы 31 августа составил $13300 \text{ м}^3/\text{с}$. Бóльшая водность Сунгари наблюдалась лишь в 1998 г. (с максимальным расходом $16200 \text{ м}^3/\text{с}$), а самый многоводный в низовьях Сунгари 1960 г. характеризовался расходом $18400 \text{ м}^3/\text{с}$.

Наивысший уровень воды р. Амур у г. Хабаровска был зафиксирован 4 сентября и составил 808 см, что превышает отметку ОЯ на 2,08 м, а исторический максимум 1897 г. – на 1,66 м. Максимальный расход воды в Амуре у г. Хабаровска был измерен специалистами ФГБУ «ГГИ» и Дальневосточного УГМС 5 сентября 2013 г. при уровне воды 801 см. Рассчитанный расход воды при наивысшем уровне 808 см определен в $46400 \text{ м}^3/\text{с}$. На рисунке 6 представлен гидрограф стока Амура у г. Хабаровска в 2013 г.

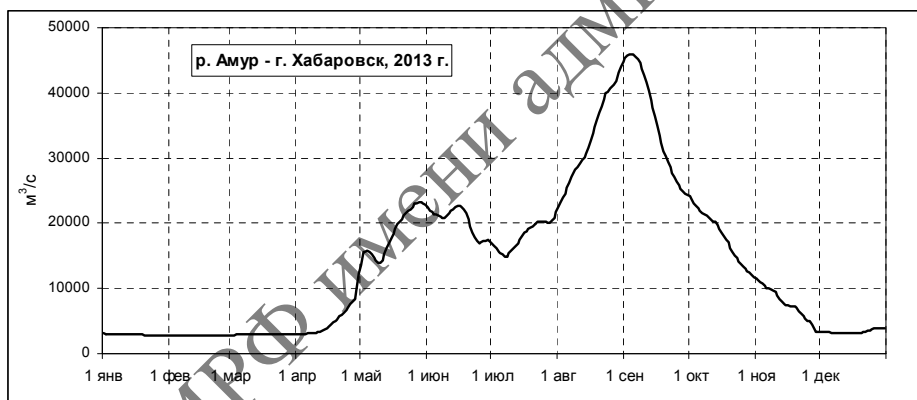


Рисунок 6 - Гидрограф стока Амура у г. Хабаровска в 2013 г.

На территории КНР в бассейне Сунгари в регулировании паводка участвовали 7 водохранилищ – Ниэрцзи, Чаэрсен, Вендеген, Юэляньпао – на Нонни и правых притоках; Байшань, Фенмынь и Хадашань на 2-й Сунгари (Симонов, 2013). В совокупности они обладают регулирующей емкостью около 22 км^3 , но только ее часть могла быть использована для сглаживания пика паводка. Водоохранилище Ниэрцзи при притоке $9440 \text{ м}^3/\text{с}$ снизило пик паводка на 42% и сбрасывало 11-20 августа $5500 \text{ м}^3/\text{с}$. В водохранилище Байшань приток был $9270 \text{ м}^3/\text{с}$, а вниз оно пропускало $4000 \text{ м}^3/\text{с}$, задерживая 57% паводка. В нижележащее водохранилище Фенмынь приток составлял $10700 \text{ м}^3/\text{с}$, а ниже оно пропускало $1800 \text{ м}^3/\text{с}$, задерживая 87% воды.

Многочисленные прорывы противопаводковых дамб были отмечены на р. Сунгари и ее притоках. Разрушения плотин регулирующих водохранилищ не зафиксировано.

Далее вниз по собственно Сунгари паводок шел без каких-либо чрезвычайных происшествий. Пик паводка миновал г. Харбин 26 августа при уровне 119,49 м, расходе 10200 м³/с (обеспеченность около 7%). Главной особенностью прошедшего паводка была его очень большая продолжительность - по сути, с июня по сентябрь. Китайскими источниками паводок в верховьях 2-й Сунгари и Нонни характеризуется как 2%-5%, в средних и нижних течениях - как 5%, а на Амуре - как 1%.

Основные экстремальные события в ходе паводка на территории КНР произошли вдоль Амура. Чрезвычайные ситуации с выходом из строя дамб, затоплением деревень, перекрытием крупных путей сообщения произошли во время паводка практически во всех приамурских уездах. Приграничные порты от Хэйхэ до Фуюаня ушли под воду и прекратили функционировать.

Нижний Амур

Ниже г. Хабаровска волна паводка продвигалась, постепенно расплываясь на поймах, но, тем не менее, оставаясь экстремальной. 12 сентября пик паводка подошел к г. Комсомольск-на-Амуре (см. рисунок 4-д). Максимальный уровень воды составил 912 см над нулем поста, что превышает отметку ОЯ на 2,62 м, а исторический максимум 1959 г. – на 2,11 м. На рисунке 7 представлен гидрограф стока Амура у г. Комсомольск-на-Амуре в 2013 г. Максимальный расход воды паводка 2013 г. составил 42600 м³/с.

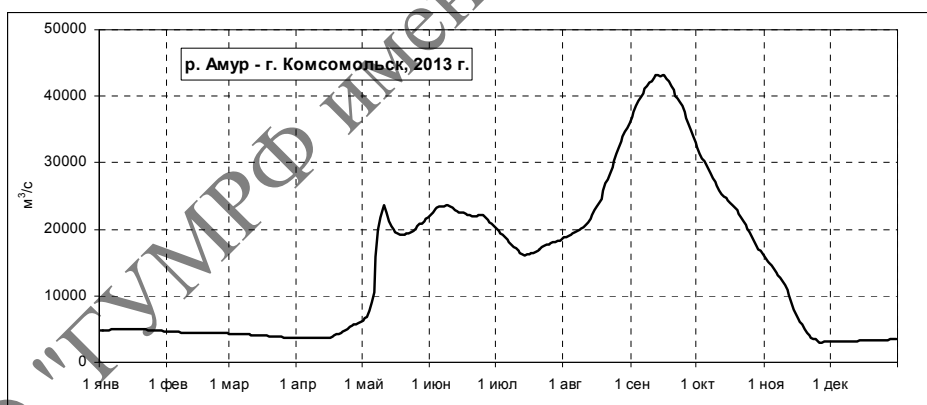


Рисунок 7 - Гидрограф стока Амура у г. Комсомольск-на-Амуре в 2013 г.

Экстремальные уровни воды с превышением исторических максимумов сохранялись вниз по течению Амура вплоть до с. Тахта в 123 км от устья. В г. Николаевск-на-Амуре, расположенном в 46 км от устья, практически в вершине эстуария, паводок окончательно расплывался, и его уровни

не превысили отметку ОЯ. Более того, наивысший уровень паводка оказался намного ниже уровня весеннего половодья в мае 2013 г.

2.4 Роль Зейского и Бурейского водохранилищ в регулировании паводка 2013 г.

Режим работы Зейского гидроузла регламентируется «Основными правилами использования водных ресурсов Зейского водохранилища на р. Зее», утвержденными Министерством мелиорации и водного хозяйства РСФСР в 1984 году. В 2014 г. была разработана уточненная версия Правил с учетом данных 2013 г.

Зейское водохранилище является единственным регулятором стока в бассейне реки Зeya, способным обеспечить срезку пиков половодий и паводков и сгладить уровенный режим нижнего течения реки Зeya и Среднего Амура.

На рисунке 8 приведены ежедневные данные по приточности к Зейскому водохранилищу, сбросам воды из него и уровням верхнего бьефа за период с июня по октябрь 2013 г.

Приток к водохранилищу Зейской ГЭС в 2013 г. по величине максимального расхода не был выдающимся, однако ввиду большой продолжительности паводка объем притока оказался экстремальным.

Пик паводка на р. Зeya пришелся на 1 августа, когда приток к створу Зейской ГЭС достиг $11700 \text{ м}^3/\text{с}$. Этот расход является седьмым по величине (исторический максимум $15200 \text{ м}^3/\text{с}$ зафиксирован в 2007 г.), а его обеспеченность составляет 5-6% (рисунок 9).

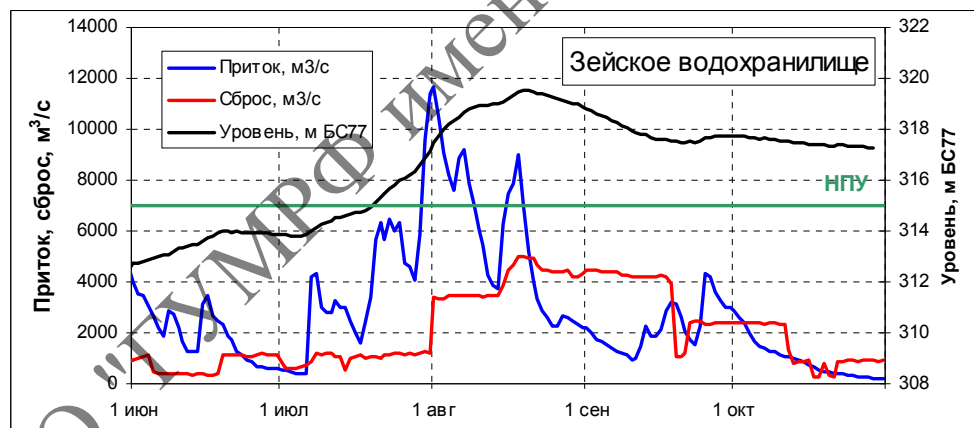


Рисунок 8 - Ежедневная приточность, сбросы воды и уровни верхнего бьефа Зейского водохранилища в паводок 2013 г. по данным РусГидро (<http://www.zges.rushydro.ru/>)



Рисунок 9 - Многолетние изменения максимального суточного притока к Зейскому водохранилищу (уточненная версия ПИВР Зейского водохранилища)

Паводок 2013 г. в бассейне Зейского водохранилища характеризовался экстремально высоким объемом притока. Наибольший приток $15,0 \text{ км}^3$ наблюдался в августе, его обеспеченность около 0,5% (1 раз в 200 лет). Суммарный приток к водохранилищу за июль-август составил $25,2 \text{ км}^3$, что соответствует обеспеченности около 0,8%. Аккумуляция стока водохранилищем в июле составила около 8 км^3 , в августе – 3 км^3 . В результате регулирования стока Зейским водохранилищем срезка максимального уровня Зеи у с. Белогорье по оценкам различных источников составила от 20-30 до 150 см.

Режим работы Бурейского гидроузла регламентируется «Временными правилами использования водных ресурсов Бурейского водохранилища на р. Бурее», утвержденными приказом Амурского БВУ от 2009 года.

Летний паводок на р. Бурей в 2013 г. не был выдающимся. Обеспеченность максимального среднесуточного притока к Бурейскому водохранилищу приближенно оценена в 80%. Объем суммарного притока за июль-август составил $13,0 \text{ км}^3$ (обеспеченность 24%). В результате регулирования стока Бурейским водохранилищем срезка максимального уровня воды у с. Малиновка ориентировочно составила около 0,5 м.

3. Последствия наводнения 2013 г. в бассейне Амура

По официальным данным МЧС России (Катастрофическое..., 2013) в бассейне Амура и на прилегающих территориях было затоплено и подтоплено 366 населенных пунктов с общим числом жителей более 170 тыс. человек, более 13 тыс. жилых домов, 504 социальных, 14 сельскохозяйственных, 34 гидротехнических и 10 опасных объектов, около 22,5 тыс. дачных и приусадебных участков, более 600 тыс. га сельхозугодий, более 1,7 тыс. км автодорог, 185 мостов, свыше

500 км и 5 тыс. опор ЛЭП. Существенным затоплениям подверглись крупные города – Хабаровск и Комсомольск-на-Амуре. Десятки тысяч людей были эвакуированы, многие потеряли жилье и имущество. По окончательной оценке Правительства Российской Федерации наводнение причинило прямой ущерб экономике страны на сумму 85-90 миллиардов рублей, а также косвенный – на 439 миллиардов рублей. Общая сумма ущерба от наводнения 2013 года составляет 527 миллиардов рублей.

Не менее значительный ущерб был причинён северо-восточным провинциям Китая. По оценкам китайских властей (Симонов, 2013), от наводнения пострадало 8 миллионов человек в тысячах населенных пунктов. По меньшей мере, 25 человек погибли и 115 человек пропали без вести. Более 37 тысяч домов были разрушены и 440 тысяч человек эвакуированы из провинций Хэйлуцзян, Цзилинь и Внутренняя Монголия. Разрушениям подверглись 400 километров дамб или 15% их общей длины, было затоплено и подтоплено 3 млн. га пахотных земель. Прямой ущерб оценивается не менее чем в 3,5 миллиарда долларов.

Список литературы

- Катастрофическое наводнение 2013 года в Дальневосточном федеральном округе. Том I. Уроки и выводы: Научно-методический труд / МЧС России. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2013. 154 с.: ил.
- Симонов Е.А. Китайская водная политика и паводки 1998-2013 гг. –Интернет-ресурс http://www.eecca-water.net/file/china_and_flood_2013.pdf.

i

- i CATASTROPHIC 2013 FLOOD IN THE AMUR RIVER BASIN: CAUSES, FEATURES AND CONSEQUENCES (A.L. Shalygin, L.O. Dugina,)

Considered are the causes of the catastrophic flooding which occurred in the Amur River basin in 2013. Analysed are the features of the extreme flood formation and propagation in different parts of the Amur basin. The influence of the Zeya, Bureya and the Chinese reservoirs on the 2013 flooding is assessed. Data is given on the impact of the extreme flood on the Russian and Chinese parts of the Amur basin

НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА РЕКАХ БАСЕЙНА АМУРА В ПЕРИОД ПРОХОЖДЕНИЯ ПАВОДКА 2013 ГОДА

Шкарбанов Р.И.

ФГБУ «ГГИ», Санкт-Петербург, mc_woodman@mail.ru

Рассматриваются результаты проведенных полевых гидрометрических работ на реке Амур и ее некоторых притоках в период прохождения паводка

При прохождении уникальных паводков очень редкой повторяемости для понимания процессов его формирования, а также для обоснования мероприятий по использованию потенциально затопляемых территорий и по их защите от наводнений, чрезвычайно важно измерение расходов при наивысших уровнях воды. В связи с этим, в период с 27 августа по 10 сентября 2013 г. специалистами ФГБУ «ГГИ» и ФГБУ «Дальневосточное УГМС» проведены полевые гидрометрические работы (измерение расходов воды) на р. Амур и некоторых ее притоках (реки Зея, Буря, Архара). Измерения выполнялись с помощью акустического профилографа ADCP RiverRay, позволяющего получать данные о характеристиках потока в условиях быстрого изменения уровня воды, при больших глубинах и скоростях течения. Этот прибор существенно сокращает сроки работы на реке, облегчает сам процесс измерения расхода воды и позволяет получать данные с очень высокой точностью.

Работы по измерению расходов воды проводились с целью получения реальных значений стока при уровнях, близких к максимальным. Полученные данные позволили существенно образом уточнить многолетние кривые связи расходов и уровней воды и, как следствие, получить надежную информацию по ежедневным расходам воды. Результаты выполненных измерений приведены в таблице 1. Среднеквадратическая ошибка измеренных расходов воды не превысила 2,4%. Расположение створов измерения расходов воды показано на рисунках 1-5.

Измерения расходов воды на р. Амур у Хабаровска и Комсомольска выполнены при уровнях воды, близких к максимальным уровням паводка. Расход воды у Хабаровска, измеренный в створе гидрологического поста, подтвержден суммарными расходами, измеренными в протоках. Измеренные расходы воды в р. Амур являются максимальными за весь период наблюдений.

Таблица 1 – Основные сведения по измеренным расходам воды в августе–сентябре 2013 года

Река	Дата измерения 2013 г.	Координаты створа		Измеренный расход, м ³ /с	Ширина реки, м	Максимальная глубина, м	Средняя глубина, м	Максимальная скорость, м/с	Средняя скорость, м/с	Среднеквадратическое отклонение, %
		широта	долгота							
Архара	29.08	49°23'54"	130°08'08"	169	82,3	4,5	1,41	2,53	1,46	2,41
Зея	31.08	50°30'37"	127°39'46"	7880	1091	8,05	5,69	2,06	1,27	0,44
Буряя	29.08	49°47'00"	129°56'21"	1410	421	4,40	2,83	3,02	1,18	1,39
р. Амур, гидроствор Хабаровск	05.09	48°32'45"	134°59'56"	46000	2045	19,3	11,1	3,76	2,03	1,57
р. Амур, 24 км выше гидроствора Хабаровск	05.09	48°25'31"	134°52'34"	33400	2429	14,8	11,0	2,50	1,25	1,07
Протока Амурская, 35 км выше гидроствора Хабаровск	05.09	48°19'48"	134°51'03"	13200	1039	15,0	10,4	2,13	1,22	0,4
р. Амур, г. Комсомольск	10.09	50°32'12"	137°03'47"	42500	1305	26,1	18,8	2,84	1,74	1,04



Рисунок 1 – Гидроствор на р. Зея у п. Белогорье



Рисунок 2 – Гидроствор на р.Буря у в.д моста



Рисунок 3 – Гидроствор на р. Архара у п. Аркадьевка



Рисунок 4 – Гидростворы на р. Амур у г. Хабаровска



Рисунок 5– Гидроствор на р. Амур у г. Комсомольск-на-Амуре

Для каждого створа получены поперечные профили и распределение мгновенных скоростей по ширине и глубине потока (рисунки 6-10).

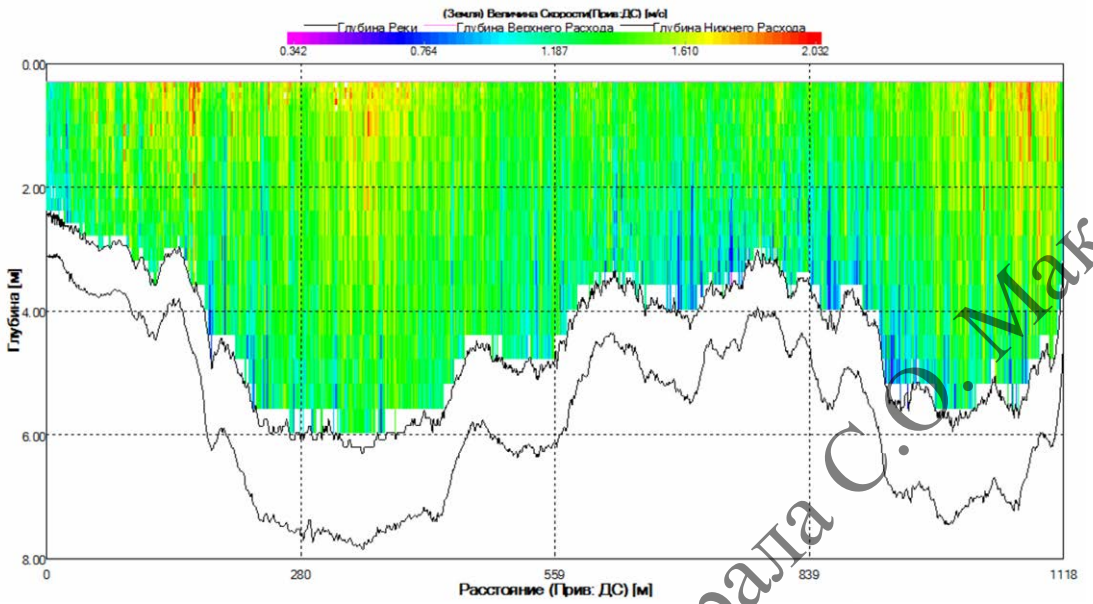


Рисунок 6 – Поперечный профиль р. Зея в створе гидроствора у п. Ведогорье с распределением мгновенных скоростей

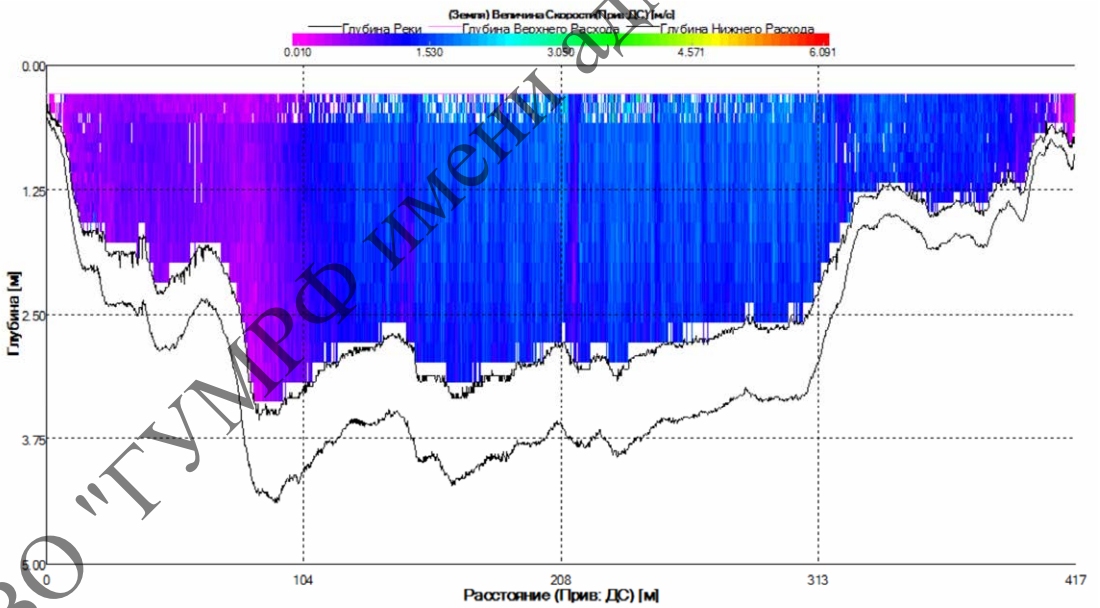


Рисунок 7 – Поперечный профиль р. Буряя в створе а/д моста с распределением мгновенных скоростей

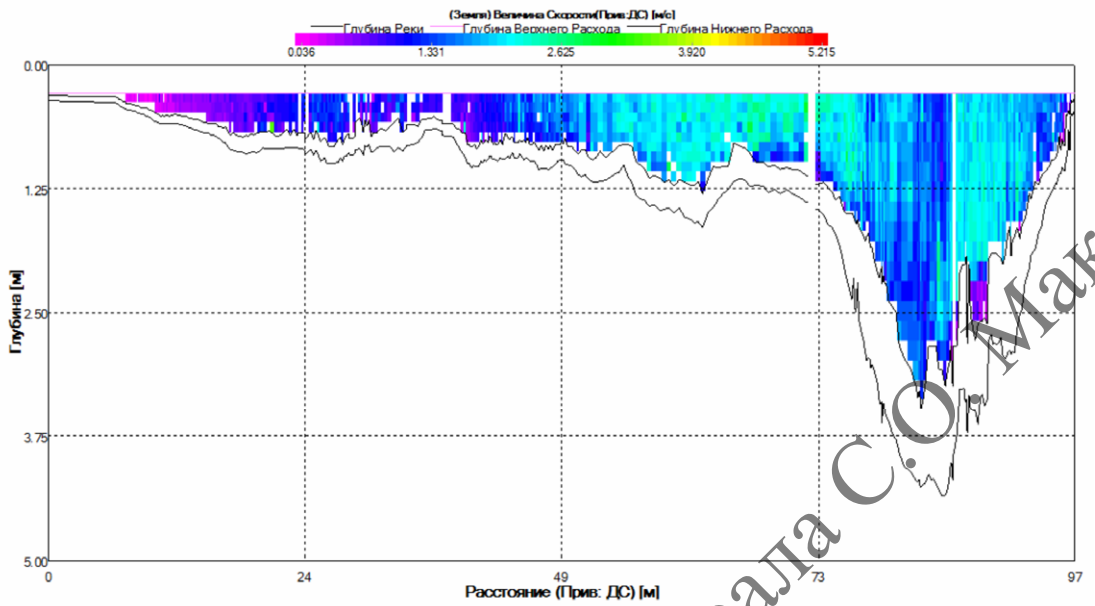


Рисунок 8 – Поперечный профиль р. Архара в створе а/д моста с распределением мгновенных скоростей

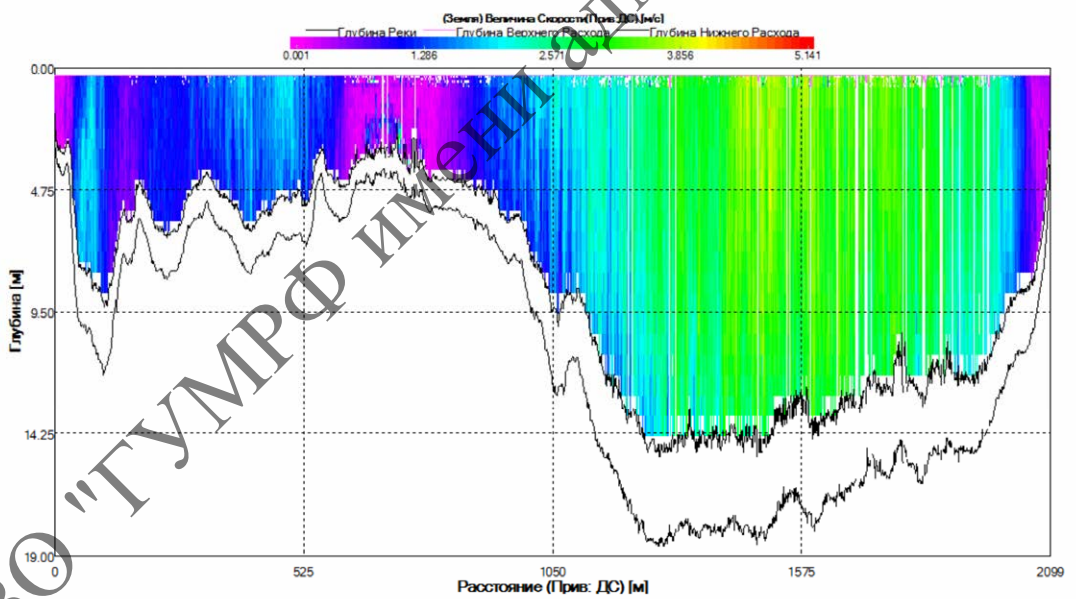


Рисунок 9 – Поперечный профиль р. Амур в створе гидроствора № 2 (г. Хабаровск) с распределением мгновенных скоростей

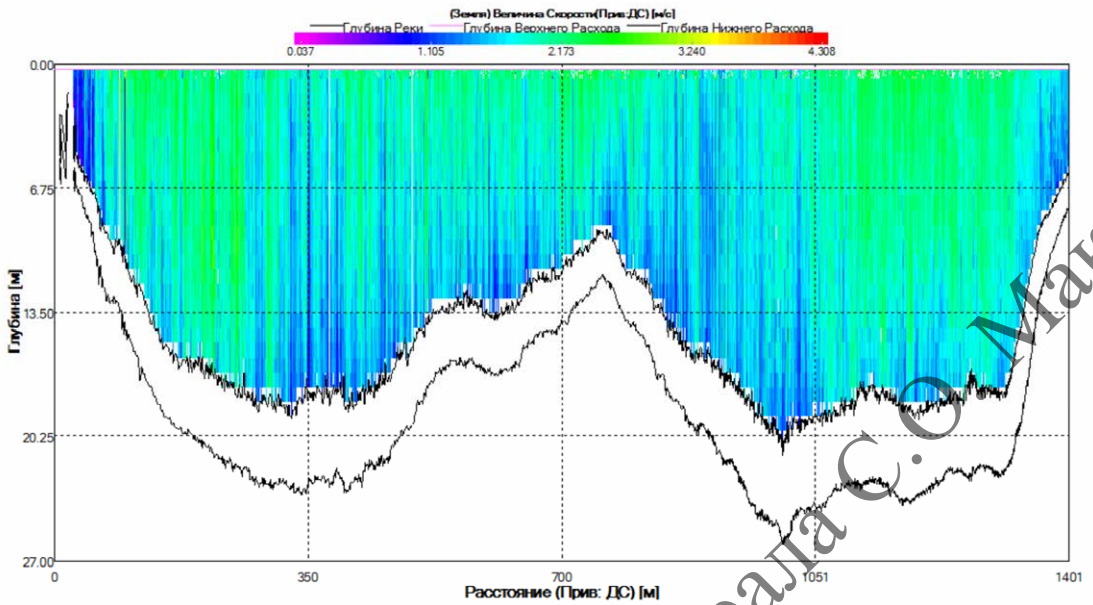


Рисунок 10 – Поперечный профиль р. Амур в створе г. Комсомольск-на-Амуре с распределением мгновенных скоростей

i

ⁱ FIELD STUDIES ON THE AMUR TRIBUTARIES DURING 2013 FLOOD (R.I. Shkarbanov)

Analysed are the results of the hydrometric surveys carried out on the Amur River and some of its tributaries during the 2013 flood

АНАЛИЗ ПАВОДКОВОЙ СИТУАЦИИ В БАССЕЙНЕ АМУРА В 2013 ГОДУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Иванов В.А.

ФГБУ «ГГИ», Санкт-Петербург. iva50nov@yandex.ru

Приводится анализ паводковой ситуации, сложившейся на р. Амур в период с июля по сентябрь 2013 г. с использованием космических снимков. Прослеживается прохождение паводочных волн по притокам Амура и их наложение на основной амурский паводок

В статье приводится анализ паводковой ситуации, сложившейся на р. Амур в период с июля по сентябрь 2013 г. с использованием космических снимков NASA, взятых с веб-сайта <https://earthdata.nasa.gov>.

Подбор снимков осуществлялся в зависимости от решаемой задачи. Для количественной оценки масштабов затопления прибрежных территорий, определения площадей затопления выполнена подборка снимков речных долин рек Зeya и Амур в среднем и нижнем течении на момент, максимально приближенный к сроку прохождения паводочной волны, т.е. при максимальных уровнях воды. Зная даты прохождения максимума паводочной волны вниз по течению по отдельным пунктам наблюдений за уровнем воды и выбирая спутниковые снимки при отсутствии облачности над тем или иным районом долины реки Амур, для отдельных участков были отобраны «благоприятные» для обработки информации дни. В таблице 1 представлены результаты этого отбора.

Таблица 1 – Выбранные даты спутниковых снимков

Характеристика участка	Время прохождения максимального уровня воды	Выбранные даты спутниковых снимков
От устья р. Селемджи до г. Благовещенска	С 13.08 по 16.08	14.08
От г. Благовещенска до с.Екатерино-Никольское	С 16.08 по 24.08	20,21.08
От с. Екатерино-Никольское до г. Хабаровска	С 24.08 по 04.09	27.08 и 06.09
От г. Хабаровска до устья р. Амур	С 04.09 по 17.09	06,10,13,16,18,19.09

Отобранные фрагменты с максимальным разрешением фотографировались с помощью специальной опции сайта и экспортировались в программу AutoCAD. Затем отдельные фото увязывались между собой, монтировались, в результате чего получался спутниковый снимок достаточно высокого разрешения. Масштабирование сборного рисунка в AutoCAD осуществлялось по характерным опознанным объектам (створ плотины, ж/д или автомобильные мосты, характерные очертания береговой линии, сужения русла и др. элементы). В дальнейшем на нем прорисовывались урезы правого и левого берегов и острова (рисунок 1).

Используя полученный таким образом смонтированный масштабированный снимок, удалось получить геометрические характеристики зон затопления, определить вероятные участки формирования подпора на р. Амур, тяготеющие к естественным сужениям долины реки (таблица 2). Полученные материалы могут быть использованы при выборе местоположения морфостворов через долину р.Амур, для предварительной оценки степени затопления ее долины.

Таблица 2 - Сведения о характеристиках зон разлива рек Зея и Амур на период прохождения паводка 2013 года (по данным спутниковых снимков)

Река	Характеристика участка	Длина участка, км	Площадь разлива, км ²	Ширина зоны разлива, км	
				Средняя	Максимальная
Зея	Устье р. Селемджи – г. Благовещенск	275	1260	4,6	13,6
Амур	г. Благовещенск –п. Пашково	408	1900	4,6	12,9
Амур	п. Пашково – п. Екатерино-Никольское	167	180	1,1	9,2
Амур	п. Екатерино-Никольское – г. Хабаровск	404	4200	10,4	22,3
Амур	г. Хабаровск - устье	962	15900	16,5	Около 50

Аналогичные построения были выполнены за период устойчивой летней межени по спутниковым снимкам за май-июнь 2012 г. (рисунок 2). При этом урезы правого и левого берегов охватывают все работающие протоки многорукавного русла. В таблице 3 представлены геометрические характеристики русла, аналогичные характеристикам, полученным при паводочном режиме.

Таблица 3 - Сведения о характеристиках русел рек Зея и Амур на период устойчивой летней межени 2012 года (по данным спутниковых снимков)

Река	Характеристика участка	Длина участка, км	Площадь между урезами, км ²	Ширина многорукавной зоны, км	
				Средняя	Максимальная
Зея	устье р. Селемджи – г. Благовещенск	275	216	0,8	5,0
Амур	г. Благовещенск –п. Пашково	408	396	1,0	6,0
Амур	п. Пашково – п. Екатерино-Никольское	167	96	0,6	1,8
Амур	п. Екатерино-Никольское – г. Хабаровск	404	1213	3,0	14,2
Амур	г. Хабаровск - устье	962	4090	4,3	До 25

Совмещение снимков 1 и 2 позволяет выделить по длине Амура участки, на которых ширина потока в межень и в паводок изменяется незначительно. Они могут быть интересны специалистам для назначения морфостворов, организации стационарных наблюдений за гидрологическими элементами.

Кроме получения геометрических характеристик элементов русловой сети, по «степени черного» на снимке можно судить об ее обводненности. Выполнено сравнение снимков нижнего течения р. Амур на участке от г. Хабаровска до устья, почти на одну и ту же дату начала лета, но за разные годы – 2012 и 2013 гг. (рисунок 3).

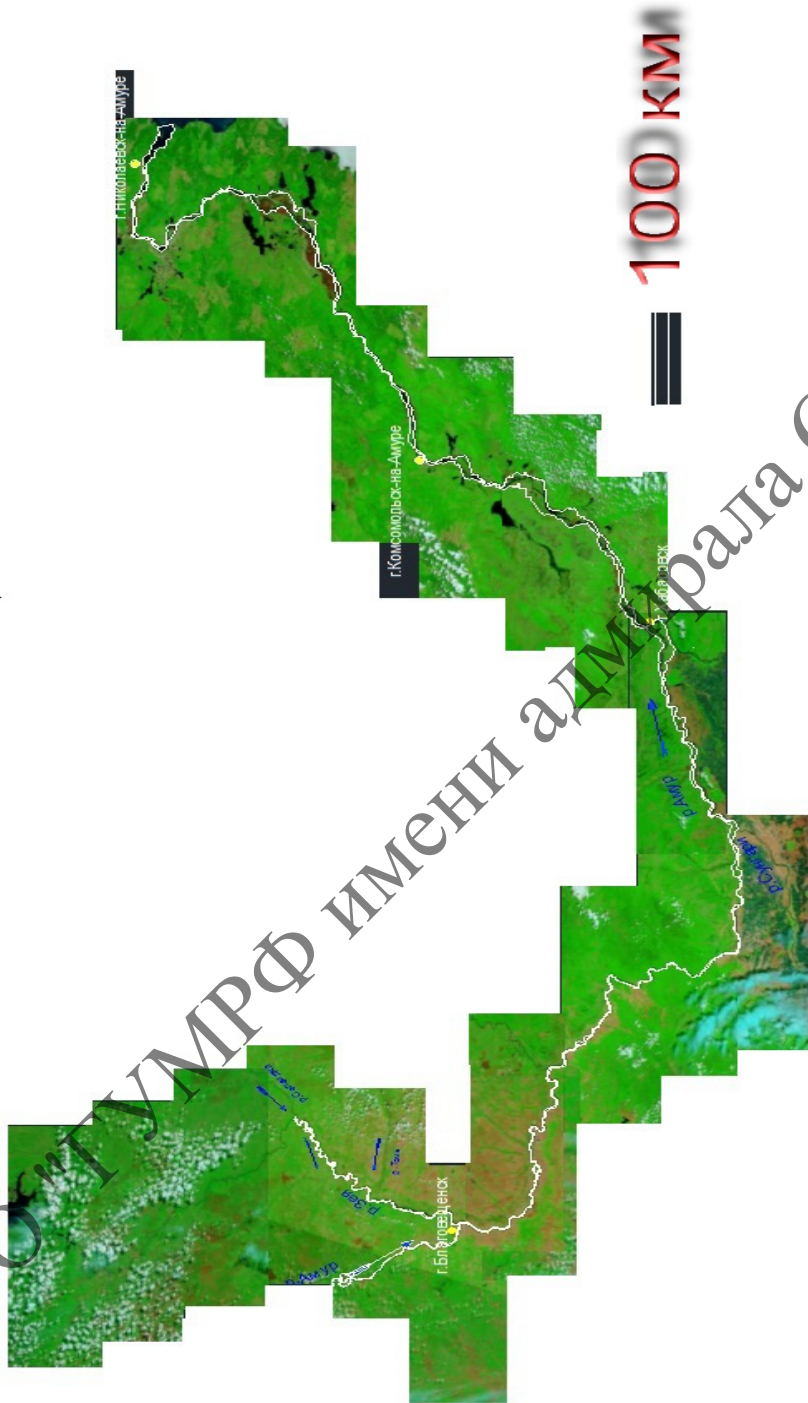


Рисунок 2 - Русло реки Амур в период устойчивой летней межени в 2012 году

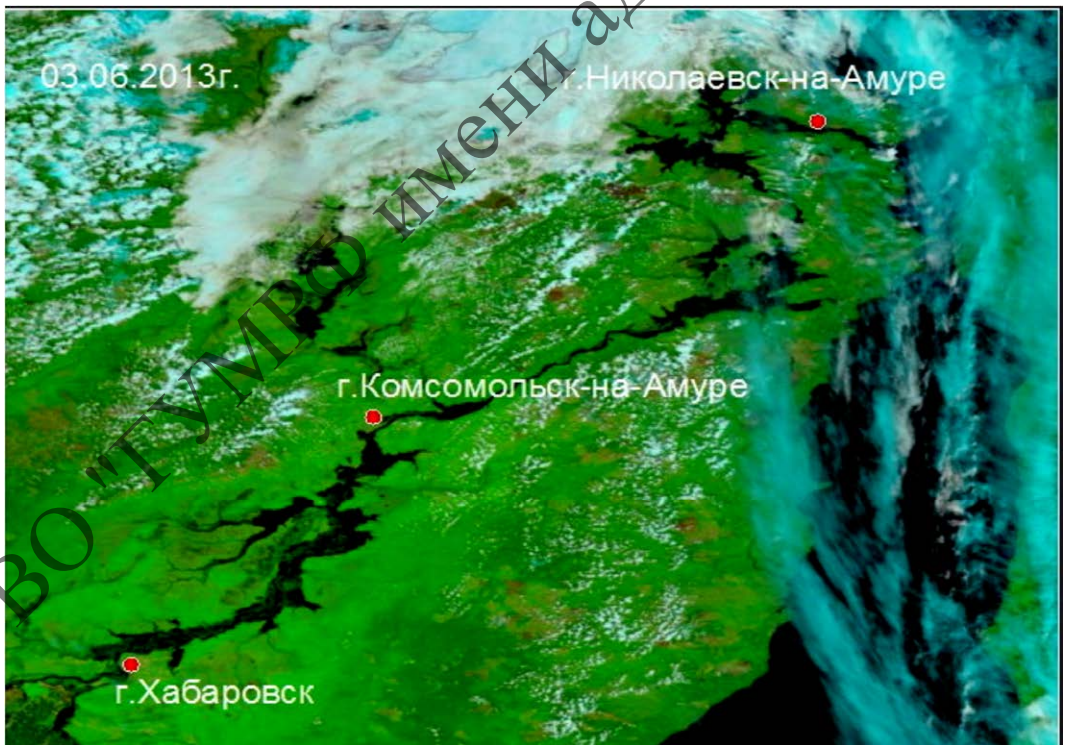


Рисунок 3 - Нижний Амур 29.05.2012 г. (вверху) и 03.06.2013 г. (внизу)

На снимке 2013 года отчетливо видна повышенная обводненность русловой сети за месяц до начала паводка на Амуре. Сравнение со снимком 2012 г. очень контрастное.

Вклад р. Сунгари в катастрофический паводок 2013 года можно проследить по серии спутниковых снимков за последовательные даты (рисунок 4).

На снимке за 6 июня Средний Амур - в нормальном состоянии, повышенная водность отмечается сразу за г. Хабаровском. С 6 июля - начала паводка на верхнем Амуре - р. Сунгари в своем нижнем течении уже начала увеличиваться в размерах. С 15 июля «степень черного» на снимке сразу после впадения р. Сунгари постепенно увеличивается, при этом реакции водосбора непосредственно выше впадения р. Сунгари еще нет. На снимке за 1 августа видно, как прибавляется «степень черного» сразу после выхода р. Амур из Малой Хинганской «трубы». На снимке за 20 августа уже отчетливо видны затопленные территории Бурейской низменности (участок выше по течению п. Пашково).

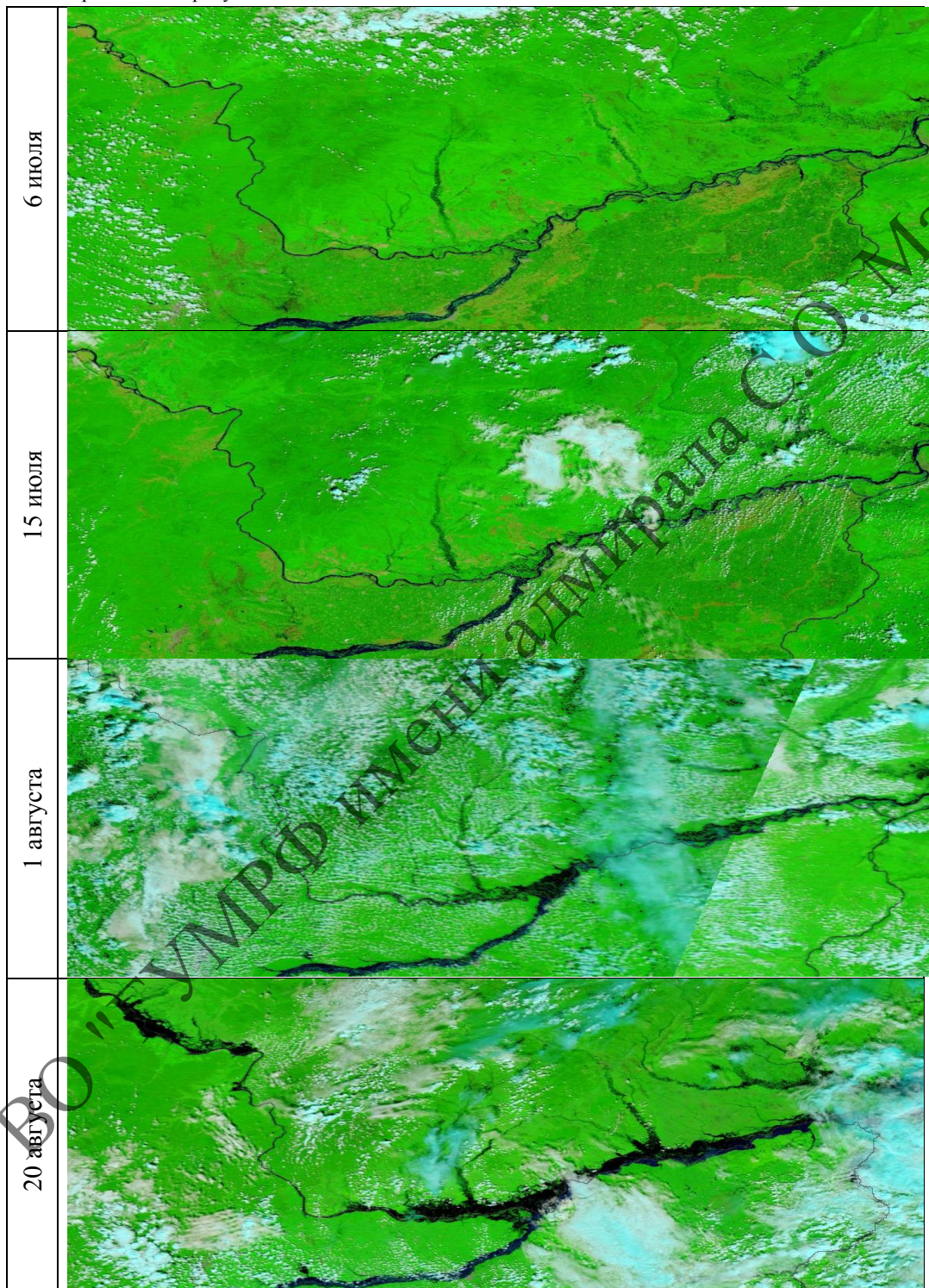
Процесс опорожнения затопленных пойменных массивов среднего Амура заметен на снимке за 4 сентября - выше п. Пашково, и за 8 августа – выше впадения р. Сунгари. На снимке за 24 сентября видно, что пойма р. Уссури почти полностью освободилась от паводочных вод, а р. Сунгари все еще продолжает поддерживать высокую водность Среднего и Нижнего Амура.

Таким образом, можно сделать вывод, что паводок на р. Сунгари начался раньше, чем на Среднем Амуре, однако из-за больших уклонов, а значит и больших скоростей, волна с Верхнего Амура и Зеи «догнала» и наложилась на паводок, сформированный на водосборе р. Сунгари. Это явилось одной из причин того, что максимальный подъем уровней воды в Амуре ниже устья р. Сунгари в паводок 2013 года был экстремальным и носил исторический характер.

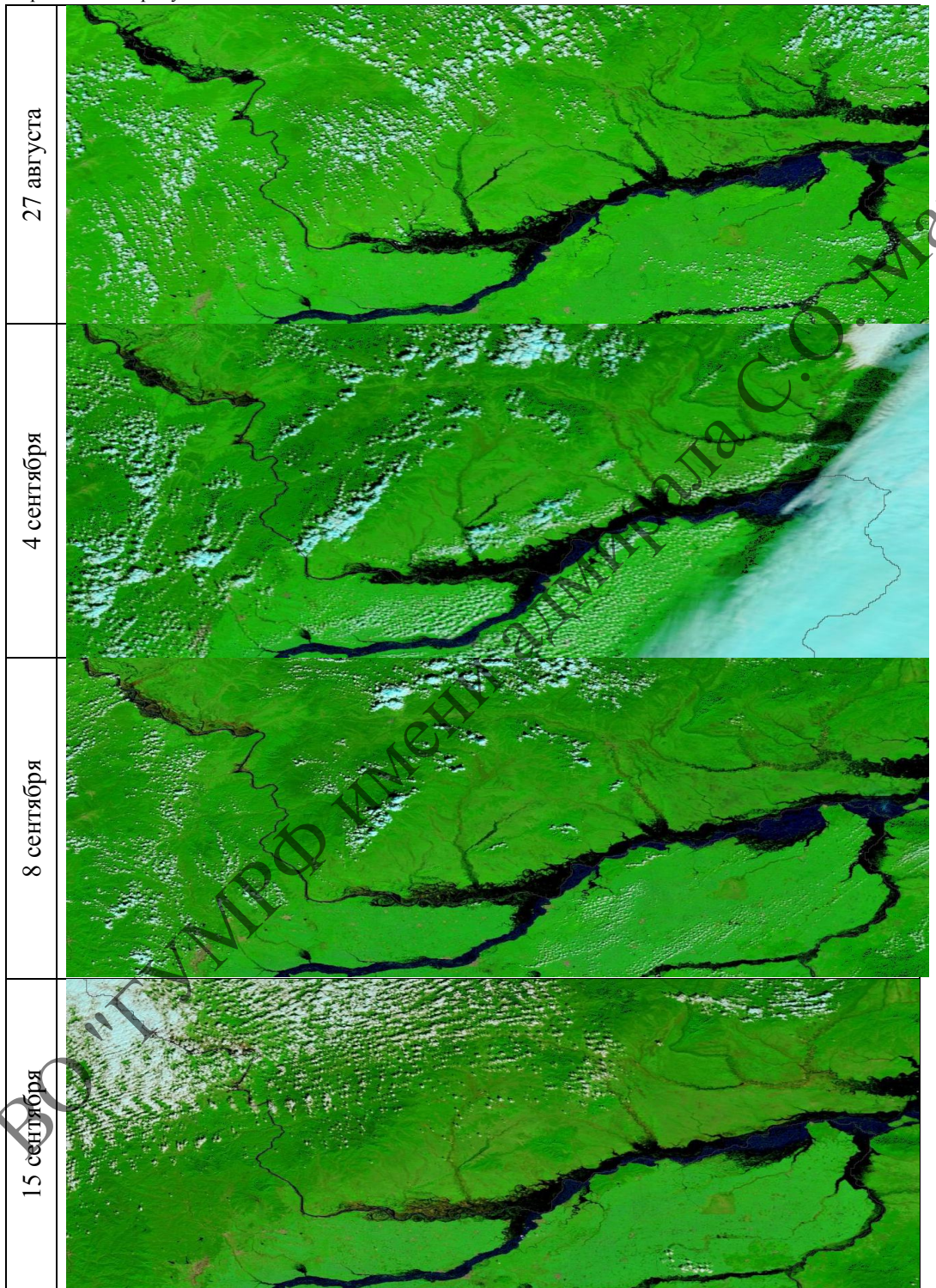


Рисунок 4 – Космические снимки Среднего Амура в разные даты 2013 г.

Продолжение рисунка 4



Продолжение рисунка 4



Продолжение рисунка 4



i

ⁱ ANALYSIS OF THE FLOOD SITUATION IN THE AMUR RIVER BASIN IN 2013 USING SATELLITE IMAGES (*V.A. Ivanov*)

The flood situation observed on the Amur River in July-September 2013 is analysed using satellite images. Flood waves movement downstream the Amur River tributaries and the flood wave superposition on the main river and its tributaries is traced.

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАИВЫСШИХ УРОВНЕЙ ВОДЫ Р. АМУР У ХАБАРОВСКА И КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ

Георгиевский В.Ю., Молчанова Т.Г.

ФГБУ «ГГИ», Санкт-Петербург. molch@ggi.nw.ru

Обсуждаются проблемы оценки наивысших уровней воды редкой повторяемости в створах гидрологических постов у г.Хабаровск и г.Комсомольск-на-Амуре. Приведены результаты расчетов, полученных двумя методами. Первый основан на использовании многолетних данных наблюдений за уровнями воды, сведений об исторических паводках и построений эмпирической кривой распределения наивысших уровней воды. Вторым основывается на установлении аналитической кривой обеспеченности максимальных расходов воды с последующим переходом по связи расходов и уровней воды к соответствующим значениям уровней

В сентябре 2013 г. в результате прохождения экстремального паводка наивысшие уровни воды р. Амур у Хабаровска и Комсомольска-на-Амуре значительно превысили ранее наблюдаемые исторические максимумы, что привело к частичному затоплению прибрежных территорий и значительным экономическим ущербам.

Эти события продемонстрировали уязвимость населения, социальных и промышленных объектов, инфраструктуры, находящихся в зоне потенциального затопления, что требует проведения комплекса мероприятий по безусловному обеспечению безопасной жизнедеятельности на этих территориях. При их обосновании должны учитываться требования ряда действующих нормативных документов.

Во-первых, должны быть объективно определены границы зон затопления. В соответствии с постановлением Правительства РФ от 18.04.2014 г. № 360 «Об определении границ зон затопления, подтопления» зоны затоплений определяются в отношении территорий, затопляемых при половодьях и паводках однопроцентной обеспеченности (повторяемость один раз в сто лет). В свою очередь территории городских и сельских поселений, расположенных в пределах этих зон должны быть защищены от затопления паводковыми водами и ветровым нагоном воды (СП 42.13330.2011 «Градостроительство, планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01.89»). При проектировании гидротехнических защитных сооружений (плотины, дамбы обвалования, берегоукрепительные и оградительные сооружения, ГТС, входящие в состав комплекса инженерной защиты населенных пунктов, предприятий и сельхозугодий и др.), в соответствии со СНиП «Гидротехнические сооружения. Основные положения», расчетные максимальные расходы воды следует принимать исходя из ежегодной вероятности превышения (обеспеченности), устанавливаемой в зависимости от класса сооружений, определяемого с учетом их технических характеристик, социально-экономического значения и последствий возможных аварий. Для гидротехнических сооружений,

предназначенных для защиты населения и объектов экономики от наводнений, обеспеченность расчетных значений максимальных расходов и наивысших уровней воды принимается, как правило, равной $1.0 \pm 0.1\%$.

В связи с выше изложенным, надежная количественная оценка значений наивысших уровней и максимальных расходов воды редкой повторяемости имеет чрезвычайно важное значение для обеспечения безопасности населения и объектов экономики прибрежных территорий.

На рисунке 1 представлены данные, характеризующие многолетнюю динамику наивысших в году уровней воды по гидрологическим постам у Хабаровска и Комсомольска-на-Амуре.

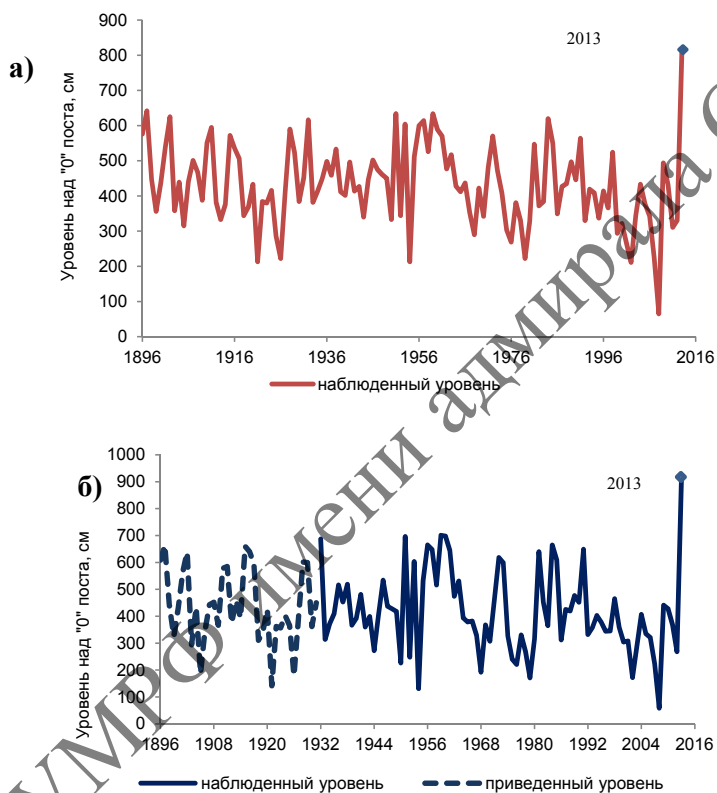


Рисунок 1 — Многолетняя динамика наивысших уровней воды р.Амур а) - у г.Хабаровск; б) - у г.Комсомольск-на-Амуре

Поскольку между наивысшими уровнями воды на этих постах существует тесная корреляционная зависимость ($r=0,95$), уровни воды у г. Комсомольск-на-Амуре были приведены к многолетнему периоду 1896-2013 гг. Обращает на себя внимание аномалии высших уровней в 2013 году, которые превысили исторические максимумы соответственно на 113 и 211 см. Анализ эмпирических кривых распределения наивысших уровней по этим постам (рисунки 2-3) показывает, что отклоняющиеся от основной совокупности значения уровней в 2013 г. явно не

вписываются в эти распределения. Неоднородность «отскакивающих точек» подтверждается и результатами количественных оценок статистической однородности с применением критериев резко отклоняющихся экстремальных значений в эмпирическом распределении (критерии Смирнова-Грабса и Диксона).

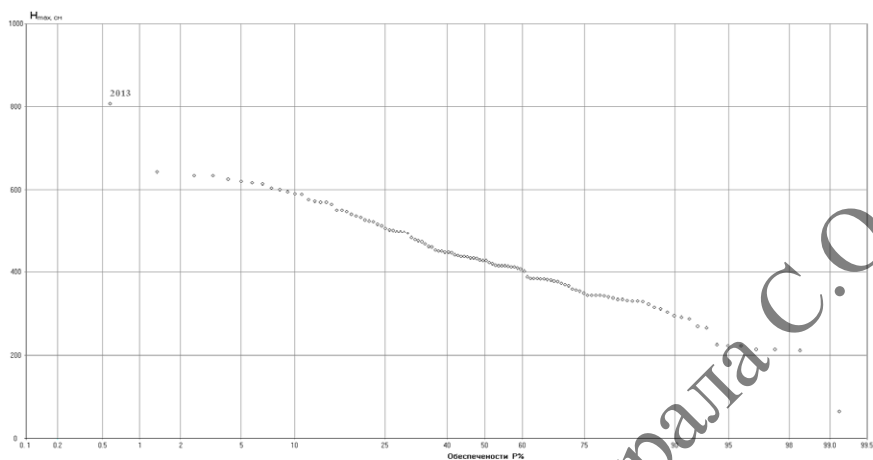


Рисунок 2 — Эмпирическое распределение наивысших уровней воды р. Амур у г. Хабаровск

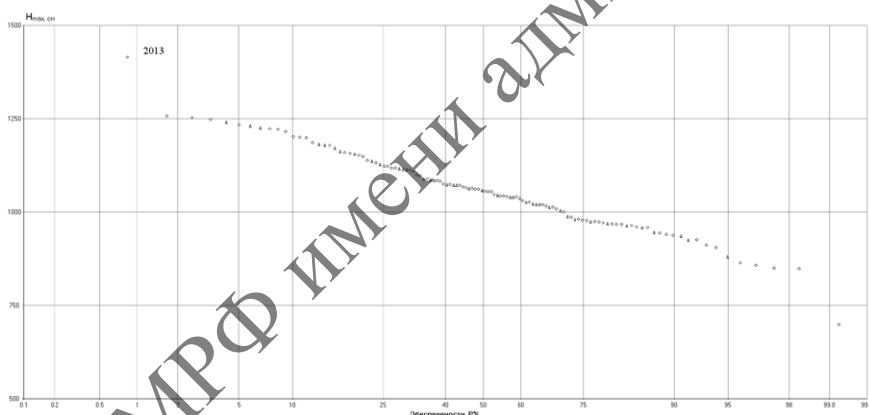


Рисунок 3 — Эмпирическое распределение наивысших уровней воды р. Амур у г. Комсомольск-на-Амуре

Очевидно, что обеспеченность наивысших уровней воды 2013 года значительно меньше, чем по оценкам, полученным по рядам наблюдений. Для более обоснованной оценки повторяемости этих уровней необходимо привлечение и анализ информации в доинструментальный период. Детальное описание паводков в бассейне Амура, основанное на анализе обширного исторического материала, выполненное Б.Д.Зайковым [1] позволяет прийти к выводу, что во второй половине XIX столетия (начиная с 1855 г.) наиболее значительное наводнение произошло в 1872 г. В работе

[2] на основе полученных архивных материалов по проектированию железнодорожного моста через Амур, было установлено, что уровень воды у Хабаровска исторического паводка 1972 года достиг отметки 722 см над «0» графика. Основываясь на этих, по нашему мнению, обоснованных и аргументированных данных, следует сделать вывод о том, что уровень 2013 г. был самым высоким за период 1855-2014 гг., а уровень 1872 является вторым по величине. На рисунке 4 представлена эмпирическая кривая обеспеченности, построенная с учетом этих двух исторических максимумов. По этой кривой наивысшие уровни воды у Хабаровска обеспеченностью 1% и 0,1% составили - 750 см и 860 см.

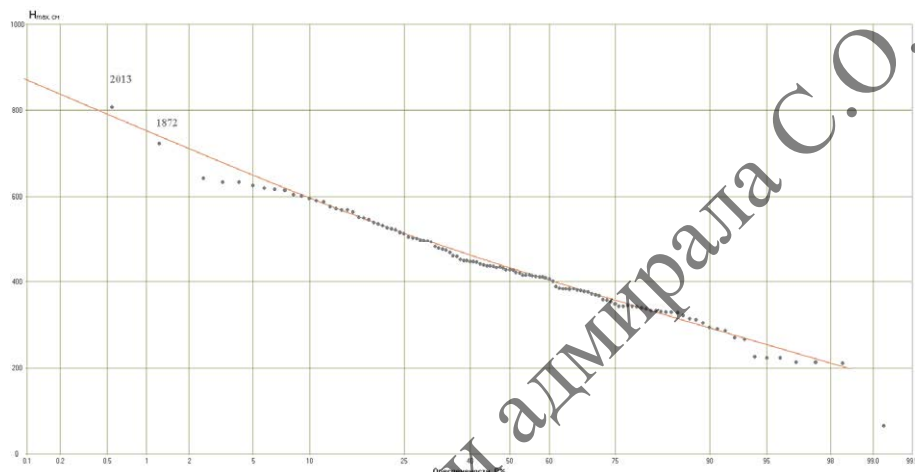


Рисунок 4 — Эмпирическое распределение наивысших уровней воды р. Амур у г. Хабаровск с двумя историческими экстремумами (2013, 1872 гг.)

Обеспеченные значения наивысших уровней воды у Комсомольска-на-Амуре рассчитанные по связи с наивысшими уровнями у Хабаровска оценены соответственно в 840 см и 1000 см.

Применение аналитических кривых распределения для определения расчетных гидрологических характеристик допускается только по однородным рядам наблюдений. Рассмотрим вероятные причины возможной неоднородности рядов наивысших уровней воды в рассматриваемых створах р. Амур.

Как показано в статье В.М. Католикова и Н.И. Католиковой «О возможных причинах изменения пропускной способности русла Амура у Хабаровска и Комсомольска-на-Амуре», опубликованной в настоящем сборнике, высокие уровни воды у Хабаровска и Комсомольска-на-Амуре в 2013 г., в значительной мере были вызваны уменьшением пропускной способности русла реки в результате естественных изменений морфологического строения русла, обусловленных транзитным движением донных руслоформирующих наносов в виде мезоформ (ленточных гряд, побочной и осередков) и многолетним циклическим развитием осередков-островов и их морфологических подводных элементов. Это, в свою очередь, обусловило неоднозначность связи

расходов и уровней воды: на этих постах при прохождении одинаковых расходов воды амплитуда многолетних изменений уровней может достигать 2,0 м.

Факторами, определяющими потенциальную неоднородность гидрологических рядов, являются антропогенные факторы – создание водохранилищ и комплекса гидротехнических сооружений, обеспечивающих защиту прибрежных территорий от затоплений. С 1975 г. функционирует Зейское водохранилище, оказывающее определенное влияние на уровенный режим Среднего и Нижнего Амура. При этом масштабы этого влияния могут быть существенно различными в зависимости от особенностей формирования паводочного стока в бассейне в конкретные годы. С 2003 г. введено в строй Бурейское водохранилище. Очевидно, что с этого года на водный режим Амура ниже впадения Буреи оказывают влияние уже два водохранилища. Кроме того, в бассейне Сунгари на территории КНР в настоящее время работают 7 водохранилищ с суммарной полезной ёмкостью около 21 км³, что оказывает в той или иной степени влияние на водный режим Нижнего Амура. Совокупное влияние комплекса водохранилищ на реках бассейна Амура, конечно, способствует снижению паводочного стока. Вместе с тем, в бассейне одновременно действует другой важный антропогенный фактор – наличие противопаводковых дамб. Только на китайской части бассейна протяженность дамб составляет более 3 тыс. км, в том числе более 600 км непосредственно по правому берегу Амура. Безусловно, отсечение пойм - естественных регуляторов высокого стока - способствует увеличению максимальных расходов и, соответственно, уровней воды. Вместе с тем, на отдельных участках в результате прорывов дамб) возможны и локальные понижения уровня.

Выполнить объективную количественную оценку влияния разнонаправлено действующих факторов хозяйственной деятельности на максимальные расходы (уровни) по всей длине Амура в настоящее время не представляется возможным. Такие исследования требуют детальной картографической и водохозяйственной (в том числе на китайской территории) информации, проведения полевых изысканий, применения методов физического и математического моделирования.

Оценка однородности рядов гидрологических характеристик осуществляется на основе генетического и статистического анализа исходных данных наблюдений. Приведенный выше качественный анализ влияния на наивысшие уровни воды основных антропогенных факторов показывает, что они носят разнонаправленный характер, и их совокупное влияние сейчас не может быть количественно оценено с необходимой точностью. При использовании статистических критериев однородности следует иметь в виду, что для рек, на которых многолетние изменения стока характеризуются длительными многоводными и маловодными фазами, формальные оценки могут дать ложное представление о неоднородности, если при разделении ряда наблюдений на две части в одну из них попадает период, включающий только многоводную или маловодную фазу.

На рисунке 5, в качестве примера, представлены разностные интегральные кривые среднегодовых и максимальных в году расходов воды р. Амур у г. Хабаровска, из анализа которых следует, что многолетние изменения рассматриваемых характеристик происходят синхронно. Это свидетельствует о том, что для формирования максимальных расходов воды в этом створе необходимы большие объемы воды для заполнения русловых и пойменных ёмкостей. Коэффициент корреляции между годовым и максимальным расходом воды за период 1896-2013 гг. равен 0,87. Отметим, что многолетние изменения годового стока определяются только влиянием климатических факторов, поскольку безвозвратные потери стока в результате хозяйственной деятельности ничтожны по сравнению с водными ресурсами реки. Из данных, представленных на рисунке 5, видно, что в колебаниях годового стока можно выделить длительную фазу повышенной водности, продолжавшуюся с 1920-х по 1960-е - начало 1970-х годов. Маловодная фаза наблюдалась с начала 1970-х по 2012 г. Аналогичные фазы присутствуют и в многолетних колебаниях максимальных расходов и наивысших уровней воды. Конечно, статистические характеристики стока существенно отличаются для многоводных и маловодных периодов. Однако эти различия обусловлены естественными процессами, определяющими многолетнюю цикличность стока.

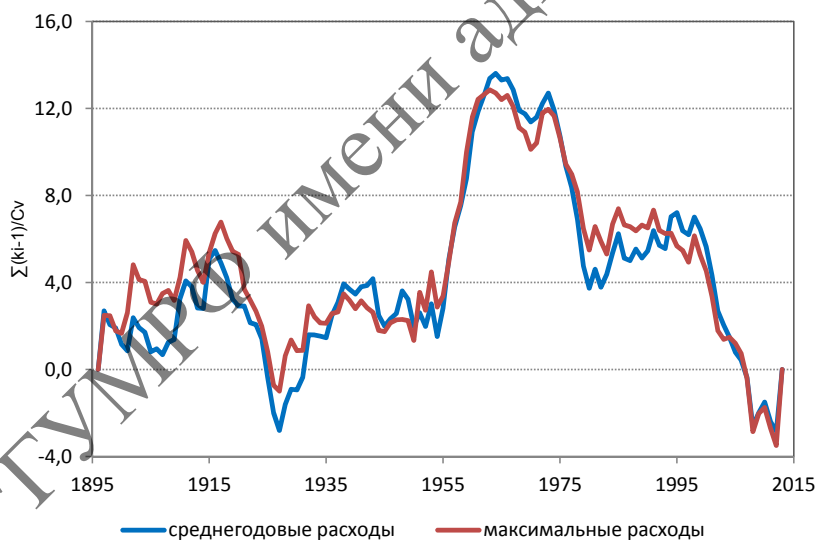


Рисунок 5 – Разностные интегральные кривые годового стока и максимальных расходов воды р. Амур у г. Хабаровска

Изложенное выше указывает, что расчеты вероятностных характеристик наивысших уровней и максимальных расходов воды в рассматриваемых гидрологических створах являются нетривиальной задачей и требуют комплексного подхода, включающего применение, как

эмпирических, так и теоретических методов. Детальный анализ применения аналитических функций распределения ежегодных вероятностей для расчетов параметров наивысших уровней воды р. Амур у г. Хабаровск представлен в настоящем сборнике в статье А.Г. Лобановой «Оценка выборочных параметров, ординат кривых обеспеченности и их случайных погрешностей на примере наивысших уровней воды р. Амур». Ниже рассмотрим метод определения расчетных наивысших уровней воды по кривым обеспеченности максимальных расходов с последующим переходом от расходов заданной вероятности превышения к уровням той же вероятности превышения по зависимости $Q=f(H)$.

Расчеты обеспеченности наивысших уровней воды р. Амур в створах гидрологических постов у Хабаровска и Комсомольска-на-Амуре проводились в следующей последовательности:

- по данным о максимальных расходах воды строились эмпирическая и теоретическая кривые обеспеченности; по теоретической кривой определялся расход воды заданной вероятности превышения;
- устанавливалась зависимость расходов и уровней воды, соответствующая современным гидроморфологическим условиям;
- по данным о расчетных расходах воды и современной зависимости $Q(H)$ определялись обеспеченные значения уровня воды.

На рисунке 6 приведены аналитические кривые обеспеченности максимальных расходов воды у г. Хабаровска Крицкого–Менкеля и Пирсона III типа. Из рисунка следует, что эти кривые хорошо описывают эмпирическое распределение. Максимальный расход 2013 г. располагается на графике несколько выше теоретических кривых, а его обеспеченность составляет около 0,5% (1 раз в 200 лет). Следует отметить, что в зоне малых обеспеченностей расчетные расходы воды, определенные по кривой Крицкого–Менкеля, несколько выше значений, определенных по кривой Пирсона III типа. Однако эти различия значительно меньше случайных погрешностей определения ординат и составляют для расходов обеспеченностью 0,1% и 1% соответственно 2% и 1%.

В настоящей работе расчетные расходы воды Амура в створе у г. Хабаровска обеспеченностью 1% и 0,1% приняты по биномиальной кривой распределения равными соответственно 43200 м³/с и 52500 м³/с, а соответствующие им наивысшие уровни воды равны 765 см и 892 см над нулем поста (рисунок 7).

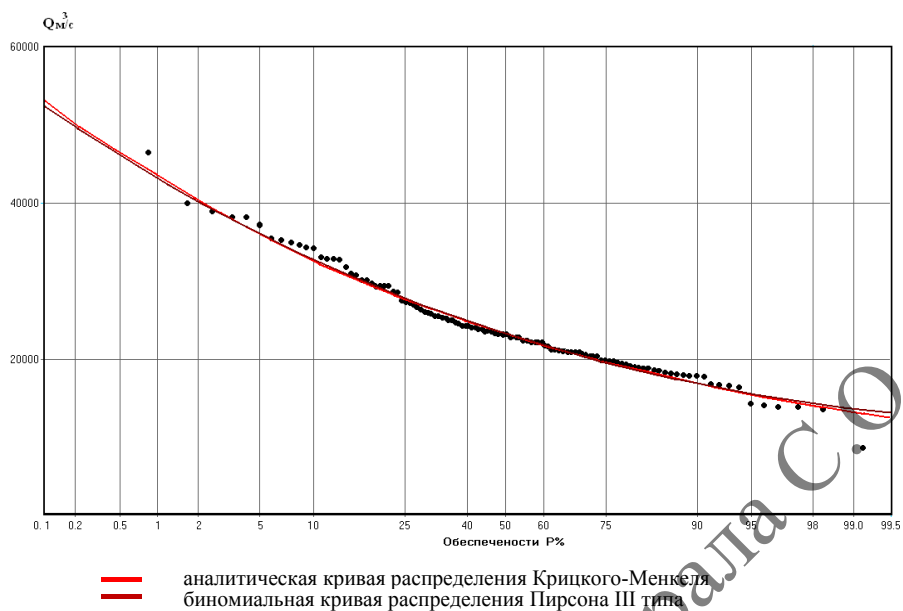


Рисунок 6 – Кривые распределения максимальных расходов воды р. Амур у г. Хабаровск

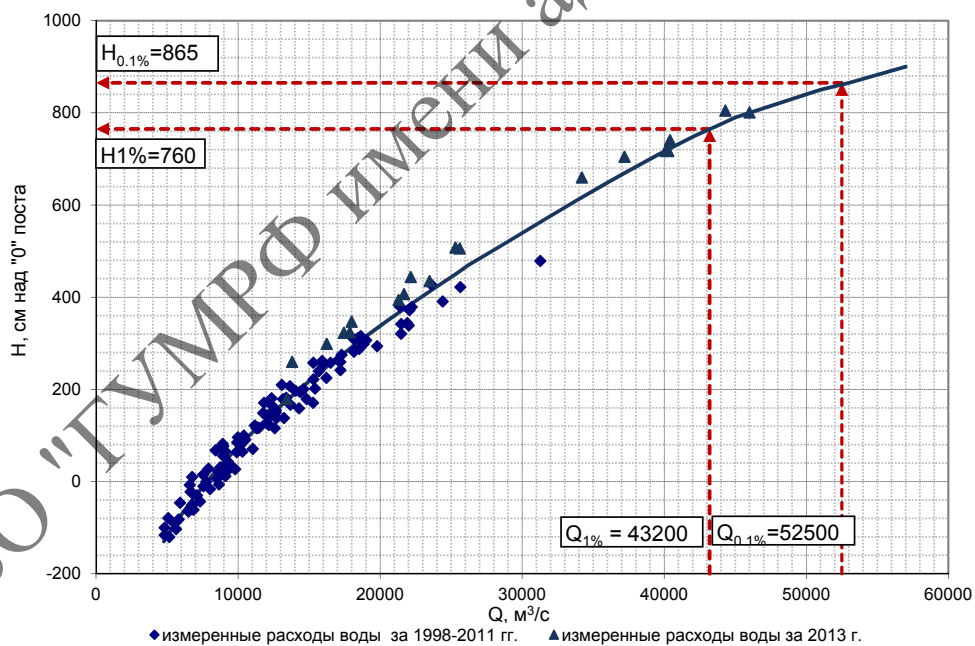


Рисунок 7 – График связи расходов и уровней р. Амур у г. Хабаровск

Аналогичным образом были определены обеспеченные величины максимальных расходов и наивысших уровней воды в створе у г. Комсомольск-на-Амуре (рисунки 8,9): $Q_{1\%} = 41000 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_{0,1\%} = 47600 \text{ м}^3/\text{с}$; $H_{1\%} = 860 \text{ см}$ и $H_{0,1\%} = 1030$.

Таким образом, в настоящей работе получены оценки наивысших уровней воды Амура по гидрологическим постам у г.Хабаровск и г.Комсомольск-на-Амуре двумя независимыми методами:

- Первый из них основывался на использовании многолетних данных наблюдений за уровнями воды, сведений об исторических паводках, происходивших во второй половине XIX столетия, и построении эмпирической кривой распределения наивысших уровней воды;
- Второй основывался на установление аналитической кривой обеспеченности максимальных расходов воды с последующим переходом по связи расходов и уровней воды, соответствующей современной пропускной способности русла, от обеспеченных значений расходов к соответствующим значениям уровней.

Полученные оценки наивысших уровней воды р.Амур у г.Хабаровск обеспеченностью 1% и 0,1% по второму методу оказались выше чем по первому соответственно на 15 см и 32 см. Учитывая, что средние квадратические погрешности расчета этих квантилей составляют примерно 33 и 71 см, то такое расхождение является допустимым. Аналогичные выводы получены и в отношении расчетных уровней у г.Комсомольск-на-Амуре.

При проектировании гидротехнических сооружений, предназначенных для защиты населения и объектов экономики от наводнений назначение конкретной расчетной величины наивысшего уровня воды должно производиться с учетом экономических соображений и гарантированного обеспечения безопасности населения.

Список литературы

Зайков Б.Д. Высокие половодья и паводки на реках СССР за историческое время. – Л., Гидрометеиздат, 1954. – 136 с.

Каталог отметок наивысшие уровней воды рек и озер СССР.-Л., Гидрометеиздат,1970.-148 с.

i

ⁱ ASSESSMENT OF PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF HIGHEST STAGES IN THE AMUR RIVER NEAR KHABAROVSK AND KOMSOMOLSK-ON-AMUR (*V.Yu. Georgievskiy, T.G. Molchanova*)

The paper discusses problems of assessing rarely occurring highest stages at gauges near the cities of Khabarovsk and Komsomolsk-on-Amur. Given are the results of computations obtained by two different methods. The first method uses long-term water level observations, information about observed floods and empirically derived maximum level distribution curves. The second method is based on defining the analytically derived peak discharge probability curve and determining of correspondent stages by stage-discharge relationship.

О ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИНАХ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РУСЛА АМУРА У ХАБАРОВСКА И КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ

В.М. Католиков, Н.И. Католикова

ФГБУ «ГГИ», Санкт-Петербург, v.katolikov@mail.ru

В статье выполнен анализ многолетней динамики кривых связи расходов и уровней воды по в/п Хабаровск и Комсомольск-на-Амуре, который выявил значительную амплитуду многолетних циклических отклонений ежегодных кривых от среднемноголетних значений. Установлено, что эти отклонения наблюдаются как при высоких уровнях воды, так и при низких. Выполнен анализ возможных причин изменения гидравлических сопротивлений движению речного потока на участке расположения водомерного поста в Комсомольске-на-Амуре и обоснована гипотеза о том, что основной причиной этих многолетних изменений зависимости расходов и уровней воды является многолетняя динамика внутрирусловых осередков, формирующихся на участке от острова Комсомольский до переката Бельго. Выполненный анализ динамики речного дна на этом участке за период с 1930 по 1991 годы показал, что изменения высотных отметок дна, обусловленные динамикой мезформ речного русла, имеют амплитуду до 8 метров и могут существенно влиять и определять режим гидравлических сопротивлений на Амуре и, следовательно, уровни прохождения паводков различной обеспеченности

Катастрофический паводок на Амуре 2013 года обострил множество проблем, связанных с обеспечением безопасного пропуска экстремальных паводков. Некоторые из этих проблем носят инженерно-технический или организационный характер, некоторые – научный и нормативно-методический. Одной из научных и нормативно-методических проблем является проблема изменения пропускной способности русла и поймы при прохождении естественных процессов руслоформирования или при осуществлении инженерной гидротехнической деятельности в русле и на пойме. Решение этой проблемы важно для безопасного пропуска редких и катастрофических паводков, а также для оценки гидравлических условий прохождения более низких и частых половодий и паводков.

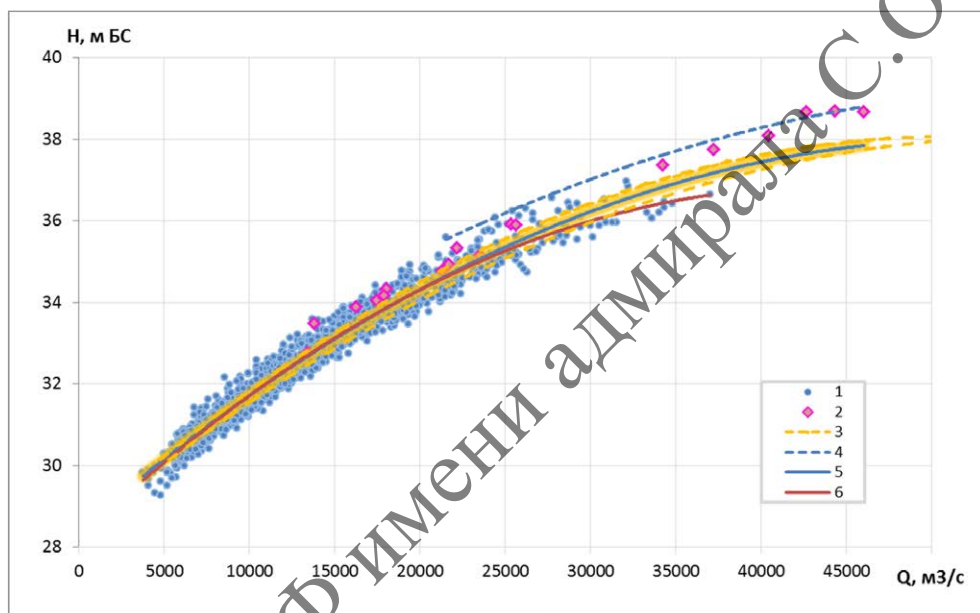
Известно, что пропускная способность речных русел и пойм определяется гидравлическими сопротивлениями движению потока, которые зависят от гидравлических и морфометрических характеристик русла на морфологически однородном участке реки. Соответственно, анализ динамики этого морфологического элемента речного русла, включая плоды гидротехнической деятельности в его пределах, необходим для выявления причин изменения пропускной способности речного русла.

В гидрометрической практике гидравлические условия протекания речного потока через гидрометрический створ принято отображать в виде зависимости $Q=f(H)$, которая используется для определения ежедневных расходов воды по ежедневно измеряемым уровням. При этом многолетняя стационарность (устойчивость) этой зависимости свидетельствует об устойчивости пропускной способности русла и поймы реки на нижерасположенном морфологически однородном участке, а ее ежегодные изменения – об изменении пропускной способности на этом участке. По-

этому поиски причин изменений пропускной способности русла реки требуют, в первую очередь, анализа изменений морфологического строения речного русла и поймы.

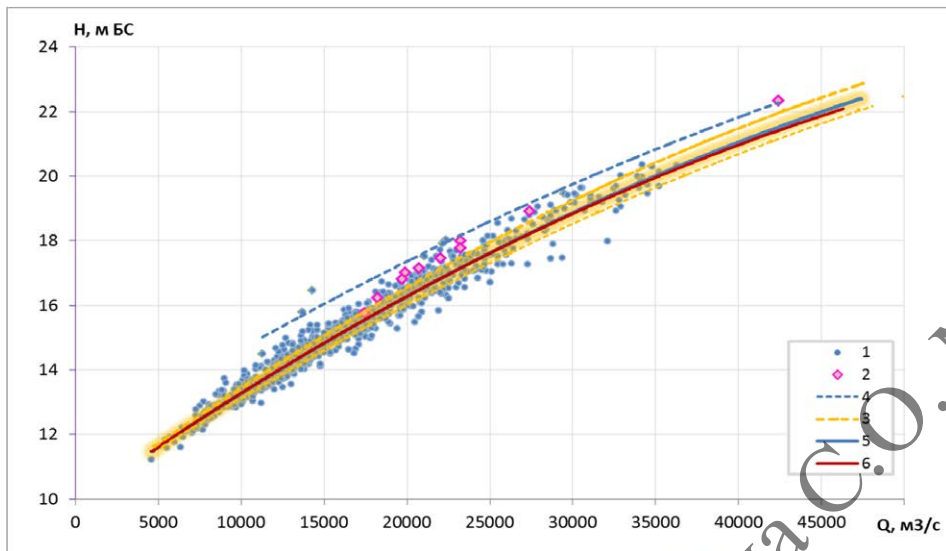
В качестве примера в данной работе представлен анализ возможных причин многолетних циклических изменений пропускной способности русла и поймы Амура в нижнем течении в створах г/п Хабаровск и Комсомольск-на-Амуре.

На рисунках 1 и 2 представлены графические зависимости между расходами и уровнями воды для г/п Амур-Хабаровск и г/п Амур-Комсомольск-на-Амуре за весь период наблюдений, построенные по измеренным расходам и уровням воды и отображающие динамику кривых этой связи.



1 – 1948-2012 гг., 2 – 2013 г., 3 – граница средних значений, 4 – верхняя огибающая, 5 – осредненная кривая за период 1948-2013, 6 – осредненная кривая за период 1948-2012

Рисунок 1 – Кривая связи между расходами и уровнями воды в створе г/п Амур-Хабаровск (гдст 2) за период 1948-2013 гг.



1 – 1959-2012 гг., 2 – 2013 г., 3 – граница средних значений в пределах точности измерений, 4 – верхняя огибающая, 5 – осредненная кривая за период 1959-2013, 6 – осредненная кривая за период 1959-2012

Рисунок 2 – Кривая связи между расходами и уровнями воды в створе р/п Амур-Комсомольск за период 1959-2013 гг.

Из приведенных рисунков следует, что в створах обоих постов при прохождении одних и тех же расходов воды амплитуда многолетних изменений уровней во всем их диапазоне достигает 2,0 м, что представляет собой значимую величину при глубинах потока в паводки 10-20 м. При этом важным обстоятельством является то, что точки, соответствующие максимальным расходам воды 2013 года, лежат на верхней огибающей всего поля точек, а другие точки 2013 года, соответствующие меньшим расходам воды, лежат ниже верхней огибающей, т.е. в пределах многолетнего поля точек. Это позволяет сделать крайне важный вывод о том, что в 2013 году ничего противостественного и экстраординарного с пропускной способностью русла и поймы Амура на участках расположения городов Хабаровск и Комсомольск-на-Амуре не произошло.

Для анализа возможных тенденций в изменении пропускной способности речного русла Амура на рисунках 3 и 4 представлены многолетние изменения уровней прохождения нескольких зафиксированных максимальных расходов воды из числа измеренных. Как в районе Хабаровска, так и в районе Комсомольска-на-Амуре изменения пропускной способности речного русла и поймы носят циклический характер и не имеют однонаправленной тенденции. При этом не прослеживается существенной связи изменений пропускной способности русла ни со среднегодовым расходом воды, ни с максимальным. В то же время в обоих створах отмечается цикличность резких изменений пропускной способности с периодичностью 11-15 лет.

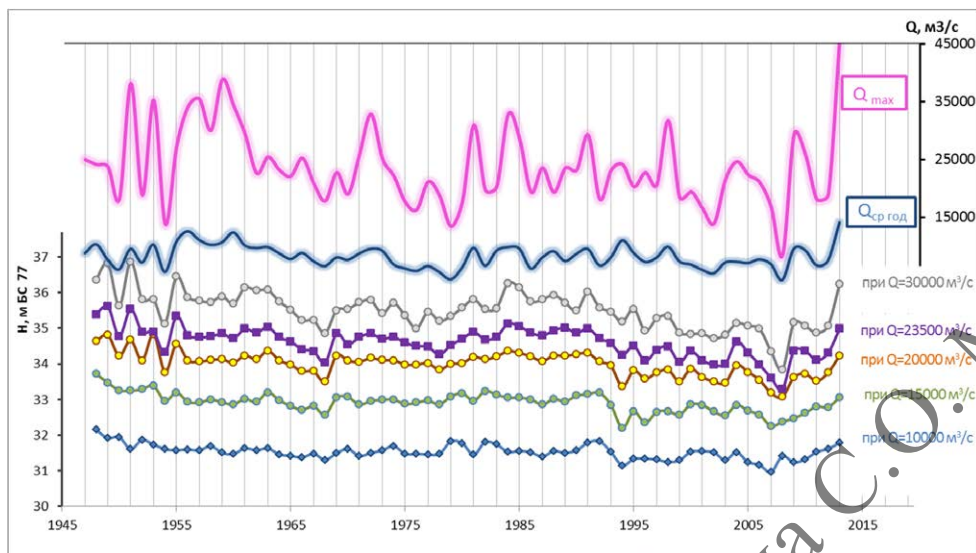


Рисунок 3 – Сопоставление многолетних колебаний уровней воды при прохождении фиксированных расходов воды с характерными расходами (Q_{\max} и $Q_{\text{ср год}}$) створе Амур-Хабаровск (г/ств 2)

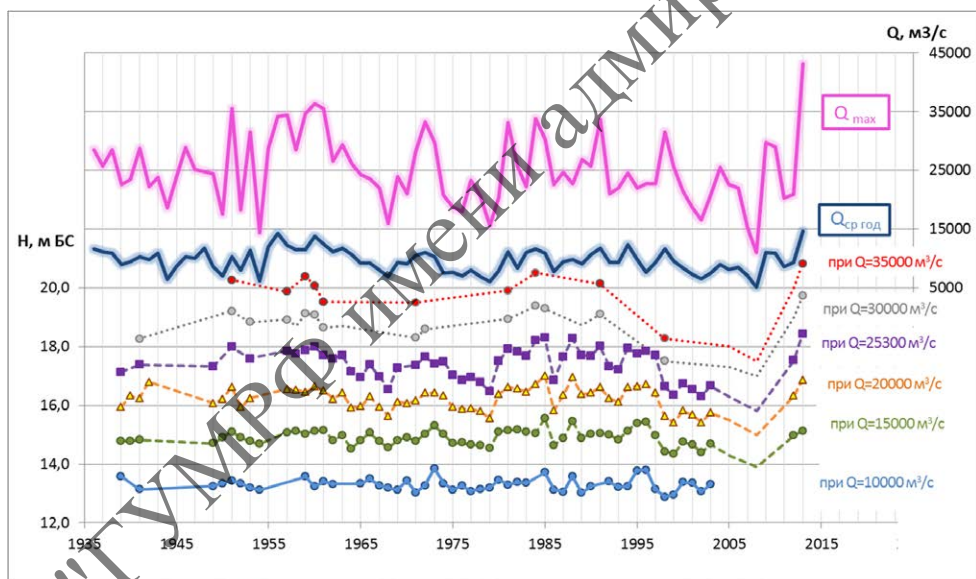


Рисунок 4 – Многолетние колебания уровней воды при прохождении фиксированных расходов воды в створе Амур-Комсомольск

Отсутствие четкой связи изменений пропускной способности русла с водным режимом реки свидетельствует о том, что эти изменения обусловлены динамикой таких морфологических элементов нижерасположенного участка речного русла, которые обладают большой инерционностью в своем развитии.

Из научной литературы известно, что общие гидравлические сопротивления движению открытого речного потока складываются из следующих составляющих:

- гидравлических сопротивлений, вызываемых зернистой шероховатостью дна, т.е. гранулометрическим составом донных наносов;
- гидравлических сопротивлений, обусловленных грядовым движением донных наносов;
- из гидравлических сопротивлений, обусловленных формой затапливаемого дна долины, рельефом дна и формой речного русла (отношением ширины к глубине потока B/H , наличием излучин) (Гришанин..., 1992).

Следует заметить, что каждое из указанных дополнительных гидравлических сопротивлений может иметь весьма существенное и даже доминирующее влияние на пропускную способность русла.

Также из научной литературы известно, что реки с преобладанием в составе донных наносов частиц, диаметр которых мал по сравнению не только с глубиной потока, но и с размерами гряд, относятся к первому классу речных русел с преобладанием грядовой шероховатости. Река Амур в нижнем своем течении относится именно к этому классу рек и, следовательно, какие-либо изменения гранулометрического состава донных наносов в различные фазы водного режима не могут определять его пропускную способность речного русла.

Высокое содержание (от 40% до 100%) в составе донных наносов песчаных фракций обуславливает активный транспорт донных наносов во все фазы водного режима (Отчет..., 1992; Соловьев..., 1960), движение которых осуществляется преимущественно в грядовой форме, обуславливающей гидравлические сопротивления движению потока, прямо пропорциональные крутизне гряд (Гришанин..., 1992). Из материалов полевых исследований, выполненных на Нижнем Амуре в прежние годы, следует, что в районе городов Амурск и Комсомольск-на-Амуре в зависимости от морфометрических характеристик русла, гидравлических характеристик потока и гранулометрического состава донных наносов высота гряд изменяется в пределах 0,4-2,5 м, а длина – 10-100 м (Отчет..., 1992).

Однако грядовое движение наносов, участвуя в формировании общих сопротивлений движению потока и в значительной степени определяя общую пропускную способность русла в разные фазы водного режима, в силу малой инерционности гряд не определяет ежегодные изменения пропускной способности. Иными словами, грядовое движение наносов не определяет 1,5-2,0 метровую амплитуду разброса точек на многолетней зависимости $Q = f(H)$.

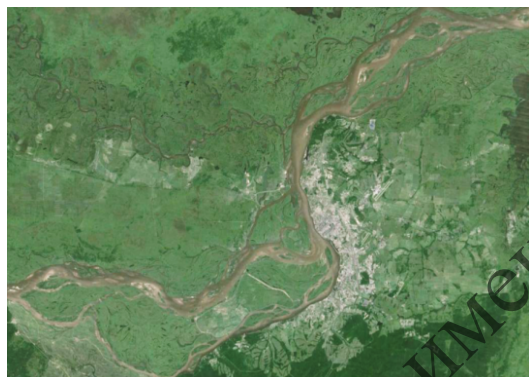
Третьей группой факторов, определяющих пропускную способность русла в паводок, является форма затапливаемого дна долины. Известно, что долина Нижнего Амура имеет четкообразное строение, (чередование участков с широкой поймой и многорукавным руслом и участков с узкой долиной и однурукавным руслом). Это формирует заметные колебания уровней воды при пе-

реходе от сужений к широкопойменным участкам и наоборот и, таким образом, существенно влияет на гидравлические характеристики речного потока в периоды половодий и паводков.

В частности, в районе города Комсомольск-на-Амуре, расположенного на участке 20-километрового сужения долины, Амур протекает в одорукавном и слабоизвилистом русле шириной 1,8 км в межень и 3,8 км в паводок. А далее, ниже 549 км судового хода, поток резко расширяется и разливается по нескольким рукавам в пределах широкой 6,5-километровой поймы. Затем на 533 км в пределах села Верхняя Тамбовка, теснимый склонами гор поток снова сужается до 4,4 км (рисунок 5 б).

Сужения и расширения поймы наблюдаются и в районе Хабаровска. Здесь из многих озер, проток и староречий, расположенных на широкой 25-километровой пойме, воды Амура собираются в единое русло, а через 15 км (на 911 км судового хода) снова разливаются по широкой 23-километровой пойме (рисунок 5 а).

а)



б)

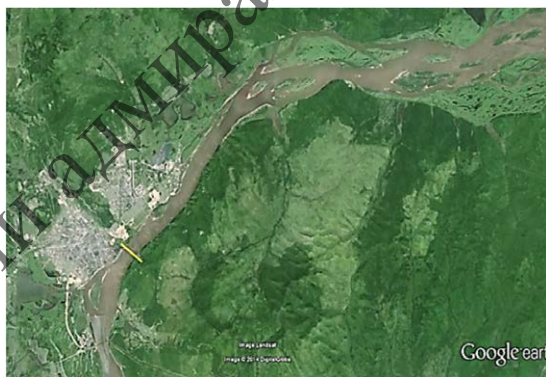


Рисунок 5 – Русло реки Амур в районе Хабаровска (а) и Комсомольска-на-Амуре (б)

Резкие расширения поймы на выходе из сужений на широкопойменные участки определяют ощутимые понижения уровней воды. По данным И.А. Соловьева, величина депрессии уровней воды между Хабаровском и селом Воронежское 3-е, выраженная в разностях амплитуд уровня воды (паводки 1953 и 1954 годов), составила 104 см. Указанное уменьшение амплитуды уровней воды в паводок на протяжении 15 км увеличивает продольные уклоны на этом участке выше перекаатов до 0,069‰ (Соловьев..., 1960). Депрессия уровней воды в районе Комсомольска-на-Амуре, выраженная в разностях амплитуд уровня воды в паводок 1940 года, составила 118 см. Это падение амплитуды уровня воды на протяжении 47 км увеличило продольные уклоны водной поверхности до 0,025‰ (Соловьев..., 1960).

В целом, колебания уровней воды на участках сужения и расширения дна долины реки определяют продольные уклоны и форму продольного профиля водной поверхности воды в пери-

оды прохождения половодий и паводков, а также степень затопления прибрежных территорий. Но эти характеристики являются относительно стационарными в многолетнем разрезе и не определяют ежегодную динамику зависимости $Q=f(H)$.

Таким образом, из всех факторов, которые определяют многолетние изменения пропускной способности русла Нижнего Амура, должны быть исключены зернистая и грядовая шероховатости, а также форма затопляемого дна долины. Значимыми остаются только ежегодные или многолетние изменения формы речного русла и изменения рельефа дна, связанные с естественными процессами руслоформирования или с антропогенной деятельностью в русле реки.

Наибольшее антропогенное влияние на пропускную способность речного русла на протяженных морфологических однородных участках у городов Хабаровск и Комсомольск-на-Амуре сводится к строительству мостовых переходов, дорожных дамб, в некоторой степени стесняющих пойму, а также к многолетней карьерной добыче из русла реки нерудных строительных материалов (песчано-гравийной смеси – ПГС).

Влияние мостовых переходов с их дорожными дамбами на пойме может быть приравнено к сужению дна долины, которое, как показано выше, не влияет на многолетние изменения кривой $Q=f(H)$ на гидрологических постах Гидрометслужбы. Кроме того, из рисунков 1 и 2 следует, что значительная амплитуда разброса точек наблюдается не только при прохождении редких и катастрофических паводков, но и при среднегодовых расходах воды, когда пойма практически не затоплена и влияние мостовых переходов полностью отсутствует.

Что же касается карьерной добычи ПГС из русла, то, судя по имеющимся проектным материалам, общая технология ее осуществления производится продольными русловыми карьерами, малыми относительно размеров Амура и его годового стока донных наносов, который в районе Комсомольска-на-Амуре оценивается в объеме 1,5 млн. м³. Такой способ добычи ПГС обеспечивает занесение карьеров в течение одного или двух рядовых паводков. Изъятие более значимых объемов ПГС производится за счет дополнительной добычи с верхних приповерхностных участков русловых островов и крупных аккумулятивных пляжей, что позволяет минимизировать суммарное влияние изъятий грунта на гидравлику потока и процессы руслоформирования (Отчет..., 1992).

Таким образом, из известных факторов, способных повлиять на ежегодные изменения пропускной способности русла реки Амур в районах городов Хабаровск и Комсомольск-на-Амуре, значимым остается лишь один – изменение морфологического строения речного русла и поймы реки в ходе естественных процессов руслоформирования.

В соответствии с гидроморфологической типизацией (Кондратьев..., 1982) русловые процессы на Амуре в районе Хабаровска на участках широкой поймы (выше и ниже города) развиваются по типу пойменной многорукавности с элементами русловой многорукавности и побочново-

го типа руслового процесса в отдельных рукавах. Исследованию русловых процессов на этом участке, особенностям развития проток Казакевича, Амурской, Пензенской и Бешеной посвящено много научных публикаций, отчетов по НИР и проектных материалов.

Ниже по течению на коротком суженном участке между мостовым переходом и Воронежскими перекатами (участок гидроствора поста Росгидромета) русловые процессы развиваются по типу русловой многорукавности (см. рисунок 5 б). Этот участок реки исследованиями освещен существенно меньше.

В районе Комсомольска-на-Амуре русловой процесс также развивается по типу русловой многорукавности (рисунок 5 б).

Подробно русловой процесс на участке реки между хабаровским мостом и Воронежскими перекатами описан в отчете по НИР ГГИ 1992 года (Отчет..., 1992). Из материалов этого отчета, а также на основе выполненного совмещения топографических карт масштаба 1:100000 за 1984 и 2000 годы и космических снимков за 2012 г. следует, что плановое положение всех островов, покрытая растительностью поверхность которых расположена на уровне поймы, оставалось в течение этого периода неизменной. Такой же вывод сделан и в других отчетах ГГИ (Отчет..., 2008; Дополнения..., 2013).

Совмещение планового положения нескольких осередков до прохождения выдающегося паводка (июль 2013) и после (ноябрь 2013 года) на участке расположения подводного перехода МН ВСТО-II, представленное в отчете за 2013 год (Дополнения..., 2013), показало, что даже в этих экстремальных условиях плановое положение и конфигурация осередков-островов не претерпели значимых изменений.

Основные изменения морфологии русла реки Амур, как в многолетнем плане, так и в период паводка 2013 года, происходили на подводном среднемноголетнем уровне мезоформ речного русла:

- при транспорте руслоформирующих наносов в виде ленточных гряд, побочной и относительно мелких осередков, некоторые из которых сползали вниз по течению со скоростью 70 м/год (Отчет..., 1992);
- при формировании подводных пляжей у выпуклых берегов осередков-островов;
- при размыве дна у приверхов этих осередков-островов и формировании их ухвостий.

Закономерные размывы дна и суммарные изменения морфологического строения русла у приверха осередка, расположенного вблизи левого берега непосредственно в гидростворе-2 водпоста Амур-Хабаровск отражены в изменениях поперечных профилей русла за отдельные годы (примеры таких совмещений приведены на рисунке 6) и сопоставленных изменениях площади поперечного сечения и стока воды (рисунок 7), а также в совмещенных колебаниях измеренных и характерных годовых расходов воды с отметками дна (рисунок 8).

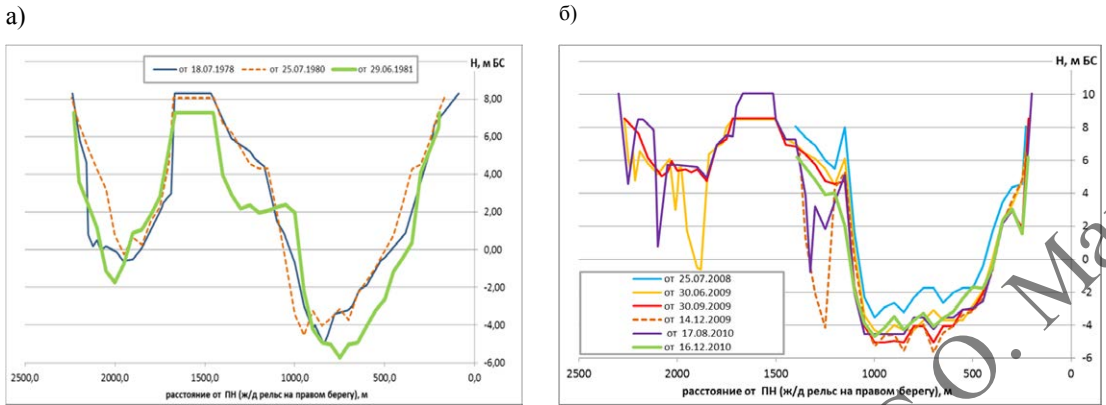


Рисунок 6 – Совмещенные поперечные профили русла в гидростворе-2 водпоста Амур-Хабаровск за 1978-81 гг. (а) и 2008-2010 гг. (б)

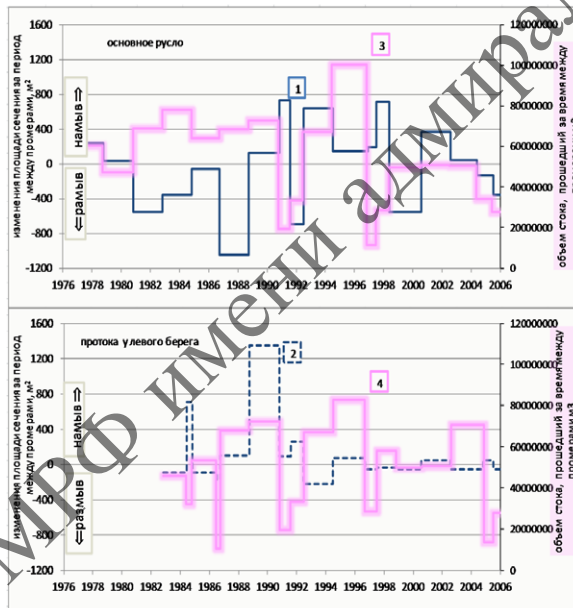


Рисунок 7 – Синхронные изменения площади поперечного сечения (1, 2) и стока воды (3, 4) в створе Амур-Хабаровск (г/ств 2) за период 1978-2006 гг.

Совместный анализ имеющихся материалов показывает, что на участке реки Амур у Хабаровска между мостом и Воронежскими перекатами русловые процессы по типу русловой многорукости за период 1978-2013 гг. обусловили деформаций дна в основном русле реки с амплитудой до 3 м, а на подводных элементах осередков-островов и в огибающих их протоках - до 8-10 м. При этом корреляционная связь между деформациями в створе и объемом стока воды за кратковременные периоды между измерениями (в среднем, около двух лет) является слабой –

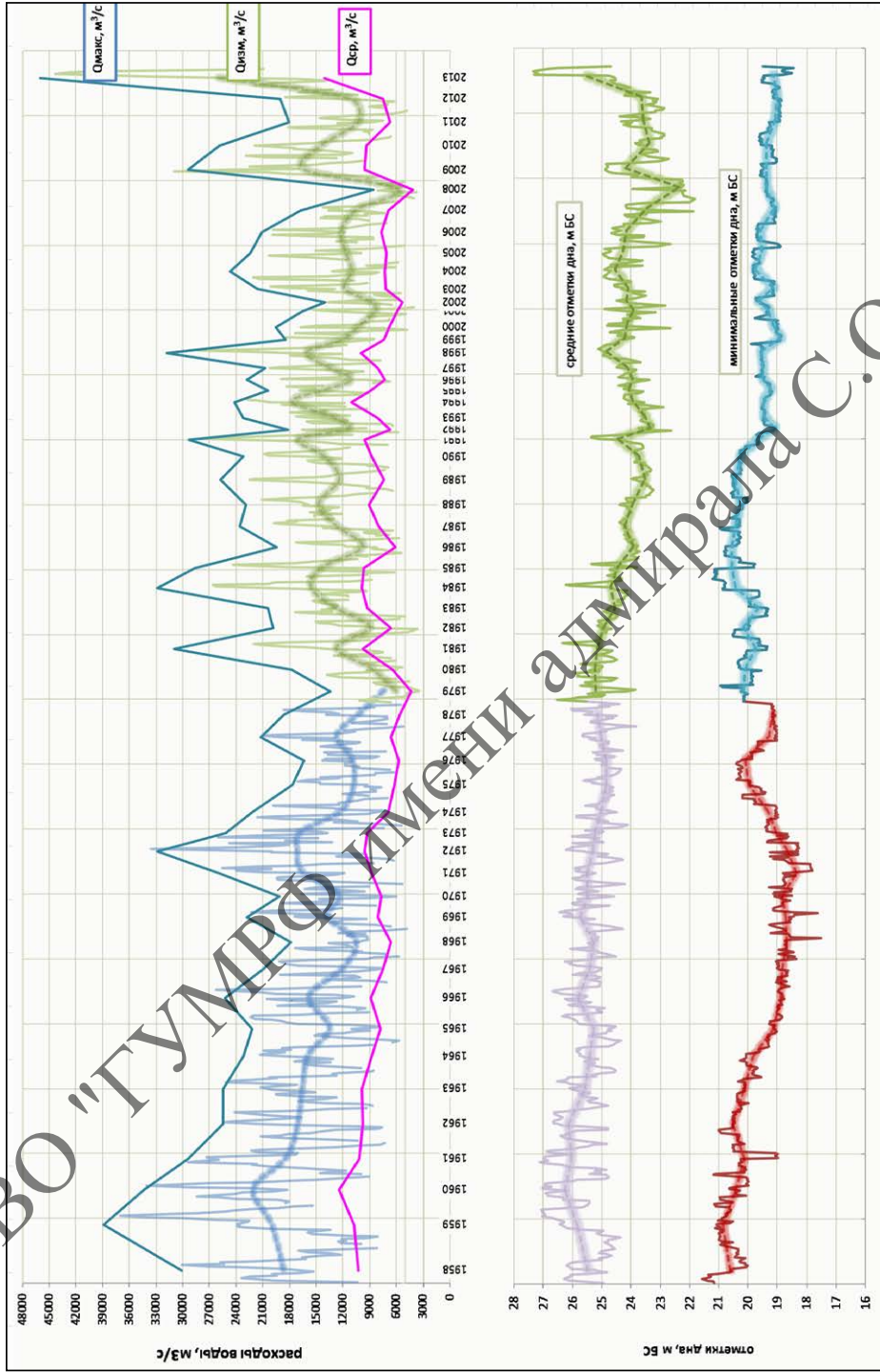


Рисунок 8 – Совмещенные колебания измеренных и характерных годовых расходов воды с отметками дна в створе Амур-Хабаровск (гств 2). После 1978 года данные приведены по основному рукаву двухрукавного русла

коэффициент корреляции между колебаниями площади поперечного сечения в створе и объемом стока воды за соответствующие периоды составляет для основного русла $K_{\text{корр}} = -0,2$ и для лево-бережной протоки $K_{\text{корр}} = 0,2$. При этом для более длительных периодов (от 5 до 7 лет) связь становится более тесной: для основного русла ($K_{\text{корр}} = -0,6$) и ($K_{\text{корр}} = 0,8$) для протоки.

Слабая количественная связь между указанными величинами за кратковременные периоды может быть интерпретирована как то, что транспорт наносов на рассматриваемом участке осуществляется в виде крупных инерционных русловых форм (мезоформ) и связан с многолетними колебаниями стока. При этом отрицательная величина коэффициента корреляции для основного русла, свидетельствует о том, что в нем соответствие между объемом прошедшего стока и деформациями носит обратно пропорциональный характер, в то время как в протоке у левого берега рост деформаций сопутствует повышению проходящего стока воды.

Связанные с такой русловой динамикой изменения пропускной способности русла реки в наибольшей степени отражаются на колебаниях средних по сечению отметок дна. Амплитуда зафиксированных колебаний отметок дна у Хабаровска составляет до 4 м, что является значимой величиной при глубинах реки от 10 до 20 м.

В результате указанных существенных и сложных изменений морфологии речного русла на участке от моста до Воронежских перекатов изменяется и пропускная способность речного русла, определяющая уровни прохождения редких и катастрофических паводков у Хабаровска. Динамику подпорного эффекта можно проследить по совмещенным колебаниям уклонов с уровнями в паводки (рисунок 9).

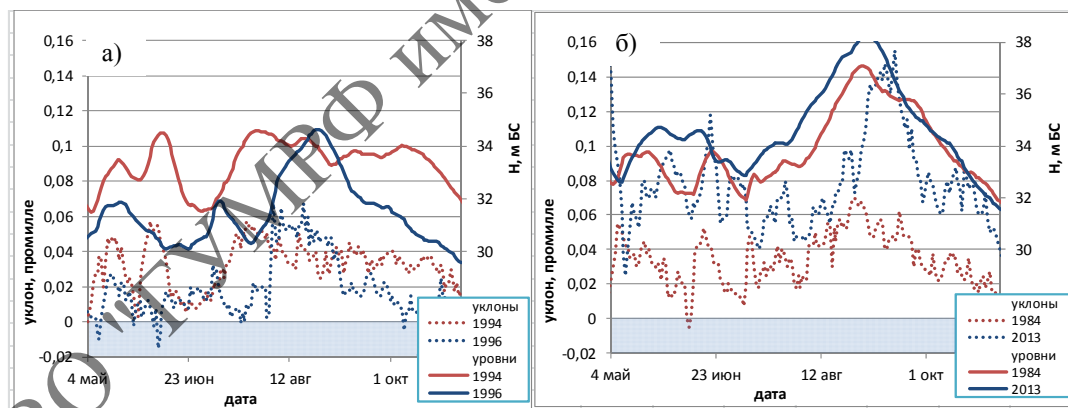


Рисунок 9 – Совмещенные графики хода уровня за паводочный период и колебаний уклона водной поверхности на участке между расходным и уровневый постами в Хабаровске за годы со среднemaxимальными (а) и максимальными (б) пиками паводка

Из приведенного графика следует, что на участке длиной 4 км в годы со средними паводочными подъемами уровня амплитуда колебаний уклонов водной поверхности не превышает 0,08 ‰, а в годы экстремальных паводочных подъемов может составлять 0,15 ‰. При этом даты

наступления повышенных уклонов несколько запаздывают по сравнению с датами подъема уровня, а пониженные значения уклонов – наоборот – часто опережают понижения уровня. Иногда уклоны принимают нулевые и даже отрицательные значения. Соответствие между паводочным уровнями и уклонами меняется от обратно пропорциональной связи при среднем уровне корреляции ($K_{\text{корр}} = -0,4$) в годы со средними паводками (1988, 1990) до прямой с тесным уровнем корреляции ($K_{\text{корр}} = 0,8$) в годы с высокими паводками (1996). Следует отметить, что периодическое возникновение отрицательного уклона на участке является важным фактом, свидетельствующем о кратковременных подпорных эффектах, не связанных с колебаниями водности.

Анализ и характеристика русловых процессов на участке Амура в районе Комсомольска (рисунок 17), представленные в отчете по НИР ГГИ (Отчет..., 19920, выполнены на основе последовательного совмещения следующих разновременных картографических материалов:

- карта реки Амур 1857 года с изображением надводного рельефа и глубин воды в отдельных створах при меженном уровне воды;
- навигационная карта Амура 1903 г. от Хабаровска до Николаевска с изображением изобат 12, 15 и 18 футов при меженном уровне воды, соответствующем «0» гидрологических постов;
- атлас Нижнего Амура 1930 года с подробным изображением руслового рельефа;
- топографическая карта 1957 года;
- топографические планы русла 1988 и 1991 годов.

Кроме того, в качестве вспомогательных материалов привлекались топографические карты 1941, 1977 и 1984 годов, лоцманские карты 1975, 1978 и 1983 годов, фрагментарные топографические планы русла 1968, 1970, 1972, 1977, 19083, 1984, 1987 и 1989 годов.

Анализ полученных схем и планов деформаций, относящихся к периоду 1887-1991 гг. (более 100 лет), выявил общую устойчивость русла в плане на рассматриваемом участке. Положение русла зафиксировано правым коренным склоном долины и, частично, массивами левобережной террасы, на которой расположен Комсомольск-на-Амуре. В этих условиях изменения плановых очертаний относятся, главным образом, к левому пойменному берегу, и русловой процесс выражается преимущественно в русловых переформированиях.

В течение рассматриваемого периода основное содержание деформаций русла на участке выше по течению о. Комсомольского и ныне существующего моста определялось развитием ухвостья о. Кеори (рисунок 10). Формирование ухвостья сопровождалось стеснением руслового потока в основном русле, последовательным отторжением вновь сформированных массивов ухвостья, закреплением их растительностью и превращением в новые острова.

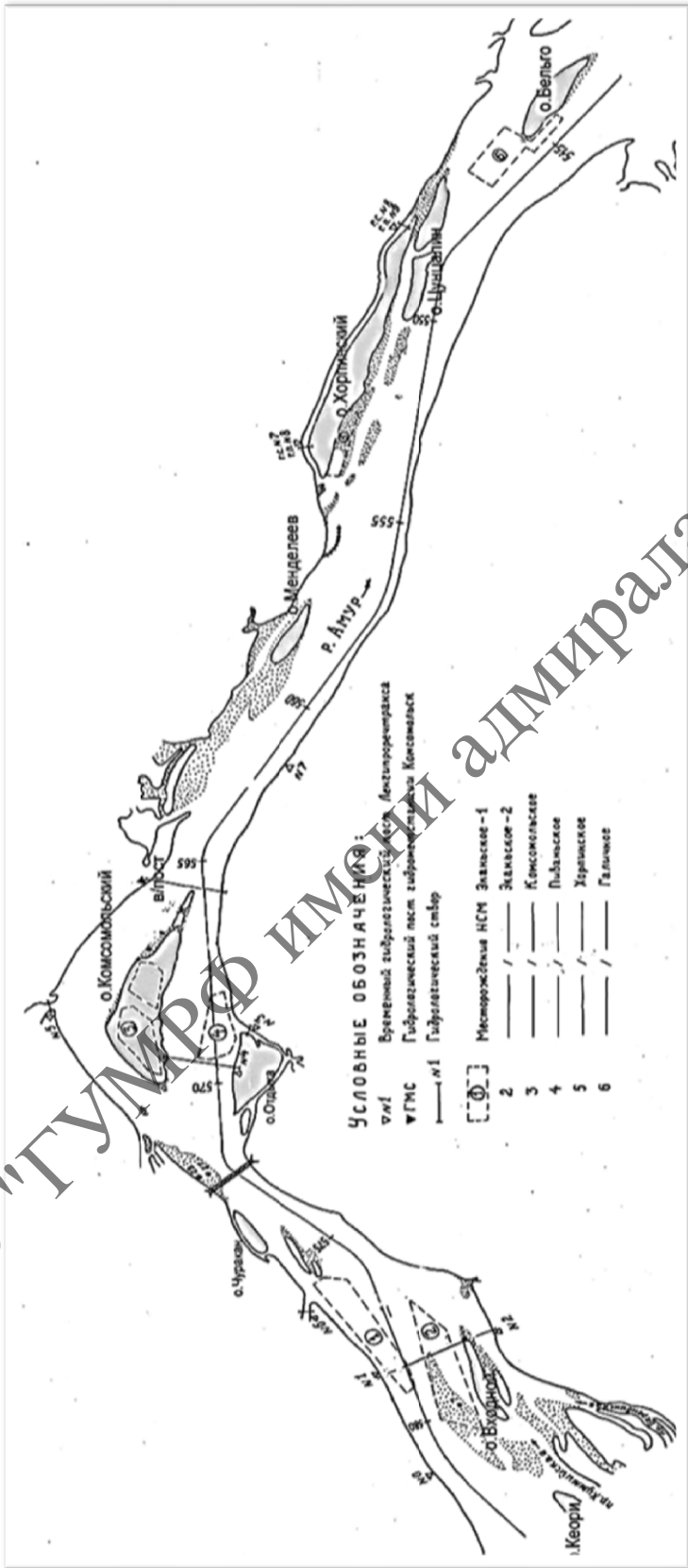


Рисунок 10 – Схема участка реки у Комсомольска-на-Амуре

Кроме того, наблюдалось смещение стрежня руслового потока и плесовой ложины русла к левому берегу на участке длиной 6 км, сужение и углубление плесовой ложины, размыв левого пойменного берега и образование ниже по течению в районе о. Чуракан прибрежных аккумулятивных мезоформ.

Основное содержание процессов руслоформирования на участке расположения мостового перехода и о. Комсомольский за 100-летний период заключалось в раздвоении русла реки и формировании между его рукавами крупного острова Комсомольский. Образование острова, начавшееся после 1930 года, было обусловлено развитием обширной отмели, примыкавшей к правому берегу и ее последующим отторжением от берега протокой, ставшей в последующем главным руслом реки. При этом развитию правой протоки и деградации левой способствовало развитие левобережного побочня в створе мостового перехода и ниже на месте плесовой ложины глубиной 10 м, который последовательно перекрывал вход в левобережную протоку. В это же время развивалось и ухвостье о. Комсомольский с циклическим отторжением его отдельных морфологических элементов.

Основным содержанием процессов руслоформирования на участке ниже о. Комсомольский (ниже устья р. Силинки) являлись: аккумуляция речных наносов в мелководной левобережной части русла, а также сосредоточение потока и углубление русла в его правобережной части. Внешним проявлением аккумулятивного процесса явилось развитие двух обширных отмелей и формирование двух новых островов: Менделеева и Цунцалина. Особенно активно аккумулятивный процесс проявился в районе острова Цунцалин.

Выполненный в работе (Отчет... 1992) анализ баланса донных наносов на всем рассматриваемом участке показал, что в период с 1930 по 1957 год русловой процесс имел ярко выраженную аккумулятивную направленность. В этот период интенсивно намывалось обширное ухвостье о. Кеори, шло активное формирование крупного левобережного побочня выше ныне существующего мостового перехода, формирование островов Комсомольского, Менделеева и Цунцалина. Аккумулятивный процесс охватывал подавляющую часть площади русла.

В последующий период аккумулятивная направленность процесса на участке сменилась на противоположную, о чем свидетельствует отрицательный баланс объемов деформаций, хотя в целом за период с 1930 по 1991 год этот баланс оставался накопительным. Причиной смены тенденций руслового процесса являются, по всей видимости, естественные многолетние колебания водности реки.

В ходе развития всех описанных выше морфологических элементов речного русла на рассматриваемом участке знакопеременные вертикальные деформации в отдельных местах достигали амплитуды 10-12 м. Представления об этом дают рисунки 11-12.

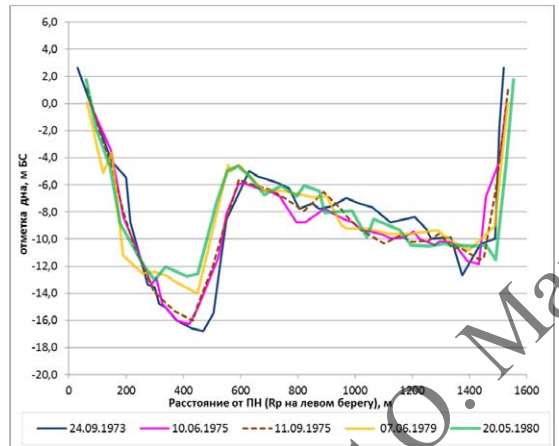
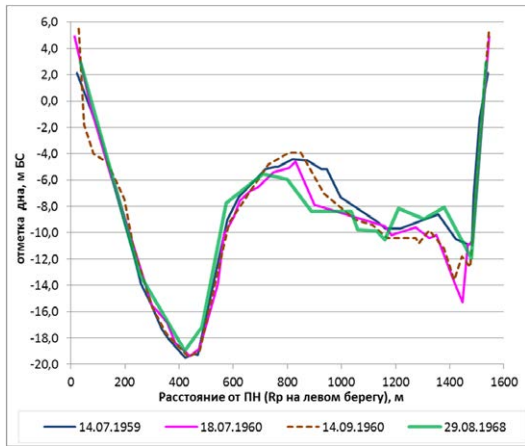


Рисунок 11 – Совмещенные поперечные профили русла в основном створе водпоста Амур - Комсомольск в период кратковременных разнонаправленных тенденций

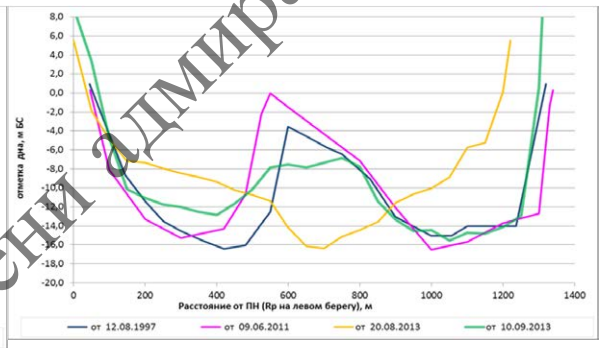
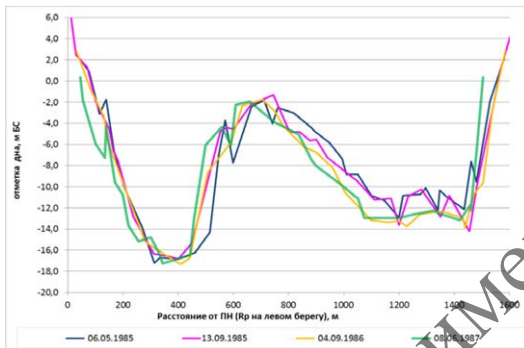


Рисунок 12 – Совмещенные поперечные профили русла в 1,0 км (слева) и 1,4 км (справа) ниже основного створа водпоста Амур-Комсомольск

Очевидно, что связанные с такой русловой динамикой изменения пропускной способности русла реки лучше всего могут быть охарактеризованы изменениями средних и минимальных по сечению отметок дна. Изменения средних по сечению отметок дна имели амплитуду до 3 м, а минимальных отметок – до 8 м, что является значимой величиной при глубинах реки 10-30 м (рисунок 13).

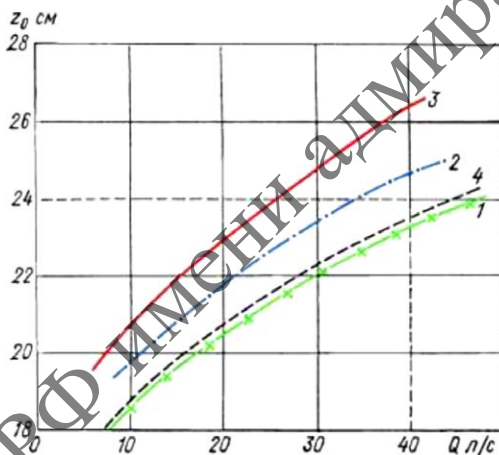
Представленные материалы характеризуют изменение морфологического строения русла реки в створе гидрологического поста Росгидромета. Имеющиеся в отчете ГГИ (Отчет..., 2008) материалы позволяют оценить многолетнюю динамику процессов аккумуляции наносов и врезания русла в пределах всего однорукавного участка реки у Комсомольска-на-Амуре.

На рисунках 14 и 15 представлены планы деформаций русла реки за два периода 1967-1988 и 1988-1991 гг.

Анализ этих материалов показывает, что в период 1967-1988 гг. наблюдавшийся размыв русла с амплитудой до 8 м в створе о. Менделеева в период 1988-1991 гг. сменился намывом почти по всей ширине реки с амплитудой до 3 м. Аналогичная многолетняя цикличность деформаций русла реки наблюдается и в районе острова Комсомольский, и в районе островов Цунцалини и Бельго (Отчет..., 1992).

Чередование в многолетнем плане размывов русла реки и аккумуляции наносов почти по всей его ширине отражает динамику внутрирусловых мезоформ (ленточных гряд, осередков и побочней), что придает циклический характер изменениям пропускной способности русла реки Амур в районе Комсомольска.

О степени влияния мезоформ речного русла на его пропускную способность можно судить по результатам экспериментальных исследований пропускной способности русел с мезоформами (рисунок 16), выполненным в ГГИ в гидравлических лотках (Клаевн... 2011).



1 - гладкое (безгрядовое) дно, 2 - микроформы, 3 - побочни с микроформами, 4 - побочни без микроформ
Рисунок 16 – Кривая $z_0 = f(Q)$ по данным экспериментов в 82-метровом лотке при разных состояниях дна

Как видно на рисунке 16, появление в русле побочней с грядами на их поверхности, что характерно для равнинных рек, приводит к понижению пропускной способности русла и повышению отметок свободной поверхности на 10-20% от средней глубины экспериментального потока (10 см). Это означает, что динамика мезоформ в русле реки Амур в районе Комсомольска может обусловить амплитуду изменения уровней воды при прохождении фиксированных расходов воды, в том числе редкой повторяемости, до 2,0-2,5 метров, что мы и наблюдали в паводок 2013 года.

ОУ ВО "ТУМРФ имени адмирала С.О. Макара

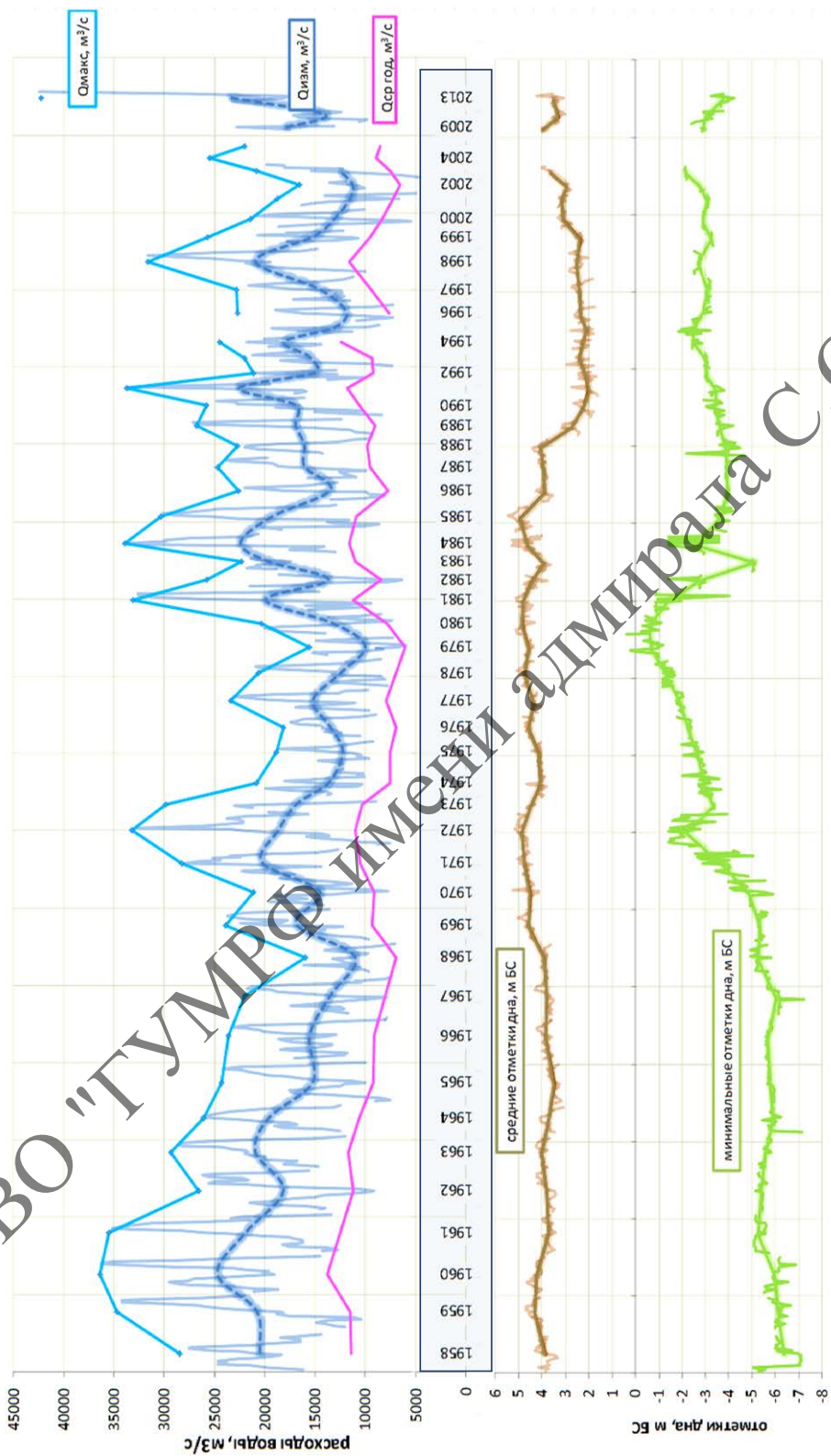


Рисунок 13 – Совмещенные колебания измеренных и характерных годовых расходов воды с отметками дна в створе основного поста Амур-Комсомольск

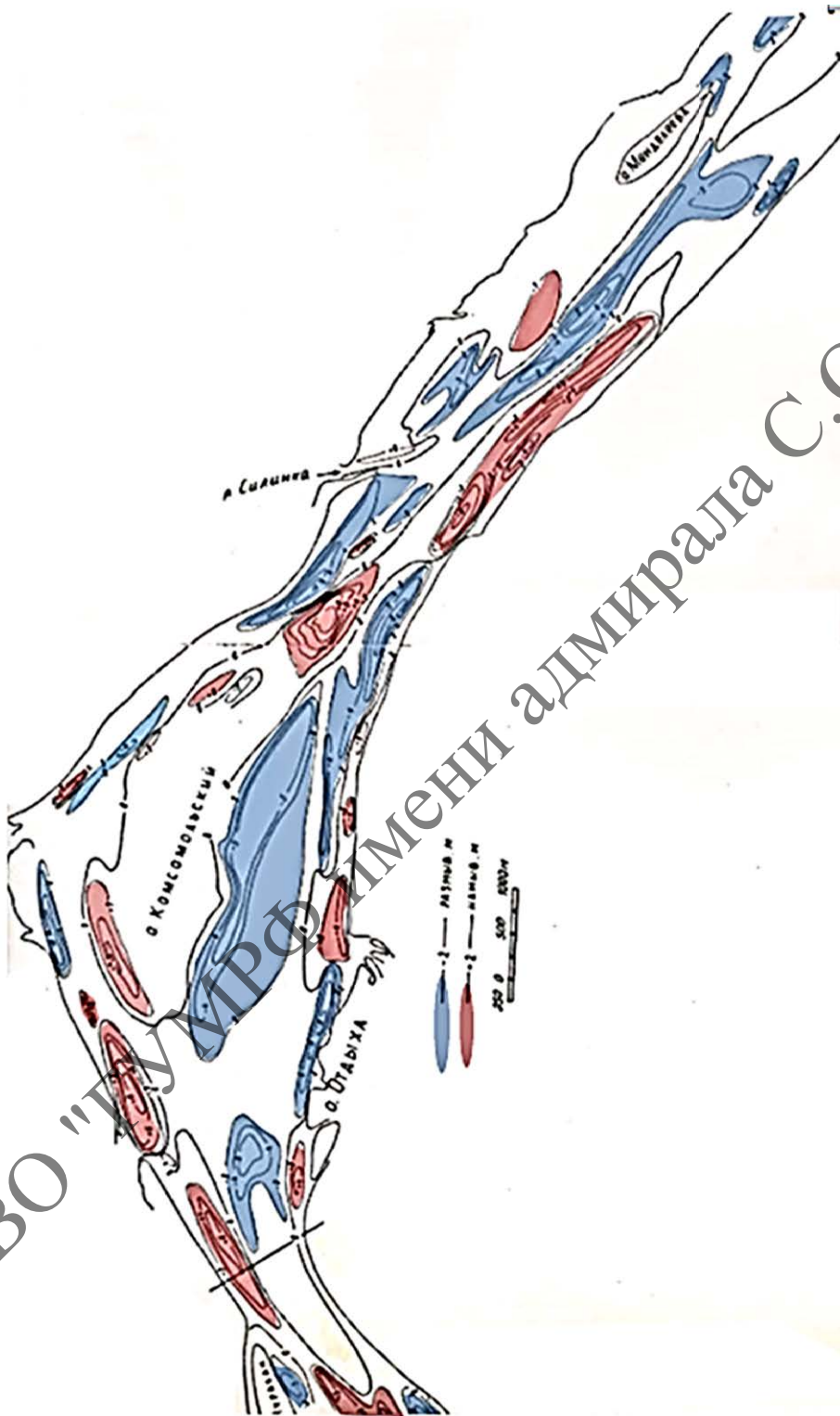


Рисунок 14 – План деформаций речного русла реки Амур в районе г. Комсомольск-на-Амуре за период 1967-1988 гг

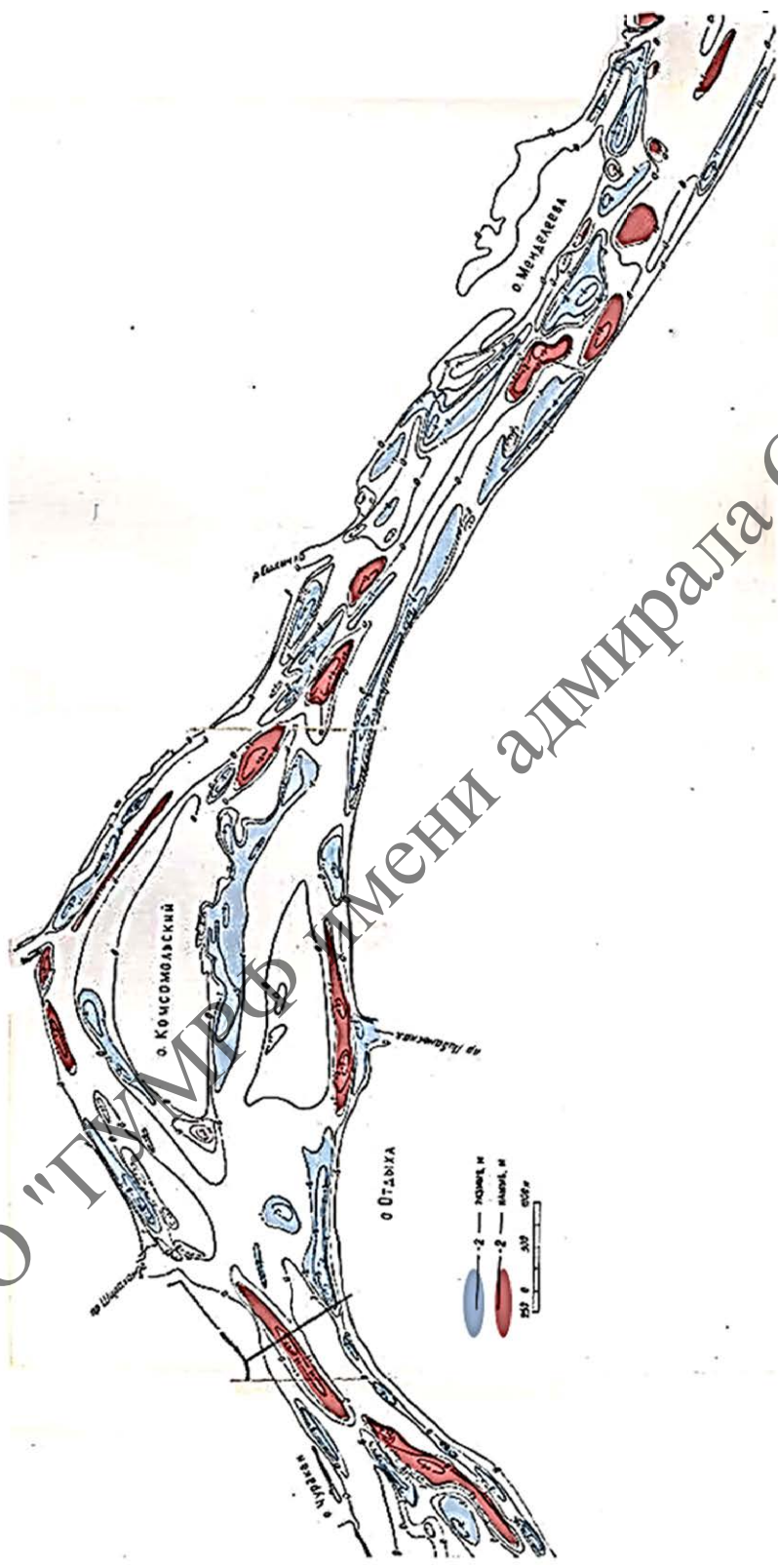


Рисунок 15 – План деформаций речного русла реки Амур в районе г. Комсомольск-на-Амуре за период 1988-1991 гг.

Выводы

В результате выполненных исследований возможных причин многолетних изменений пропускной способности русла реки Амур в районах городов Хабаровск и Комсомольск-на-Амуре установлено следующее:

1) Изменения пропускной способности русла, обусловившие высокие уровни прохождения максимальных расходов воды в створах гидропостов Амур-Хабаровск и Амур –Комсомольск-на-Амуре в период паводка 2013 года, остались в пределах амплитуды естественных наблюдавшихся ранее изменений пропускной способности русла.

Высокие уровни прохождения максимальных расходов воды в створах гидропостов Амур-Хабаровск и Амур – Комсомольск-на-Амуре в период паводка 2013 года обусловлены изменениями пропускной способности речного русла, амплитуда которых остались в пределах естественных многолетних изменений пропускной способности русла.

2) Наблюденные уровни прохождения максимальных расходов воды в створах гидропостов Амур-Хабаровск и Амур-Комсомольск легли на крайнюю верхнюю обгибающую поля точек на зависимости $Q=f(H)$.

3) Основной причиной многолетних изменений пропускной способности русла реки в нижнем течении Амура являются естественные и закономерные изменения морфологического строения русла реки, обусловленные транзитным движением донных руслоформирующих наносов в виде мезоформ (ленточных гряд, побочней и осередков) и многолетним циклическим развитие осередков-островов и их морфологических подводных элементов.

4) Вертикальные циклические деформации русла реки, обусловленные указанной вышешединамикой речного русла, имеют амплитуду от 2 до 10 м, что при глубинах в реке 10-20 м оказывает определяющее влияние на изменения пропускной способности русла реки на участках с русловой многорукавностью.

5) В связи с многолетними колебаниями водности на Нижнем Амуре наблюдается чередование периодов аккумуляции донных руслоформирующих наносов в русле реки (1930-1957 гг.) и периодов сработки аккумулятивных накоплений донных наносов (1957-1991 гг.), что также определяет соответствующую цикличность в изменениях пропускной способности русла реки на морфологически однородных участках.

6) Для разработки метода прогноза изменений уровней прохождения высоких и экстремальных паводков в районах Хабаровска и Комсомольска-на-Амуре, обусловленных процессами руслоформирования, на участках сужения русла Амура необходимо выполнить детальные исследования связи русловых процессов и гидравлических условий прохождения паводков на основе детальных натурных гидрологических изысканий и физического моделирования на пространственных гидравлических моделях. Результаты этих исследований в последующем могли бы быть

распространены на все аналогичные участки реки Амур в качестве методической основы прогнозирования максимальных уровней воды при прохождении паводков.

7) По результатам этих исследований должна быть разработана специальная программа ведения мониторинга состояния дна и берегов реки Амур, которая обеспечила бы своевременное получение исходной натурной информации об изменениях морфологического строения русла реки на ключевых участках для оперативного прогнозирования уровней прохождения высоких и экстремальных паводков.

Список литературы

- Гришанин К.В. Гидравлическое сопротивление естественных русел –СПб, Гидрометеиздат, 1992 - 182 с.
- Дополнения к отчету по НИР «Рекомендации по проведению первоочередных инженерных защитных мероприятий на участке р. Амур в районе подводного перехода МНВСТО-II» - СПб, ГГИ, 2013 – 6 с.
- Клавер А.Б., Копалиани З.Д. – Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса – СПб, Нестор-История, 2011 – 504 с.
- Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса – Л., Гидрометеиздат, 1982 – 272 с.
- Отчет по НИР «Анализ и прогноз руслового процесса р. Амур в створе подводного перехода нефтепровода проектируемой трубопроводной системы "Восточная Сибирь – Тихий океан" участок НПС "Сковородино" – СМНП "Козьмино" (ВСТО-II)" – СПб, ГГИ, 2008 – 32 с.
- Отчет по НИР «Заключение о развитии руслового процесса р. Амур в районе сел Воронежских для разработки рекомендаций по нормализации работы реконструируемого водозабора Хабаровской ТЭЦ-3» - СПб, ГГИ, 1992 – 21 с.
- Отчет по НИР «Исследование руслового процесса р. Амур у г. Комсомольск-на-Амуре в связи с проектом освоения месторождений нерудных строительных материалов» – СПб, ГГИ, 1992. - 180 с.
- Соловьев И.А. Перекаты Нижнего Амура – Хабаровск, ДВ филиал СО АН СССР, 1960. - 100 с.

¹ ON POSSIBLE CAUSES OF CHANGES IN THE AMUR CHANNEL DISCHARGE CAPACITY NEAR Khabarovsk AND Komsomolsk-on-Amur (*V.M. Katolikov, N.I. Katolikova*)

An analysis is made of the long-term dynamics of stage-discharge curves for the Khabarovsk and Komsomolsk-on-Amur gauges. The analysis revealed a substantial amplitude in periodic long-term annual curve deflections from long-term average annual. These deflections have been found to occur at both high and low stages.

An analysis is also made of possible causes of changes in hydraulic resistance in the vicinity of the Komsomolsk-on-Amur gauge and a hypothesis is justified that the main reason for such long-term changes in stage-discharge relationship consists in the long-term dynamics of mid-channel bars forming in a reach between Komsomolskiy Island and the shallow near the village of Belgo. The analysis of stream bed dynamics in this reach for 1930-1991 indicated that variation of bed elevation marks due to the dynamics of stream bed mesoforms has an amplitude up to eight meters and can, therefore, substantially influence and even determine the hydraulic resistance mode in the Amur River and, consequently, flood stages of various probabilities.

ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ АМУРСКИХ НАВОДНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫДАЮЩИХСЯ ПАВОДКОВ В БАССЕЙНЕ АМУРА

Шалыгин А.Л.

ФГБУ «ГТИ», Санкт-Петербург, shalygin@ggi.nw.ru

Анализ пространственного распределения вероятностей наивысших уровней и расходов воды, а также объемов наиболее выдающихся паводков на Амуре и в его бассейне показал, что на экстремальность наводнений на Амуре влияют не только и не столько максимальные расходы и уровни паводков на его притоках, но, главным образом, объемы этих паводков в результате большой их продолжительности

Наиболее выдающиеся паводки с измеренными характеристиками на большинстве рек Амурского бассейна произошли в 1958, 1959, 1984 и 2013 гг. По многолетним рядам наблюдений были определены вероятности наивысших уровней и расходов воды, а также объемов этих паводков на Амуре и в его бассейне и построены карты пространственного распределения этих вероятностей, что позволило сделать выводы об условиях формирования опасных наводнений на Среднем Амуре, в г. Хабаровске и на Нижнем Амуре в зависимости от характеристик паводков на Верхнем Амуре и р. Зея.

В 1958 г. (рисунок 1) водность рек бассейна Амура, за исключением Сунгари и Уссури, была выше нормы, как по наивысшим уровням, так и по объемам паводка.

Основной паводок сформировался на р. Шилка. Объемы паводка на Шилке и на Аргуни имели обеспеченность 7-8%, после их слияния на Верхнем Амуре обеспеченность наивысших уровней составила менее 1%, а объемов паводка – около 1%. Далее паводок продвигался по Верхнему Амуре с аналогичными параметрами вплоть до Благовещенска.

На Среднем Амуре паводок постепенно снижался (обеспеченность увеличивалась от 1,5 до 8% в районе Хабаровска). Из основных притоков можно отметить повышенную водность Селемджи. На Зее, Буреи, Сунгари и Уссури высоких паводков не наблюдалось, поэтому на Нижнем Амуре паводок окончательно потерял силу как по максимальным расходам и уровням, так и по объему.

В 1959 г. (рисунок 2) водность рек бассейна Амура, за исключением Аргуни и Сунгари, была выше нормы, как по наивысшим уровням, так и по объемам паводка. По всей зоне формирования стока Амура экстремально высоких уровней воды не наблюдалось, однако за счет продолжительности и синхронности паводка на Верхнем Амуре и в бассейне р. Зея у г. Благовещенска образовалась паводочная волна с обеспеченностями 2-5% как по наивысшим уровням, так и по объему. По Среднему Амуре волна паводка продвигалась, не снижая высоты и объема за счет большого количества воды, поступающей от Буреи и многочисленных

левобережных притоков. На Нижнем Амуре экстремальность высоты паводочной волны сохранилась.

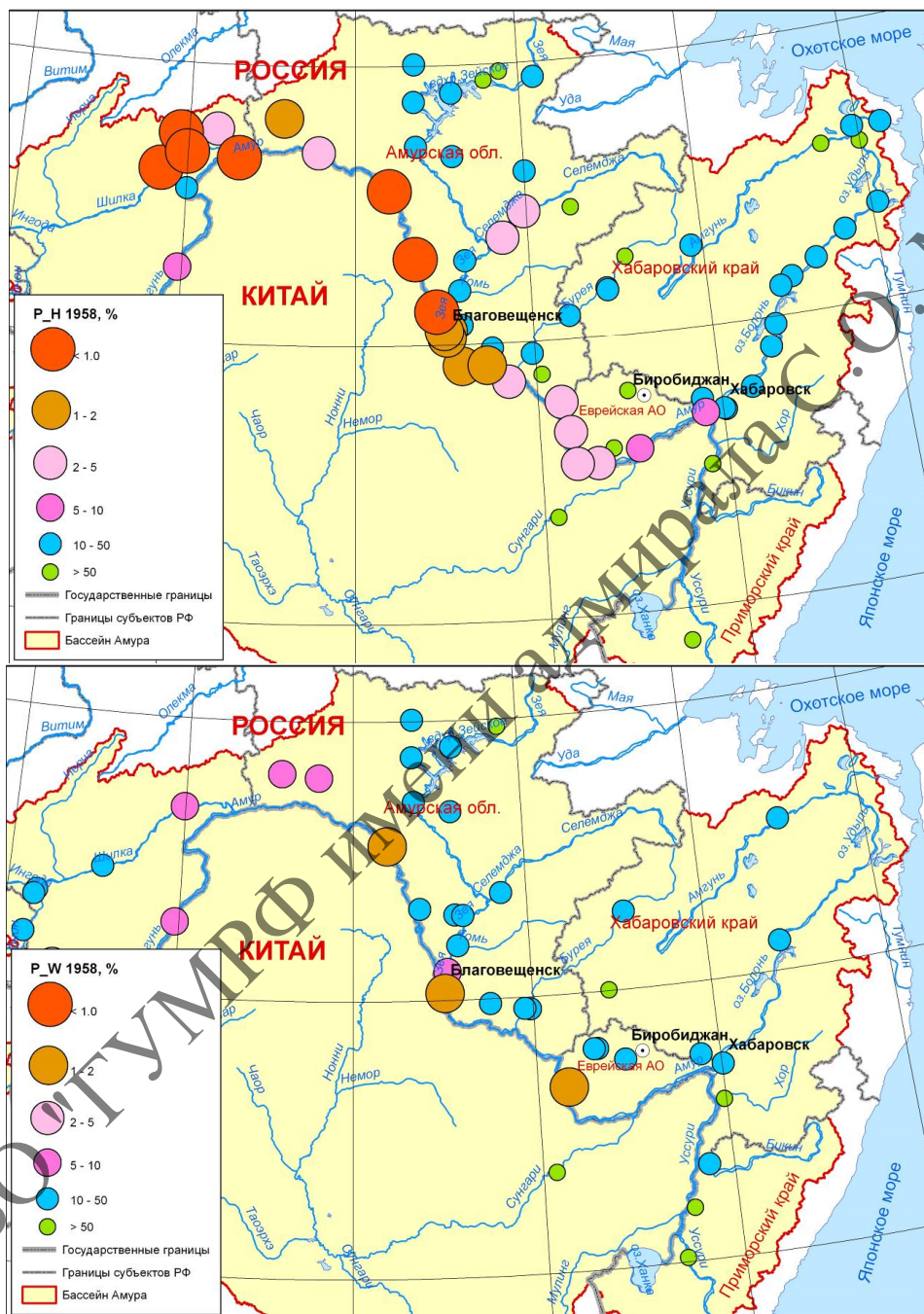


Рисунок 1 - Распределение значений обеспеченности наивысших уровней воды (вверху) и объемов паводка (внизу) по территории Амурского бассейна в 1958 г.

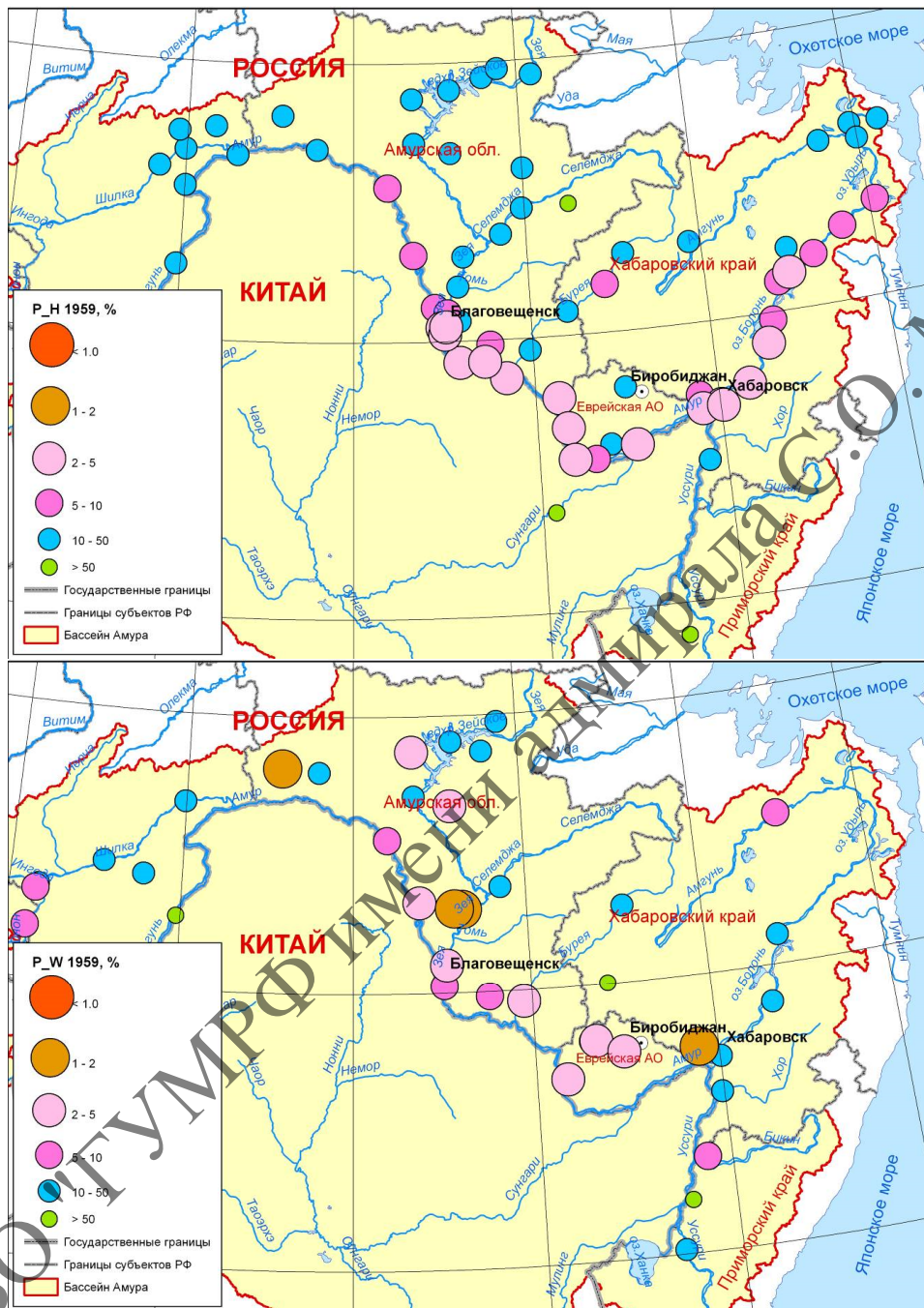


Рисунок 2 - Распределение значений обеспеченности наивысших уровней воды (вверху) и объемов паводка (внизу) по территории Амурского бассейна в 1959 г.

В 1984 г. (рисунок 3) водность практически всех рек бассейна Амура была выше нормы, как по наивысшим уровням, так и по объемам паводка. В зоне формирования стока Амура паводок

характеризовался большой высотой только на Аргуни, ряде притоков Зеи и Амгуни. Объем паводка всего Верхнего Амура, включая Аргунь и Шилку, был весьма высоким, на других притоках, включая Зею, он незначительно превышал норму.

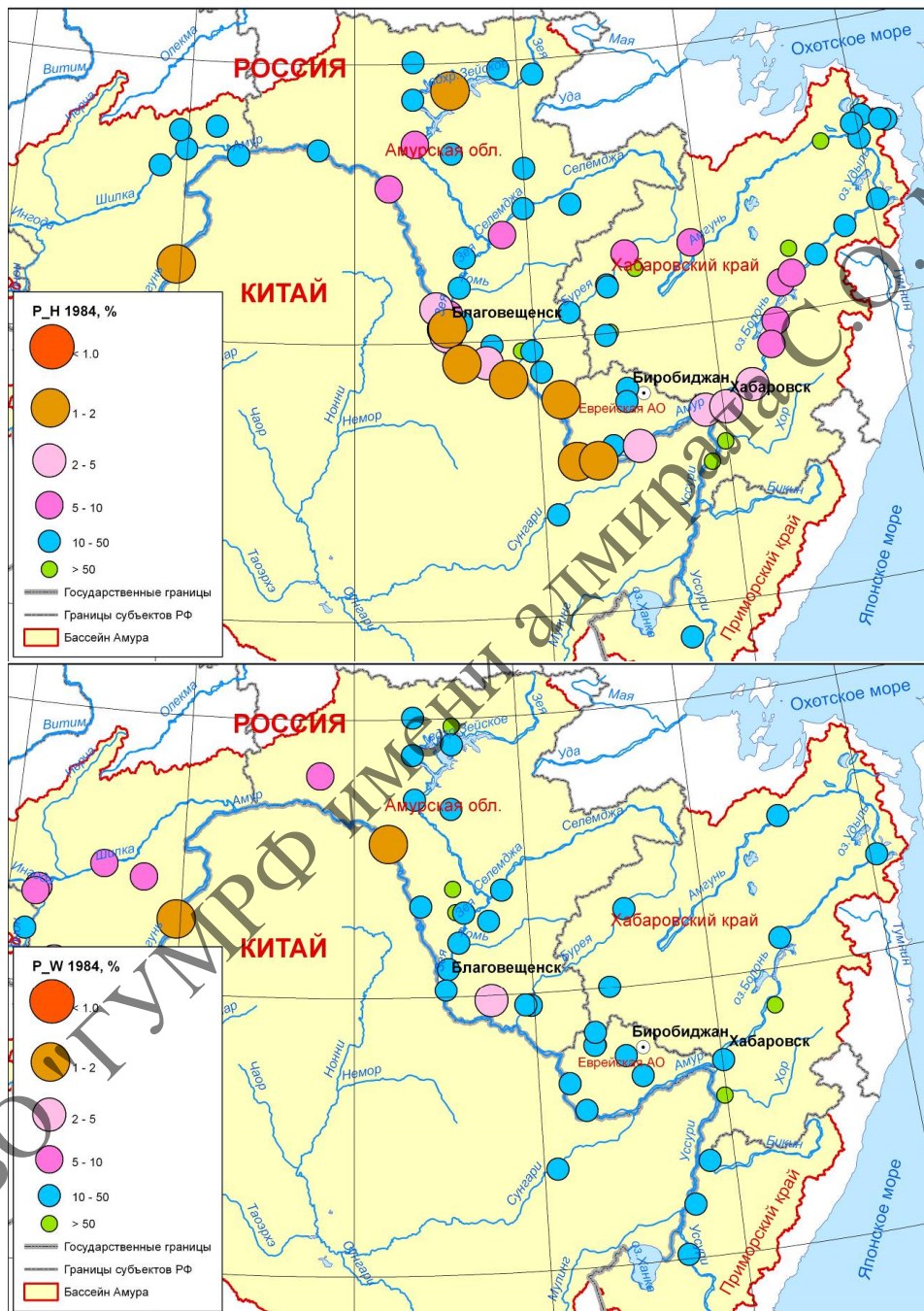


Рисунок 3 - Распределение значений обеспеченности наивысших уровней воды (вверху) и объемов паводка (внизу) по территории Амурского бассейна в 1984 г.

В результате поступления большого объема воды из Аргуни и Шилки, на Верхнем Амуре образовалась паводочная волна с обеспеченностью 5-10% по высоте и 1-2% по объему. В Благовещенске высота паводка характеризовалась обеспеченностью около 2%, которая далее продвигалась по Среднему Амуру с обеспеченностями 1-2%, а на Нижнем Амуре постепенно снижалась в зону обеспеченности по высоте 5-10%. Объем паводка в Амуре при этом был далеко не экстремальным.

В 2013 г. (рисунок 4) водность практически всех рек бассейна Амура была выше нормы как по наивысшим уровням, так и по объемам паводка. Катастрофический паводок 2013 г. в зоне формирования стока Амура характеризовался большой, хотя и не экстремальной высотой на реках Аргунь, Шилка, Зeya и Сунгари. Объем же паводка на Верхнем Амуре, в бассейне Зеи и ряда других правобережных притоков Амура был экстремально большим и характеризовался обеспеченностями менее 1%. В результате у Благовещенска сформировалась паводочная волна с обеспеченностями по высоте 2-5%, а по объему – менее 1%.

По мере продвижения по Среднему Амуре экстремальность высоты паводка возрастала. После впадения Сунгари, на которой паводок был экстремальным по объему, но в пределах обеспеченностей 5-10% по высоте за счет регулирования стока китайскими водохранилищами, высота паводка резко увеличилась до обеспеченностей около 0,5% в Хабаровске и 0,5-1,0% далее по Нижнему Амуре почти до устья р. Амгунь.

Следует отметить, что объем паводка в Амуре у Хабаровска в 2013 г. характеризовался обеспеченностью только 4%, хотя годовой объем стока здесь был наибольшим за весь период наблюдений и имеет обеспеченность мене 1%. Здесь сказалось влияние регулирования российских и китайских водохранилищ в бассейне, которые аккумулировали значительную часть объема стока паводочного периода 2012 г. и срабатывали ее в зимний период 2012-2013 гг.

Резюмируя результаты анализа экстремальности прошедших в XX веке и в 2013 г. паводков в бассейне Амура, можно сделать следующие выводы по особенностям формирования выдающихся наводнений в различных частях бассейна:

1) Наводнения на Амуре формируются главным образом на 6-ти его главных притоках (основной зоне формирования стока) – реках Аргунь, Шилка, Зeya, Буряя, Сунгари и Уссури. Чем большее количество из этих притоков имеет значительно повышенную водность, тем выше паводок на Амуре.

2) На экстремальность наводнений на Амуре влияют не только максимальные расходы и уровни паводков на его притоках, но и объем этих паводков в результате большой их продолжительности.

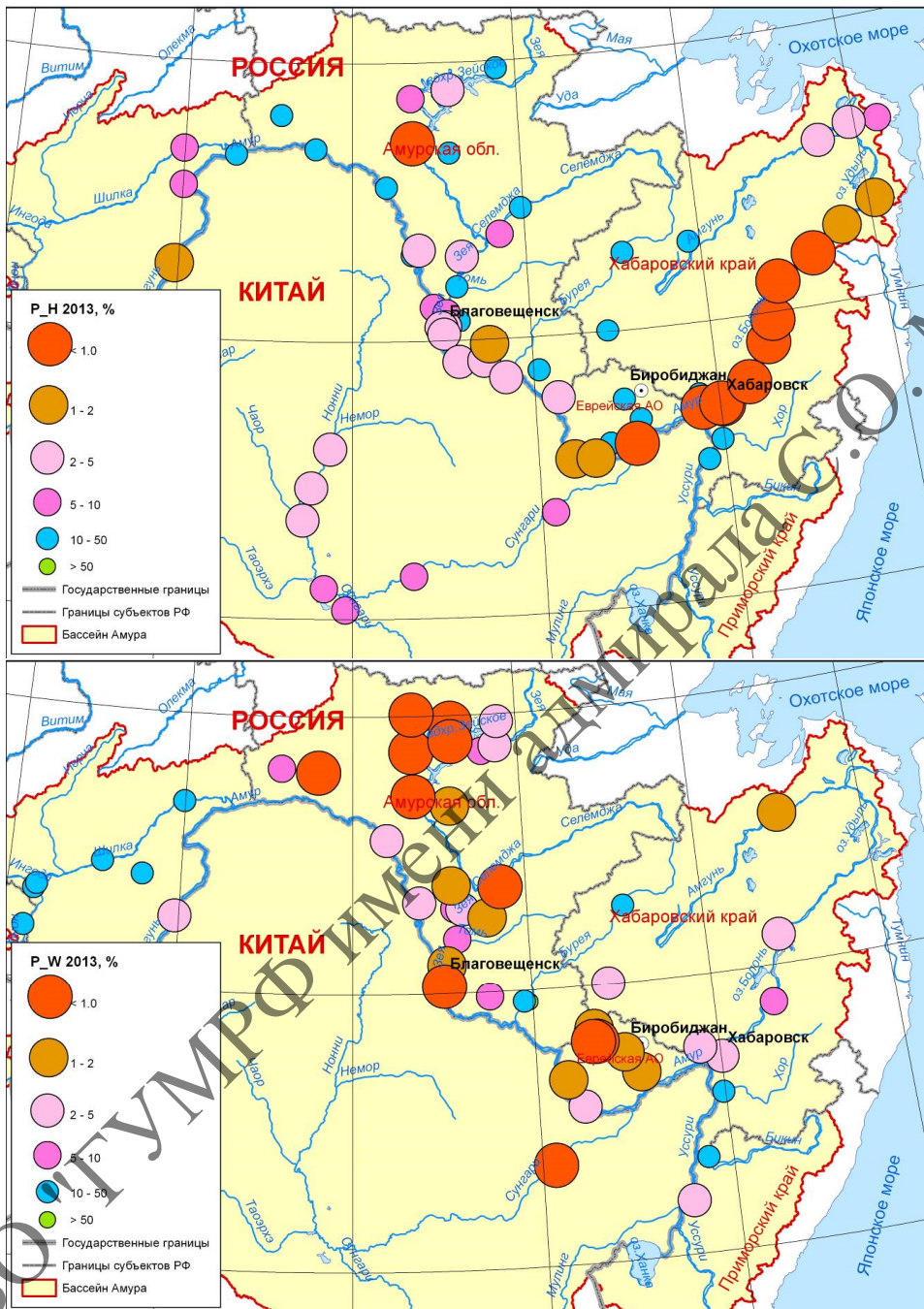


Рисунок 4 - Распределение значений обеспеченности наивысших уровней воды (вверху) и объемов паводка (внизу) по территории Амурского бассейна в 2013 г.

3) Наводнения в г. Благовещенске формируются в результате паводков на Верхнем Амуре и в бассейне Зеи, при этом они могут быть обусловлены как большой высотой уровня кратковременных паводков, так и большим объемом продолжительных паводков при относительно небольшой высоте. Экстремальность наводнений здесь увеличивается в случаях синхронного прохождения паводков по Верхнему Амуру и Зеи.

4) Для формирования опасных наводнений на Среднем Амуре, в г. Хабаровске и на Нижнем Амуре обязательным условием является образование паводочной волны большого объема на Верхнем Амуре и/или р. Зея. Такие паводки даже при относительно невысоких максимальных расходах и уровнях (1959 и 1984 гг.) вызывают подъем уровней воды на Среднем Амуре и в Хабаровске до экстремально опасных значений, которые могут сохраняться и на Нижнем Амуре. При экстремально высоких по расходам и уровням, но кратковременных паводках с относительно невысоким объемом на Верхнем Амуре и в бассейне р. Зея (1958 год) высота паводка на Среднем Амуре постепенно снижается и не вызывает наводнений в Хабаровске и на Нижнем Амуре (при отсутствии высоких паводков на притоках Среднего Амура). К опасному повышению уровня воды в г. Хабаровске и на Нижнем Амуре не привел также экстремально высокий паводок на р. Сунгари в 1998 г. ввиду невысокой водности в остальной части Амурского бассейна.

5) В 2013 г. паводки сформировались на 4-х из 6-ти основных притоков Амура – реках Аргунь, Зея, Сунгари и Уссури. При этом максимальные расходы и уровни не были выдающимися (обеспеченности от 2 до 7%). Объемы же этих паводков, особенно на реках Зея и Сунгари, оказались экстремально высокими. Совпадение всех этих факторов и привело к катастрофическому наводнению на большей части Амурского бассейна.

THE AMUR FLOODS TRIGGERING FACTORS BASED ON SPATIAL ANALYSIS OF PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF SOME MAJOR FLOODS IN THE AMUR RIVER BASIN (*A.L. Shalygin*)

An analysis of spatial distribution of probabilities of highest stages and maximum discharges, as well as volumes of major floods on the Amur River and within its basin, indicated that the magnitude of the Amur floods is largely influenced by volumes of floods on its tributaries due to their long duration rather than high stages and maximum discharges of these floods

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УРОВЕННОГО РЕЖИМА РЕК АМУР И ЗЕЯ У Г. БЛАГОВЕЩЕНСКА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ПАВОДКОВ

Иванов В.А.

ФГБУ «ГГИ», Санкт-Петербург. iva50nov@yandex.ru

Рассматриваются особенности режима уровней воды в узле слияния рек Амур и Зея при прохождении дождевых паводков на основе анализа материалов регулярных наблюдений за уровнями и расходами воды на гидрологических постах

Особый интерес к вопросу об уровненом режиме в узле слияния рек Амур и Зея объясняется, прежде всего, тем, что прибрежные территории этих водотоков в последнее время активно застраиваются. Уже построены и продолжают строиться набережные на Амуре в г. Благовещенске и китайском городе Хэйхэ, начаты и продолжаются работы по защите Благовещенска от затопления со стороны Зеи, в планах на ближайшее время возведение автомобильного моста и канатной переправы через Амур. Все эти работы, затрагивающие русловую и пойменную части рек Амур и Зея, существенно изменяют режим пропуска дождевых паводков. Уменьшение зоны затопления прилегающих городских территорий приводит к перераспределению пойменной составляющей паводка в русловую часть и, как следствие, к дополнительному повышению уровней воды. В статье рассматривается режим уровней в узле слияния рек Амур и Зея при прохождении дождевых паводков на основе имеющихся регулярных материалов наблюдений за уровнями и расходами воды на постах, непосредственно примыкающих к нему.

У Благовещенска встречаются два практически равнозначных по водности потока – река Амур и ее крупнейший приток река Зея (рисунок 1). Их взаимодействие между собой в узле слияния приводит к трансформации паводочных волн, возникновению подпорных явлений и кривых спада, как на основной реке, так и на притоке. Условия появления подпора, его величина и расстояние, на которое он распространяется, определяются рядом факторов – особенностями строения речного русла в узле слияния, водностью Амура и Зеи, сроками прохождения максимальных расходов на них, уклонами водной поверхности.

К узлу слияния Амур подходит полноводной рекой, протекающей между отрогами гор Ильхури-Алин слева и высокой равниной Амуро-Зейского плато справа. Долина Верхнего Амура представлена чередованием сужений и расширений. Расширения долины, как правило, приурочены к местам впадения в Амур притоков с обоих берегов.

Немногочисленные пойменные массивы используются для выпаса и заготовки сена. Русло реки изобилует перекатами и затруднительно для судоходства. У г. Благовещенска среднемноголетний расход воды возрастает до 1600 м³/с, ширина реки 800-1000 м, скорость течения 1,4–1,6 м/сек. Русло реки в месте слияния с китайской стороны изобилует островами и осередками,

затапливаемыми в периоды прохождения дождевых паводков, что свидетельствует о большом объеме русловых наносов, перемещаемых Амуром.

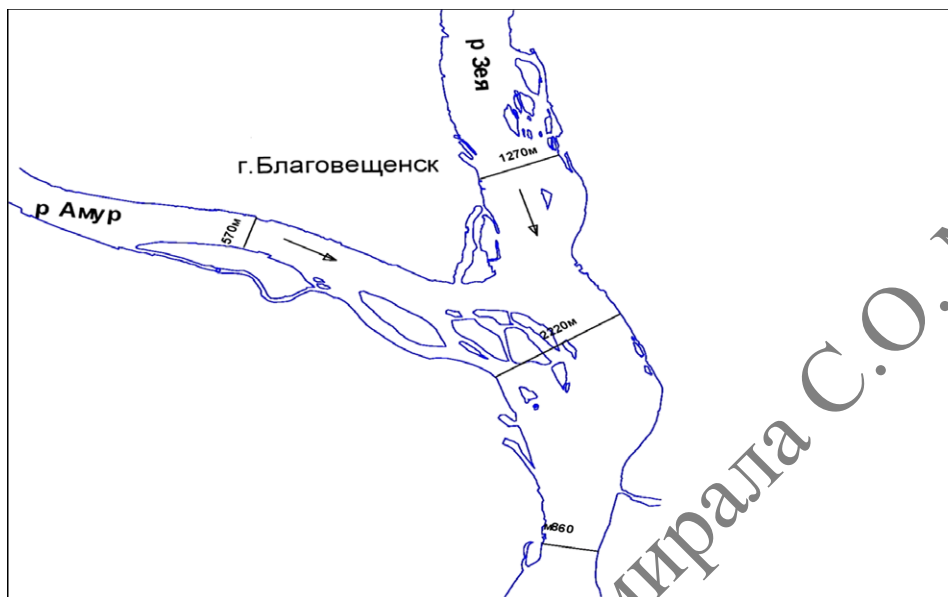


Рисунок 1 - Узел слияния рек Амур и Зей у г. Благовещенска

Река Зей вливается в Амур мощным широким потоком. В устье она шире и часто полноводнее Амура, поэтому кажется, что это Амур впадает в Зей. Кроме того, геологически именно долина Зеи является верхним продолжением долины Амура. Левый берег реки низменный, изобилует массой временных проток и озер, периодически затапливается при прохождении максимальных дождевых расходов. Правый берег Зеи представляет собой борт долины, возвышающийся над рекой более чем на 100 м. Незначительное количество осередков и островов в месте слияния потоков может свидетельствовать о дефиците русловых наносов в потоке из-за работы Зейской ГЭС или нечастых случаях подпорных явлений на Зее.

Наличие двух уровневых водомерных постов в черте г. Благовещенска на Амуре и на Зее позволяет рассмотреть вопрос о подпорных явлениях в узле слияния. Следует отметить, что в/п на Зее находится ближе (в 2,1 км) к месту слияния потоков, чем пост на Амуре (в 4,5 км), поэтому отметка уровня воды по нему в условиях отсутствия подпора и приблизительно одинаковых уклонах воды, всегда ниже отметки по в/п Амур-Благовещенск на величину около 15 см (рисунок 2).

Для оценки водности рек Амур и Зей при формировании максимальных паводочных уровней в Благовещенске использована информация о расходах и уровнях воды с 1948 года по в/п Амур-Кумара (в 230 км выше устья Зеи), Зей-Белогорье (в 43 км выше устья) и Амур-Гродеково (в 12 км ниже их слияния).

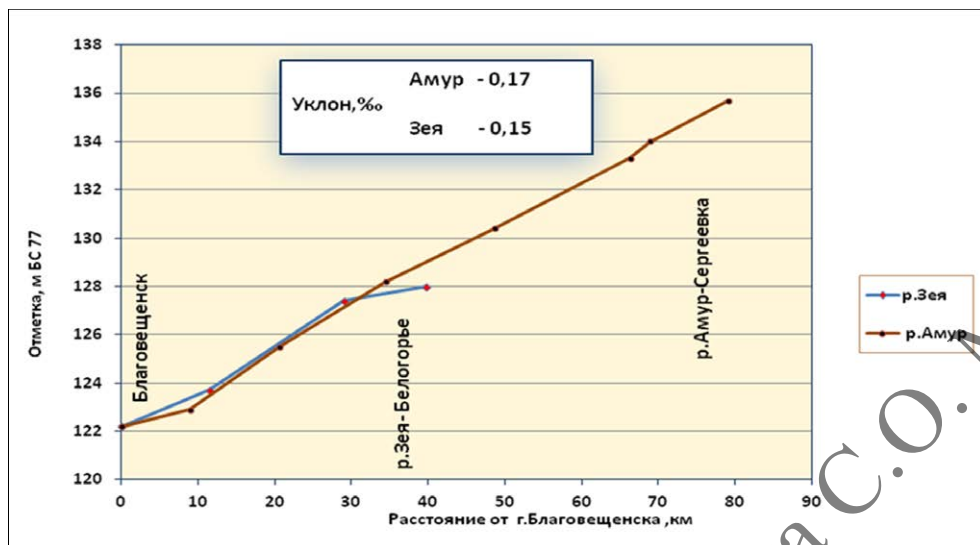


Рисунок 2 - Продольные профили водной поверхности рек Амур и Зeya на участках выше узла слияния

Сбор данных осуществлялся по следующей схеме:

- 1) По в/п Амур-Благовещенск выбирались максимальные годовые срочные уровни воды дождевых паводков и даты их стояния.
- 2) На эти же даты определялись уровни воды по в/п Зeya-Благовещенск.
- 3) Определялось время добегания паводочной волны от верхних стоковых створов до в/п Амур-Гродеково.
- 4) Уровни и расходы воды по в/п Амур-Кумара и Зeya-Белогорье подбирались на даты, соответствующие срокам наблюдения максимальных уровней воды по в/п Амур-Благовещенск, с учетом временем добегания паводочной волны от верхних створов до узла слияния потоков (Гродеково).
- 5) Для каждого года рассчитывался коэффициент K , равный отношению расхода воды в Амуре к расходу в Зее на дату стояния максимальных уровней воды по в/п Амур-Благовещенск.

Данные по расходам воды по в/п Амур-Кумара, начиная с 1968 года и по настоящее время, были восстановлены по многолетней кривой $Q = f(H)$, т.к. наблюдения за стоком в это время на посту не проводились.

Для определения времени добегания были построены графики связи $Q_{\text{Кумара+Белогорье}} = f(Q_{\text{Гродеково}})$ по данным о расходах воды за период с 01.06 по 30.09 1958 года для различных вариантов схем расчета (таблица 1). Расстояние от в/п Амур-Кумара и Зeya-Белогорье до в/п Амур-Гродеково составило 239 и 52 км соответственно. Наибольшая достоверность аппроксимации, как видно из таблицы 1, соответствует схеме расчета 2 сут. от в/п Кумара и

1 сут. от в/п Белогорье. График связи расходов, соответствующий этому варианту схемы определения времени добегания, представлен на рисунке 3.

Таблица 1 - Достоверность аппроксимации связи $Q_{\text{Кумара+Белогорье}} = f(Q_{\text{Гродеково}})$ для различных вариантов схемы расчета времени добегания до в/п Гродеково

N п/п	Схема расчета времени добегания до в/п Гродеково, сут.		Достоверность аппроксимации связи $Q_{\text{Кумара+Белогорье}} = f(Q_{\text{Гродеково}})$, R^2
	от в/п Кумара	от в/п Белогорье	
1	0	0	0,884
2	1	1	0,987
3	2	0	0,987
4	2	1	0,992
5	3	0	0,949
6	3	1	0,983

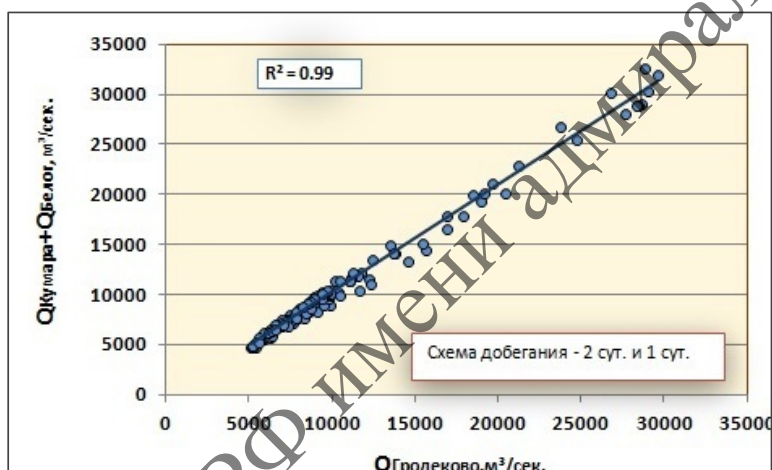


Рисунок 3 - График связи расходов $Q_{\text{Кумара+Белогорье}} = f(Q_{\text{Гродеково}})$

Конечно, время добегания паводочной волны до узла слияния меняется в зависимости от наполнения русла (величины расхода воды) и необязательно должно быть кратным суткам. Поэтому кроме принятой схемы времени добегания (2 сут. + 1 сут.), при больших наполнениях принималась к рассмотрению и схема 1 сут + 0 сут.

По полученным данным был построен график связи уровней воды по в/п Амур-Кумара и Амур-Благовещенск (рисунок 4).

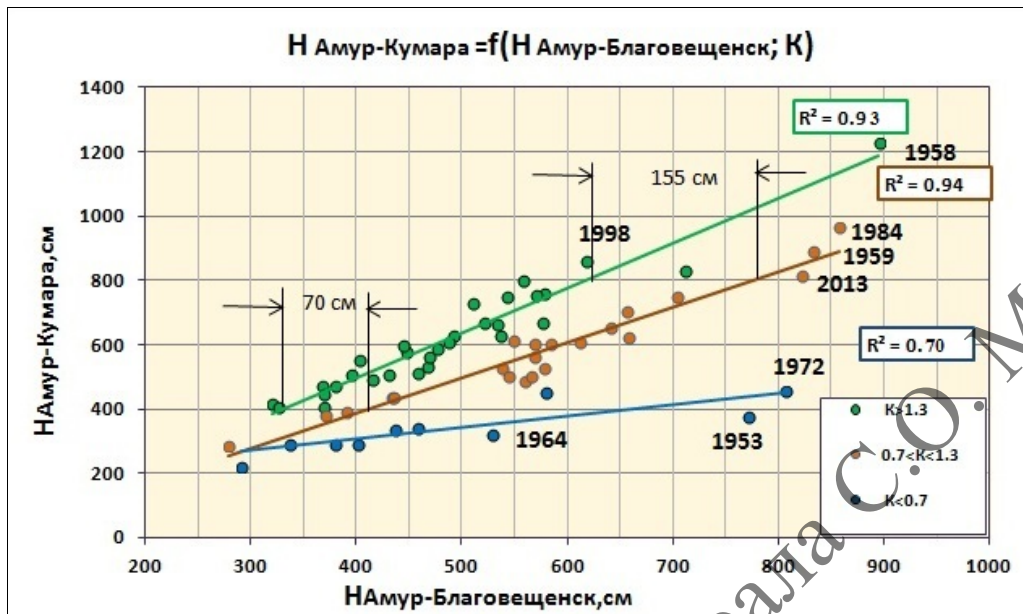


Рисунок 4 - График связи уровней воды по в/п Амур-Кумара и Амур-Благовещенск с учетом водности на главной реке и притоке.

Значительный разброс точек на графике свидетельствует о неустойчивости связи, обусловленной наличием подпорных явлений в узле слияния. Механизм образования подпорных явлений можно описать следующим образом: если на Амуре дождевой паводок проходит в более ранние сроки или подъем уровней воды в нем выше, чем на Зее, то в подпоре находится Зeya, и, наоборот, при более ранних сроках паводка или более высоких уровнях на Зее, в подпоре оказывается Амур.

Введение дополнительного параметра – коэффициента водности $K = Q_{\text{Амур}} / Q_{\text{Зeya}}$ – и разбивка всего массива данных на три ряда позволили систематизировать поле точек на рисунке 4. Это было выполнено путем ранжирования всех данных в возрастающем порядке по значению коэффициента K , который изменялся от 0,3 (1953, 1964, 1972 годы) до 5 (1962 год). Затем все точки были разбиты на три ряда по следующим условиям: $K < 0,7$; $0,7 < K < 1,3$; $K > 1,3$. Выбор интервалов обоснован тем, что среднее значение из коэффициентов достоверности аппроксимации, полученных по каждому интервалу, для схемы разбивки рядов $0,7 < K < 1,3$ было максимальным ($R^2_{\text{ср}} = 0,857$) по сравнению с рассмотренными ближайшими вариантами интервалов - $0,6 < K < 1,4$ ($R^2_{\text{ср}} = 0,855$) и $0,8 < K < 1,2$ ($R^2_{\text{ср}} = 0,788$). В итоге поле точек на рисунке 4 было систематизировано по параметру соотношения водности Амура и Зеи в узле слияния. По каждой из трех выборок проведены линии аппроксимации и определены коэффициенты тесноты связей.

Поле точек на рисунке 4 расширяется по мере повышения уровней воды. Аналогичным образом располагаются и линии аппроксимации выбранных рядов, по мере увеличения значений уровня воды они расходятся веером. Верхняя огибающая точек характеризует наблюдавшиеся за

рассматриваемый период максимальные годовые уровни воды по в/п Амур-Благовещенск, сформированные паводочной волной на Амуре при минимальном влиянии от Зеи. Нижняя огибающая графика соответствует случаям, когда максимальные уровни воды по в/п Амур-Благовещенск своим происхождением целиком обязаны дождевым паводкам, прошедшим по Зее, при минимальном влиянии на них стока Амура. Разница значений уровня воды по в/п Амур-Благовещенск, снятых с линий аппроксимации рядов $K > 1,3$ и $0,7 < K < 1,3$, при фиксированных значениях уровня воды по в/п Амур-Кумара, увеличивается по мере наполнения русла от 70 см (при уровне по в/п Амур-Кумара около 400 см) до 155 см (при уровне по в/п Амур-Кумара около 800 см), что свидетельствует о возрастании взаимного влияния главной реки и притока на режим уровней в узле слияния при увеличении отметок уровня воды. Данное увеличение можно интерпретировать так же, как прирост уровней воды на в/п Амур-Благовещенск за счет наложения паводков по рекам Амур и Зея в узле слияния. Представляется интересным рассмотреть сроки прохождения максимумов дождевых паводков и их амплитуды для некоторых точек на графике НАмур-Кумара = f (НАмур-Благовещенск; К).

Для дождевых паводков 1958 и 1998 годов (рисунок 5), характерным является то, что максимальные уровни воды у г. Благовещенска были сформированы паводочной волной, прошедшей по Амуре, при незначительных подъемах уровней на Зее.

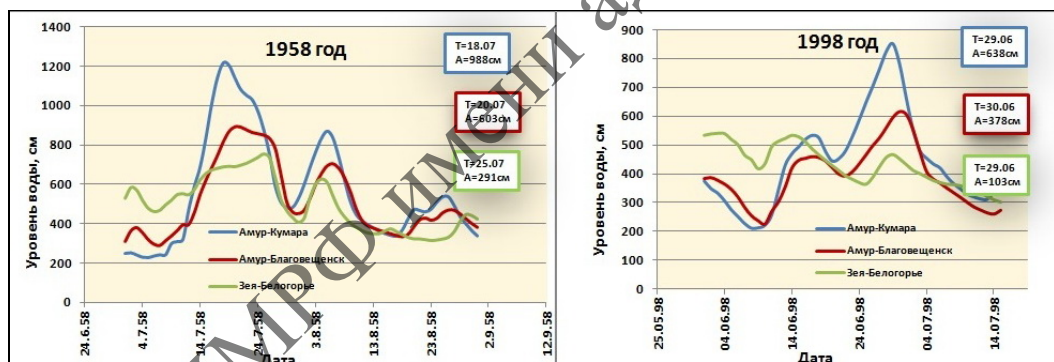


Рисунок 5 - Гидрографы уровня воды в 1958 и 1998 годах

Другие три многоводных года – 1959, 1984 и 2013 – схожи между собой тем, что максимальные уровни у г. Благовещенска сформированы приблизительно одинаковыми по водности паводками, прошедшими по Амуре и Зее, совпали и сроки их прохождения в узле слияния (рисунок 6). Паводок 2013 года, к тому же, отличается от всех рассмотренных существенно бóльшим объемом стока. Сведения об амплитуде и сроках прохождения максимумов представлены в таблице 2.

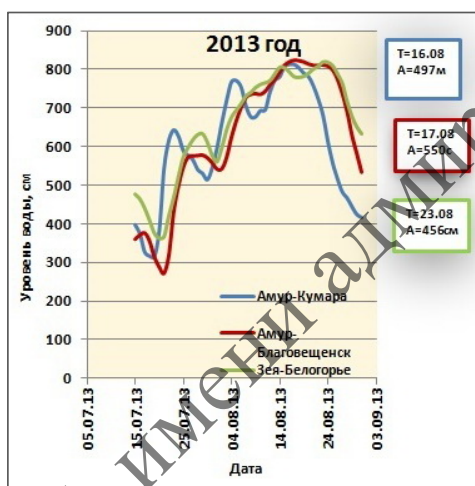
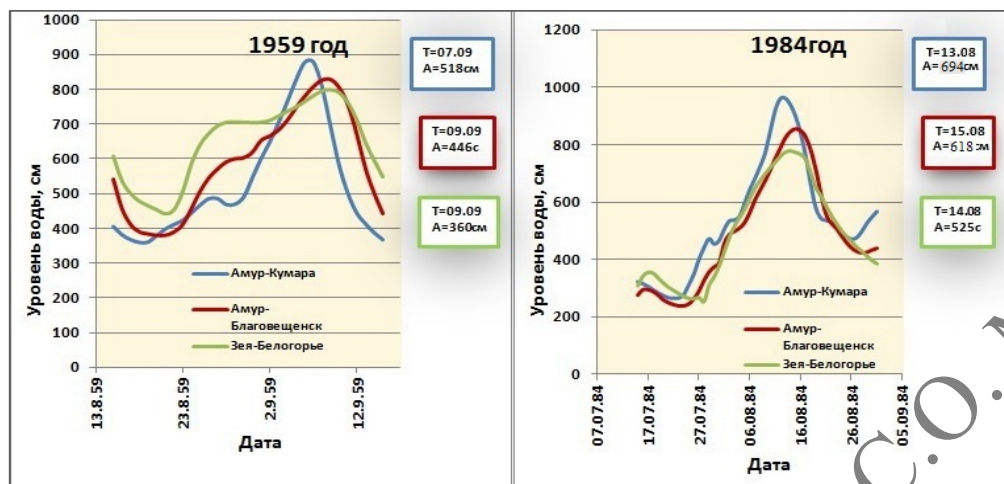


Рисунок 6 - Гидрографы уровня воды в 1959, 1984 и 2013 годах

Таблица 2 - Амплитуды и сроки прохождения максимумов дождевых паводков в 1959, 1984 и 2013 годах

Год	Водомерный пост	Амплитуда паводка, см	Дата прохождения максимальных уровней
1959	Амур-Кумара	518	07.09
	Амур-Благовещенск	446	09.09
	Зeya-Белогорье	360	09.09
1984	Амур-Кумара	694	13.08
	Амур-Благовещенск	618	15.08
	Зeya-Белогорье	525	14.08
2013	Амур-Кумара	497	16.08
	Амур-Благовещенск	550	17.08
	Зeya-Белогорье	456	23.08

В 1953 и 1972 годах максимальные уровни у г. Благовещенска были сформированы исключительно паводками, прошедшими на Зее (рисунок 7).

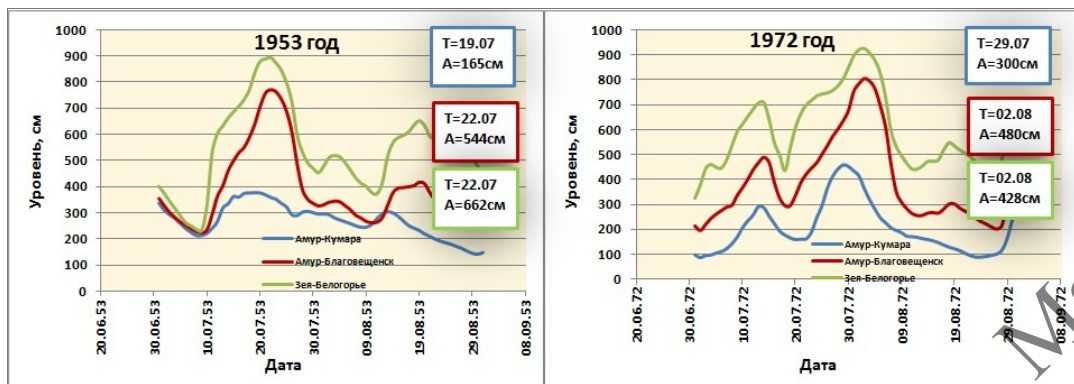


Рисунок 7 - Гидрографы уровня воды в 1953 и 1972 годах

Так, амплитуда паводков у с. Кумара на момент стояния максимальных уровней воды (с учетом времени добегания) на в/п Амур-Благовещенск составила в 1953 и 1972 годах 165 и 300 см, а по в/п Зейя-Белогорье – 662 и 428 см, соответственно.

Как уже отмечалось ранее, наличие двух водомерных постов на Амуре и Зее в черте г. Благовещенска позволяет существенно дополнить информацию по подпорным явлениям в узле слияния. Замечено, что разница уровней воды по в/п Амур-Благовещенск и Зейя-Благовещенск $\Delta H = H_{\text{Амур}} - H_{\text{Зейя}}$, может иметь как положительные, так и отрицательные значения и изменяется для рассматриваемого периода от -44 до $+119$ см. Минимальное значение $\Delta H = -44$ см наблюдалось при формировании подпорных уровней в русле Амура за счет паводка на Зее, значительно превосходящего паводок на Амуре в это время. И, наоборот, разница $\Delta H = +119$ см наблюдалась тогда, когда водность Амура значительно превосходила водность Зеи, и в подпоре был приток. Был построен график зависимости $K = f(\Delta H)$ (рисунок 8). Достоверность аппроксимации этой связи составила $R^2 = 0,89$.

Факт устойчивой связи между коэффициентом водности (K) и перепадом уровней воды (ΔH) позволил систематизировать поле точек на графике связи уровней воды по в/п Амур-Кумара и Амур-Благовещенск по параметру ΔH (рисунок 9). Весь массив данных, предварительно ранжированный по параметру ΔH в возрастающем порядке, был разбит на три ряда по следующим условиям: $\Delta H < 0$; $0 < \Delta H < 30$ и $\Delta H > 30$. Выбор таких интервалов обоснован максимальным значением достоверности аппроксимации по центральному ряду при $0 < \Delta H < 30$ ($R^2 = 0,916$), по сравнению с рассмотренными ближайшими вариантами интервалов - $-5 < \Delta H < 35$ ($R^2 = 0,846$) и $5 < \Delta H < 25$ ($R^2 = 0,896$).

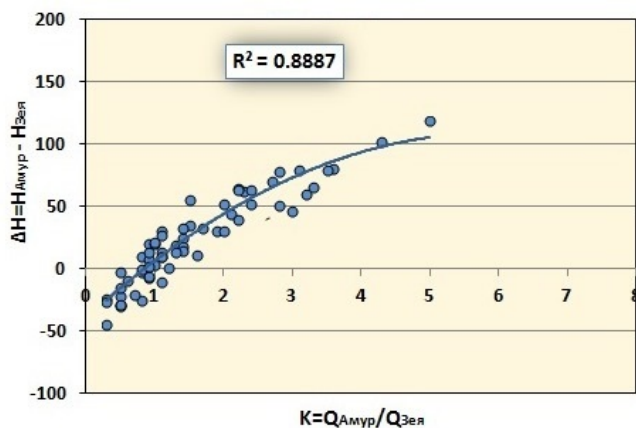


Рисунок 8 - Зависимость коэффициента водности от разницы уровней по в/п Амур-Благовещенск и Зяя-Благовещенск в узле слияния.

Значение $\Delta H = 15$ см (перепад уровней воды на в/п Амур-Благовещенск и Зяя-Благовещенск при одинаковой водности) явилось точкой, от которой были выбраны амплитуды центральных рядов, равные соответственно 30, 40 и 20 см. По результатам выполненных преобразований поле точек на рисунке 9 было систематизировано по параметру ΔH , характеризующему степень участия главной реки и притока в формировании подпорных явлений в узле слияния. По каждой из трех выборок проведены линии аппроксимации и определены коэффициенты тесноты связей. Следует отметить, что систематизирование поля точек графика $H_{\text{Амур-Кумара}} = f(H_{\text{Амур-Благовещенск}})$ по параметру водности $K = Q_{\text{Амур}} / Q_{\text{Зяя}}$ дало наилучшие результаты по сравнению с данными, показанными на рисунке 8.

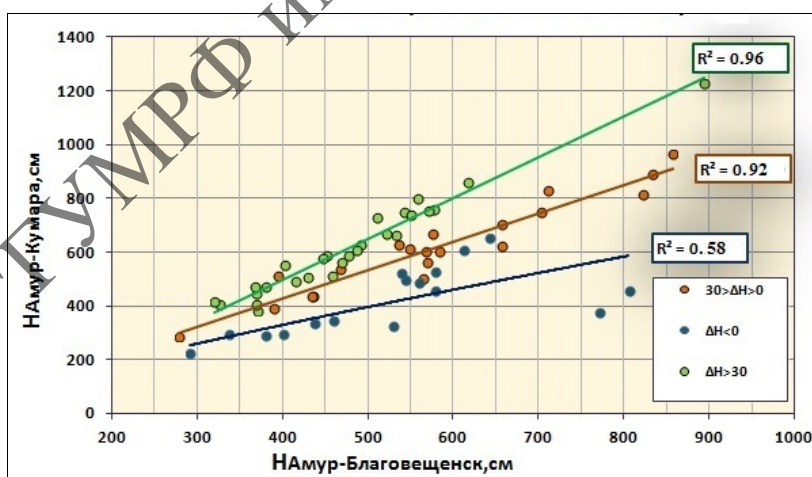


Рисунок 9 - График связи уровней воды по в/п Амур-Кумара и Амур-Благовещенск с учетом разницы уровней по в/п Амур-Благовещенск и Зяя-Благовещенск.

С 1975 года в полной мере началась эксплуатация Зейской ГЭС. При этом произошло существенное перераспределение стока Зеи внутри года. Годовая амплитуда колебания уровня воды на Зее снизилась на 1,5–2,0 м, как за счет увеличения отметок воды в период зимней межени, так и благодаря снижению максимумов дождевых паводков. По некоторым данным (Ким, 1999, 2005), наблюдаемое снижение высших отметок уровня на р. Зея у города Благовещенка после строительства ГЭС составило около 0,86 м. Подобное уменьшение водности притока в узле слияния безусловно должно было сказаться и на снижении подпорных уровней.

Точки зависимости НАмур-Кумара = f (НАмур-Благовещенск) были разбиты на два ряда – до и после 1975 года (рисунок 10). По каждой из двух выборок проведены линии аппроксимации и определены коэффициенты тесноты связей. Наблюдается увеличение коэффициента R^2 для ряда после 1975 года, что является вполне логичным, так как уменьшается, либо иногда почти сходит на нет влияние Зеи на формирование подпорных уровней в узле слияния потоков. Линии аппроксимации располагаются почти параллельно друг другу на расстоянии 118 см по оси абсцисс. Имеено эта величина характеризует уменьшение подпорных уровней воды в узле слияния в результате строительства Зейского водохранилища, и она близко совпадает с аналогичной характеристикой, приведенной в работе (Ким, 1999).

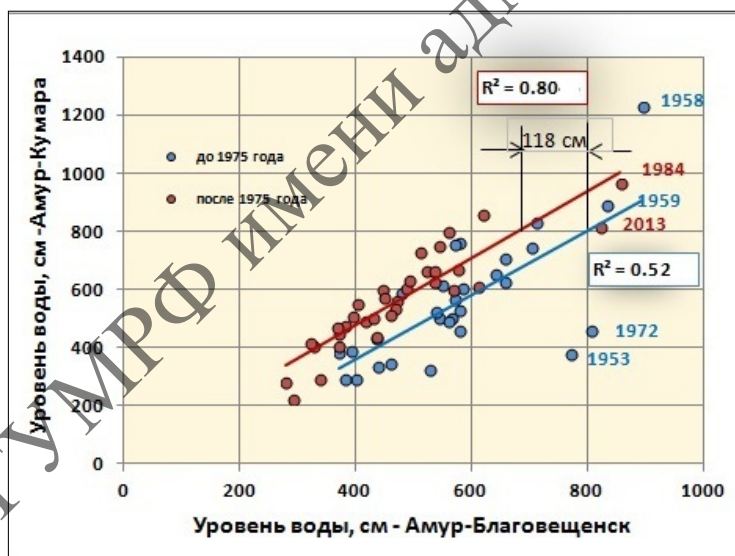


Рисунок 10 - График связи уровней воды по в/п Амур-Кумара и Амур-Благовещенск до и после ввода в строй Зейской ГЭС

Таким образом, выполненный анализ позволил рассмотреть вопрос о подпорных явлениях в узле слияния рек Амур и Зея, используя только лишь стандартные данные гидрометслужбы за период с 1948 по 2013 годы. Схема образования подпорных уровней у г. Благовещенка за счет существенного превышения расходов воды одной реки над другой была подтверждена при

рассмотрении графика связи ежегодных максимальных дождевых уровней воды по в/п Амур-Кумара и Амур-Благовещенск. Систематизация точек графика по параметрам соотношения водности (К) и перепада уровней воды (ΔH) обеих рек у г. Благовещенска позволила выявить устойчивые зависимости $H_{\text{Амур-Кумара}} = f(H_{\text{Амур-Благовещенск}}; K)$ и $H_{\text{Амур-Кумара}} = f(H_{\text{Амур-Благовещенск}}; \Delta H)$, достаточно высокий коэффициент аппроксимации имеет также зависимость $K = f(\Delta H)$. Графически подтверждена величина снижения максимальных дождевых паводков у г. Благовещенска за счет регулирования стока Зеи водохранилищем Зейской ГЭС.

Вопрос о влиянии стоительства берегоукрепляющих сооружений в районе городов Благовещенска и Хейхе на уровенный режим рек в узле слияния требует привлечения дополнительных данных по морфометрии как с российской, так и с китайской стороны.

Список литературы

Ким В.И. Влияние Зейского водохранилища на водный режим р. Амур // Амур на рубеже веков. Ресурсы, проблемы, перспективы. Материалы междунар. науч. конф. Хабаровск, 21-23 апреля 1999. Хабаровск, 1999. Ч.И.С. 90-91.

Ким В.И. Влияние антропогенных факторов на гидрологический режим Нижнего Амура. // Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. геогр. наук. Хабаровск, 2005.

ⁱ FEATURES OF THE AMUR AND ZEYA LEVEL REGIME FORMATION NEAR THE CITY OF BLAGOVESHCHENSK DURING FLOODS (*V.A. Ivanov*)

Considered are the features of level regime at the confluence of the Amur and Zeya rivers during rainfall floods based on analysis of routine stage and discharge gauge measurements

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ НА РЕКЕ ЗЕЯ С УЧЕТОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЗЕЙСКИМ ВОДОХРАНИЛИЩЕМ

Грек Е.А., Владимирова Т.И.

ФГБУ «ГГИ», Санкт-Петербург, elena_greck@mail.ru

В статье рассматриваются особенности формирования высоких паводков в бассейне р. Зея, а также исследуется влияние Зейского водохранилища на максимальные расходы воды в многоводные 2007 и 2013 годы

Река Зея является одним из крупнейших притоков Амура. Её длина 1242 км, площадь водосбора 233 тыс. км². Истоки Зеи берут свое начало в горных районах. Основные водоразделы приурочены к горным хребтам, имеющим, как правило, северо-восточное направление. Основные притоки Зеи справа – Ток, Мульмуга, Брянта, Унаха, Гиллой, Уркан; слева – Купури, Арги, Деп, Селемджа. Долины рек в пределах горных участков узкие, глубокие. По мере удаления от истоков, с понижением местности, склоны долин уменьшаются, а в пределах равнинной местности долины и поймы расширяются.

Река Зея с 1975 г. зарегулирована водохранилищем Зейской ГЭС, в результате чего нарушен естественный режим Зеи ниже плотины, а также Амура в зоне влияния Зейского водохранилища.

По условиям водного режима реки в бассейне Зеи относятся к дальневосточному типу. Его основной чертой является преобладание дождевого стока в теплое время года, когда наблюдаются значительные колебания стока, что придает форме гидрографа большинства водотоков гребенчатый характер. В течение теплого периода (июнь–сентябрь) на реках бассейна в среднем наблюдается 5–6 паводков. Вызываемые длительными и интенсивными дождями летние паводки нередко следуют друг за другом, обуславливая на реках периоды повышенной водности.

Другой фазой водного режима рек в бассейне Зеи является снеговое половодье. Зимой осадков в виде снега выпадает мало (15-30% годовой суммы), снегозапасы на речных водосборах к моменту снеготаяния бывают небольшими, половодье обычно бывает невысоким и непродолжительным по сравнению с паводками, поэтому в годовом стоке имеет второстепенное значение. Весеннее половодье длится в среднем 30–40 дней. Интенсивность подъема уровней во время половодья меньше, чем в периоды прохождения паводков. Спад половодья является более продолжительным. Объем стока весеннего половодья в среднем составляет около 15% годового стока. Совпадение сроков интенсивного таяния снега и выпадения значительного количества осадков во время весенних дождей может служить причиной формирования высоких половодий и вызвать сильные наводнения.

На первом этапе работы был выполнен анализ условий формирования высоких паводков в естественных условиях (до создания водохранилища) для верхней части бассейна (до створа р.

Зея-с. Заречная Слобода). Для этой цели использовались данные о ежедневных расходах воды за 1956, 1959, 1964, 1972 годы в створах р. Зея – устье Купури и р. Зея - с. Заречная Слобода¹, а также на основных притоках Зеи выше створа Зейской ГЭС (Арги, Ток, Мульмуга, Брянта, Унаха, Гиллой).

На рисунке 1, в качестве примера, приведены ежедневные гидрографы стока по всем рекам рассматриваемой части водосбора за 1956 г.(а) и 1959 г.(б). Отметим, что суммарная площадь водосборов притоков р. Зея до створов гидрологических постов составляет 63% от площади в замыкающем створе (с. Заречная Слобода). Из этих данных следует, что в формировании максимальных расходов воды в этом створе основная доля принадлежит р. Зея – устье р. Купури (20-40%), р. Гиллой (20-30%) и р. Брянта (15%).

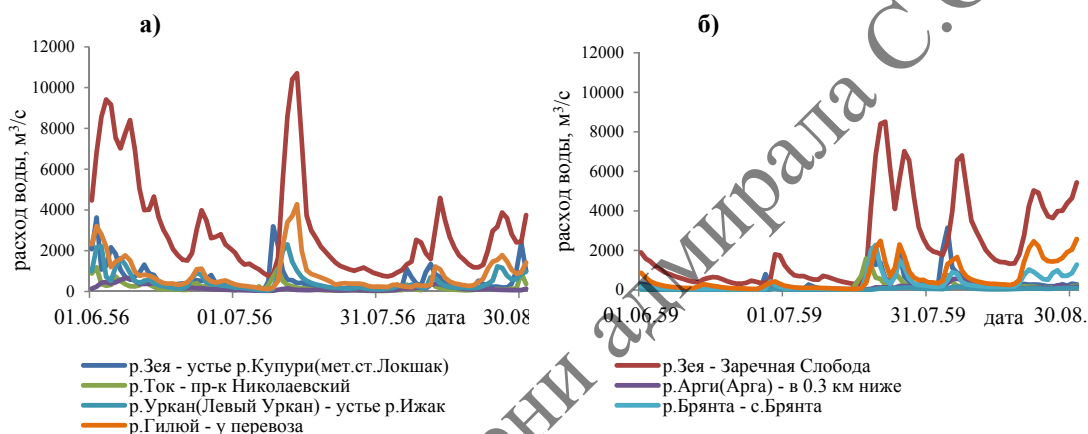


Рисунок 1 - Гидрографы стока по постам на р. Зея за 1956 (а) и 1959 (б) годы

На рисунке 2 приведены гидрографы стока р. Зея в створе с. Заречная Слобода и гидрографы суммарного стока вышеперечисленных рек за 1956 (а), 1959 (б), 1964 (в) и 1972 (г) годы. Суммарный гидрограф можем рассматривать как показатель поступления воды в русло р. Зея на участке от устья р. Купури до с. Заречная Слобода. Как видно из этих графиков, колебания стока происходит синхронно со сдвижкой во времени, соответствующей среднему времени добегания от верхних до замыкающих створов.

Соответственные расходы воды суммарных гидрографов меньше, чем расходы воды р. Зея – с. Заречная Слобода, что вполне естественно, так как они характеризуют сток только с части водосбора. Оценка ежедневных расходов воды с территории, не охваченной данными

¹ Данные по створу с. Заречная Слобода объединены с данными по посту р. Зея – уроч. Зейские Ворота ввиду переноса поста в 1967 году в связи со строительством Зейской ГЭС. Площади водосборов в этих створах близки (соответственно 82400 и 82500 км²), на участке между ними притоки отсутствуют.

гидрометрических наблюдений, представляет собой сложную самостоятельную задачу и в настоящей статье не рассматривается.

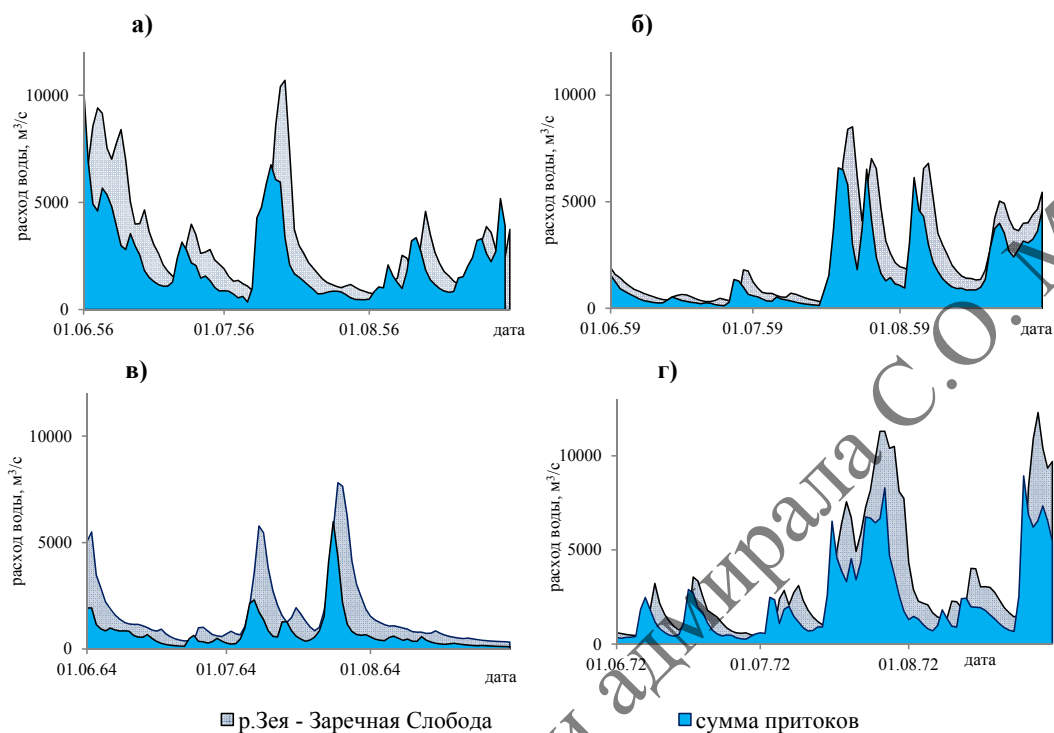


Рисунок 2 - Гидрографы стока по посту р. Зея в створе с. Заречная Слобода и суммарного притока за 1956 (а), 1959 (б), 1964 (в) и 1972 (г) годы

В результате анализа данных по паводкам за указанные выше многолетние годы была установлена статистическая зависимость максимальных расходов воды р. Зея в створе у с. Заречная Слобода от суммы соответствующих расходов воды расположенных выше рек (рисунок 3).

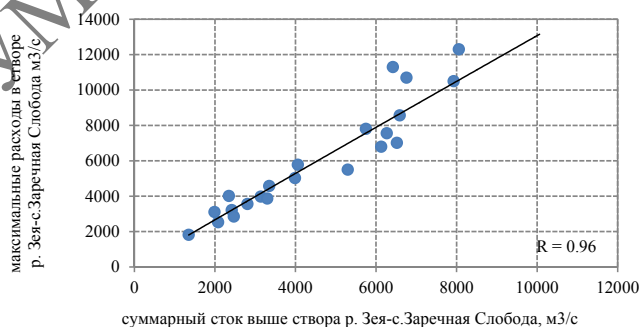


Рисунок 3 – Зависимость максимальных расходов воды р. Зея в створе у с. Заречная Слобода от соответствующих расходов воды суммарного стока выше расположенных рек за отдельные паводки за 1956, 1959, 1964 и 1972 годы

Эта зависимость использовалась для количественной оценки влияния Зейского водохранилища на максимальные расходы воды в 2007 и 2013 годах, когда в бассейне реки прошли экстремальные паводки. За эти годы были рассчитаны суммарные гидрографы притока к водохранилищу по тем же рекам и гидрологическим постам, что и при описанных выше расчетах, и далее по зависимости, представленной на рисунке 3, восстановлены естественные (для условий отсутствия регулирования стока) расходы воды р. Зeya у с. Заречная Слобода. На рисунке 4 приведены рассчитанные и наблюдаемые (по данным сбросов в нижний бьеф Зейского водохранилища) гидрографы стока за 2007 (а) и 2013 (б) годы.

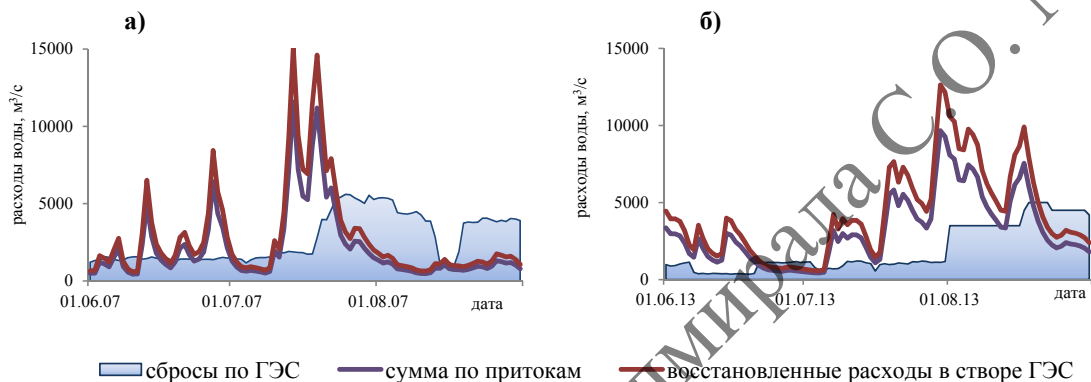


Рисунок 4 - Гидрографы суммарного притока, восстановленные расходы воды и сбросы с ГЭС за 2007 (а) и 2013 (б) годы

В соответствии с выполненными расчетами следует, что в результате регулирования Зейским водохранилищем в 2007 году максимальный расход воды в створе р. Зeya - с. Заречная Слобода был снижен на 63%. В естественных условиях максимальный расход воды в этом створе составил бы 15100 м³/с. В 2013 г. в результате продолжительных дождей Зейское водохранилище аккумулировало огромный объем воды, что привело к срезке максимального расхода воды на 60%. В естественных условиях максимальный расход воды в этом створе составил бы 12600 м³/с.

На втором этапе работы аналогичные исследования были выполнены для участка р. Зeya между створами у с. Заречная Слобода и у с. Белогорье (замыкающим). Был выполнен анализ условий формирования высоких паводков в естественных условиях для нижней части бассейна. Для этой цели использовались данные о ежедневных расходах воды за 1956, 1959, 1964, 1972 годы в створах р. Зeya - с. Заречная Слобода и р. Зeya - с. Белогорье, а также на основных притоках Зей ниже створа Зейской ГЭС (Правый Уркан, Дeп, Селемджа, Большая Пера, Томь).

На рисунке 5 приведены гидрографы стока по всем рекам рассматриваемой части водосбора за 1959 (а) и 1972 (б) годы. Отметим, что суммарная площадь водосборов притоков р. Зeya (включая и водосбор р. Зeya до с. Заречная Слобода) на рассматриваемом участке составляет 84% от площади в замыкающем створе (с. Белогорье). Из анализа данных следует, что в формировании

максимальных расходов воды в этом створе основная доля принадлежит стоку, поступающему с верхней части бассейна (до с. Заречная Слобода) и по р. Селемджа (до 45%).

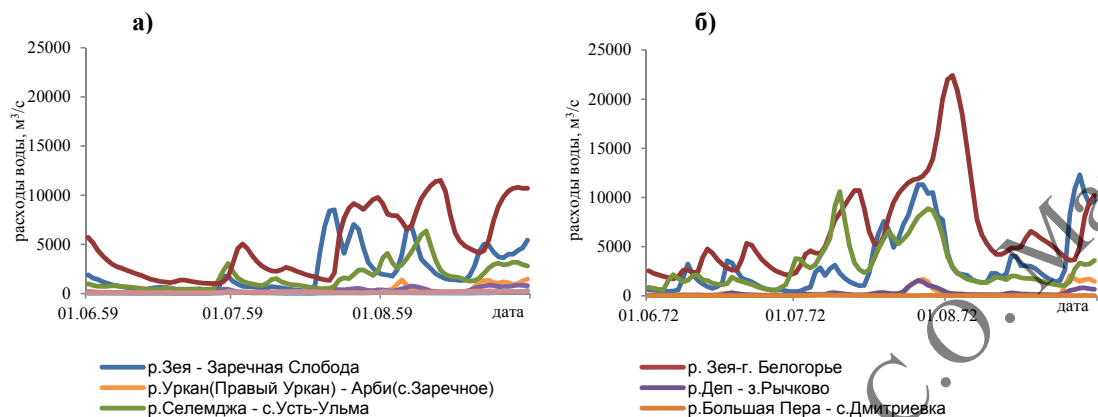


Рисунок 5 - Гидрографы стока по постам на р. Зeya и ее притоках ниже Зейской ГЭС за 1959 (а) и 1972 (б) годы

На рисунке б приведены гидрографы стока р. Зeya в створе у с. Белогорье и суммарного притока к створу за 1956 (а), 1959 (б), 1964 (в) и 1972 (г) годы. Как видно из этих графиков, колебания стока происходят синхронно со сдвижкой во времени, соответствующей времени добегания от верхних до замыкающего створа.

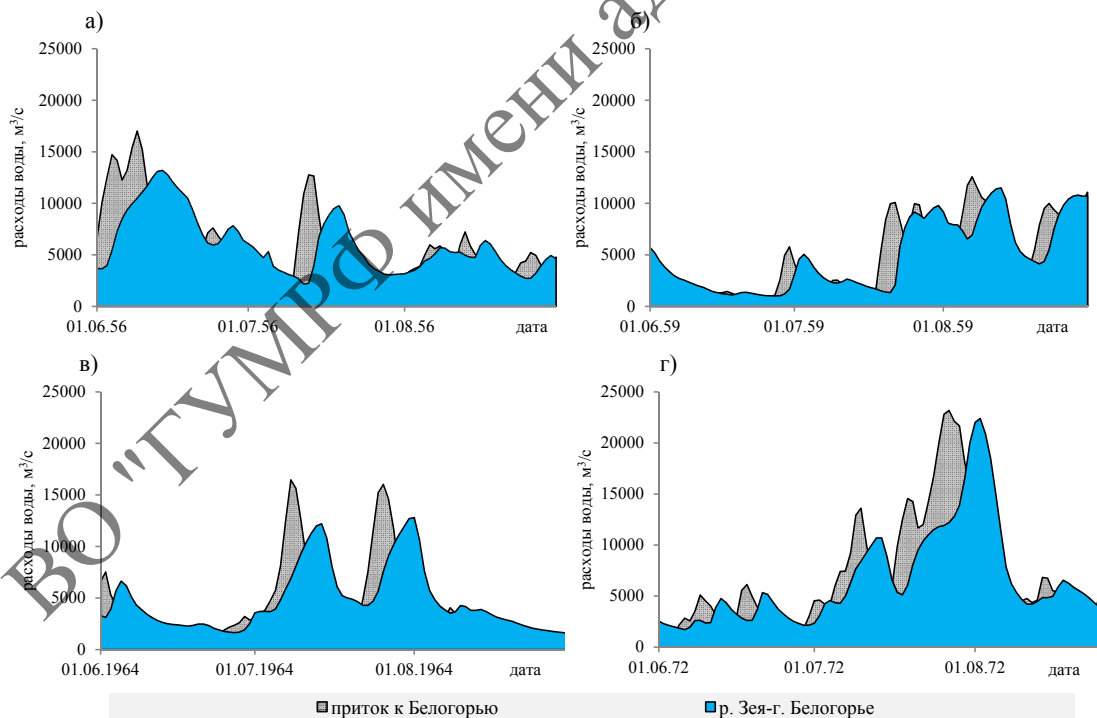


Рисунок 6 - Гидрографы стока в створе р. Зeya – с. Белогорье и суммарного притока к створу за 1956 (а), 1959 (б), 1964 (в) и 1972 (г) годы

Максимальные расходы воды суммарного гидрографа выше, чем в створе у с. Белогорье, что можно объяснить распластыванием паводка на рассматриваемом участке реки.

В результате анализа данных по паводкам за рассмотренные многогодные годы была установлена статистическая зависимость максимальных расходов воды р. Зeya в створе у с. Белогорье от суммы соответствующих расходов воды расположенных выше рек (рисунок 7).

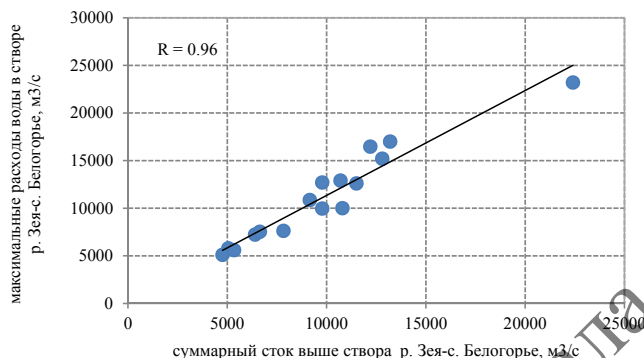


Рисунок 7 – Зависимость максимальных расходов воды р. Зeya в створе у с. Белогорье от суммы соответствующих расходов воды расположенных выше рек за отдельные паводки в 1956, 1959, 1964 и 1972 годах

Эта зависимость использовалась для количественной оценки влияния Зейского водохранилища на максимальные расходы воды в 2007 и 2013 годах, когда в бассейне реки прошли экстремальные паводки. За эти годы были рассчитаны суммарные гидрографы притока к створу р. Зeya – с. Белогорье по тем же рекам и гидрологическим постам, что и при выполненных выше расчетах, и далее по зависимости, представленной на рисунке 7, восстановлены естественные (при отсутствии регулирования стока) расходы воды р. Зeya у с. Белогорье. На рисунке 8 приведены рассчитанные и наблюдаемые на посту р. Зeya-с. Белогорье гидрографы стока за 2007 (а) и 2013 (б) годы.

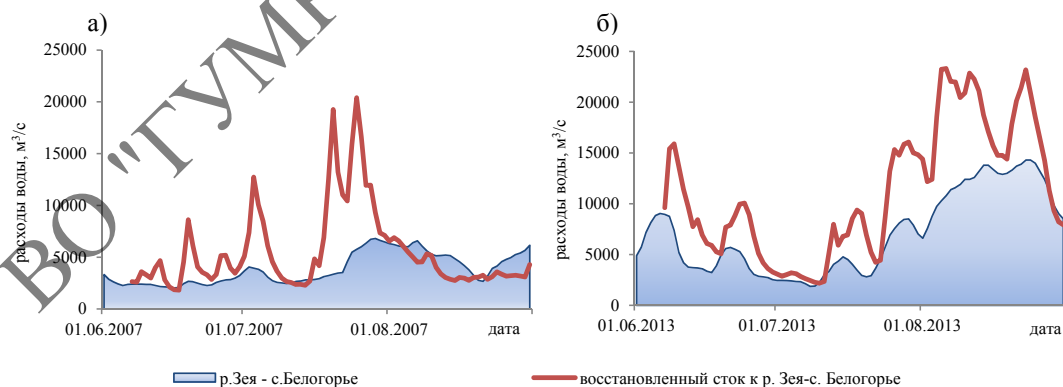


Рисунок 8 - Гидрографы восстановленного и наблюдаемого стока в створе р. Зeya - с. Белогорье за 2007 (а) и 2013 (б) годы

В соответствии с выполненными расчетами максимальный расход воды в створе р. Зeya - с. Белогорье в 2007 году мог составить 20400 м³/с, а в результате регулирования Зейским водохранилищем он был снижен на 67%.

Катастрофический паводок 2013 года сопоставим с 1972 годом по максимальному расходу и значительно превысил его по объему. В результате регулирования Зейское водохранилище аккумулировало около 40% объема паводочных вод, и максимальный суточный расход составил 14300 м³/с, тогда как в естественных условиях (без регулирования) максимальный суточный расход в створе р. Зeya - с. Белогорье мог составить 23300 м³/с, что превышает максимальный расход 1972 года (22500 м³/с) на 4% (рисунок 9).

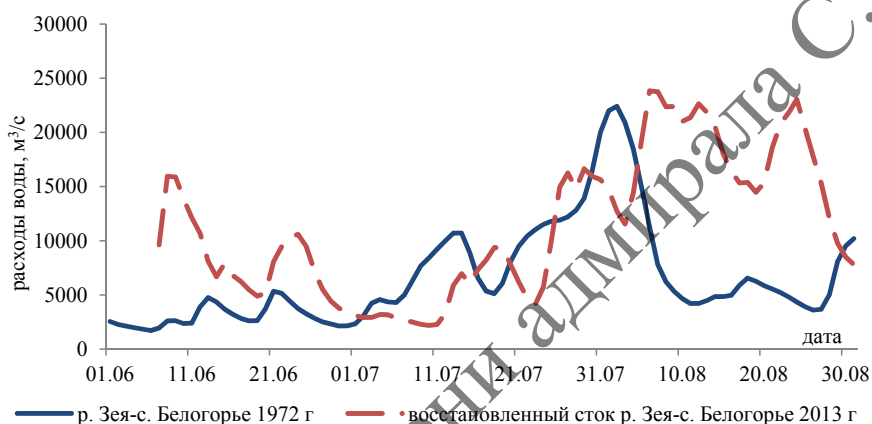


Рисунок 9 - Гидрографы восстановленного стока в створе р. Зeya - с. Белогорье в 2013 г. и наблюдаемого стока в этом створе в 1972 г.

Результаты выполненной работы свидетельствуют о значительной противопаводковой роли Зейского водохранилища в бассейне Амура.

i

ⁱ FEATURES OF FLOOD FORMATION IN THE ZEYA RIVER BASIN WITH ACCOUNT OF THE ZEYA RESERVOIR REGULATING EFFECT (E.A. Grek, T.I. Vladimirova)

The paper considers features of major floods in the Zeya River basin and the influence of the Zeya Reservoir on maximum discharges during wet years 2007 and 2013

ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РУСЕЛ РЕКИ АМУР И ЕЁ ПРИТОКОВ ПО ДАННЫМ ОБ ИЗМЕРЕННЫХ РАСХОДАХ ВОДЫ В ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ СТВОРАХ И ИХ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ЗА ПРЕДЕЛЫ ДИАПАЗОНОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Т. И. Яковлева, О. Е. Кучеренко

ФГБУ «ГГИ», Санкт-Петербург. tiya-ilichovo@yandex.ru

В статье приводятся результаты анализа данных многолетних наблюдений на гидрологических постах в бассейне р. Амур, а также полученных по следам паводка 2013 г., на основе которых выполнена оценка пропускной способности русел при прохождении катастрофического паводка 2013 г. Оценка пропускной способности русел и поймы за пределами диапазона уровней воды, освещенного данными об измерениях расходов, проведена на основе методик, разработанных в ГГИ. На основе уточненных зависимостей и измеренных расходов воды за период паводка 2013 г были построены гидрографы стока в основных створах р. Амур и ее притоков и определены основные характеристики паводка – наивысшие уровни и максимальные расходы воды паводка, средние за период паводка расходы воды, его продолжительность и объем

Для анализа условий формирования катастрофического паводка 2013 года и расчёта ежедневных расходов воды в створах основных гидрологических постов на р. Амур и её притоках были использованы все имеющиеся данные наблюдений на гидрологической сети, включающие полную совокупность данных наблюдений за многолетний период всех действующих гидрологических постов, а также всех стоковых постов, на которых наблюдения велись в отдельные периоды прошлого столетия. При выполнении анализа были использованы также данные гидрологических наблюдений в бассейне реки Сунгари на территории КНР и расходы воды, измеренные в рамках совместного Российско-Китайского мониторинга трансграничных водных объектов.

В настоящее время непосредственно на реке Амур ведутся наблюдения за гидрологическими характеристиками на 25 гидрологических постах (ГП). Из них наблюдения за стоком воды проводятся только на трёх – г. Хабаровск (г. ст.), г. Комсомольск, с. Богородское. С конца 60-х годов прошлого столетия не ведутся наблюдения за стоком воды на всём трансграничном участке рек Аргунь, Амур и Уссури длиной более 3 тыс. км.

В 50 - 60-е годы прошлого столетия наблюдения за стоком воды проводились ещё на шести гидрологических постах на Амуре, на трёх постах на р. Аргунь, а также в нижнем течении р. Уссури на ГП с. Шереметьево (таблица 1).

С 2007 г. в рамках совместного проекта по рациональному использованию и охране трансграничных водных объектов проводится совместный мониторинг качества воды в некоторых створах Амура, Аргуни и Уссури, включающий измерения расходов воды. С 2014 года в рамках Российско-Китайского сотрудничества по осуществлению мероприятий по мониторингу трансграничных водных объектов выполняются измерения расходов воды на шести постах на Амуре и на одном посту на р. Уссури (таблица 2).

Таблица 1 – Список гидрологических постов, на которых велись наблюдения за стоком воды в различные периоды 20-го столетия

Река – пост	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Период наблюдений	Период наблюдений за стоком
р. Аргунь – с. Старо-Цурухайтуй	666	64500	1942-1961	1958-1960
р. Аргунь – с. Ново-Цурухайтуй (Приаргунск)	603	96000	с 1904 г.	1958-1959
р. Аргунь – с. Олоча	425	106000	с 1899 г.	1958-1971
р. Аргунь – с. Урюпино	145	145000	с 1934 г.	1958-1963
р. Амур – с. Джалинда	2618	406000	с 1912 г.	1958
р. Амур – с. Черняево	2388	440000	с 1984 г.	1957-1961
р. Амур – с. Кумара	2168	478000	с 1986 г.	1962-1968
р. Амур – с. Гродеково	1921	726000	с 1912 г.	1960-1968
р. Амур – с. Помпеевка	1448	862000	1934-1984	1958-1963
р. Амур – с. Воскресеновка	1166	410000	1958-1964	1959-1960
р. Усури – с. Шереметьево	147	156000	с 1957 г.	1957-1967

Таблица 2 – Список гидрологических постов с измерением расходов воды в рамках Российско-Китайского мониторинга

№	Река	Пост	Адрес	Широта, град.	Долгота, град.
1	Амур	Черняево	Амурская область, Магдагачинский район	52,77	125,98
2	Амур	Благовещенск	Амурская область, Благовещенский район	50,27	127,45
3	Амур	Гродеково	Амурская область, Благовещенский район	50,07	127,52
4	Амур	Пашково	ЕАО, Облученский район	48,87	130,65
5	Амур	Ленинское	ЕАО, Ленинский район	47,95	132,82
6	Амурская протока	Казакевичево	Хабаровский край, Хабаровский район	48,22	134,67
7	Усури	Шереметьево	Хабаровский край, Вяземский район	47,35	134,25

Кроме того, в 2014 г. специалистами Дальневосточного УГМС выполнено обследование участков рек по следам паводка 2013 года. Обследование включало полевые работы на следующих участках рек: р. Амур – с. Черняево, р. Амур – г. Благовещенск, р. Зея – г. Благовещенск, р. Амур – с. Пашково, с. Ленинское, с. Н.Спаское (Владимировка) и р. Усури – п. Казакевичево. Работы выполнялись в соответствии с требованиями методических указаний (МУ № 92..., 1979). При этом проводилось обследование русла реки с промерами и нивелировкой поперечников до горизонта высоких вод (ГВВ) 2013 г., нивелировкой продольного уклона водной поверхности, а также выявленных на местности следов наивысших уровней воды катастрофического паводка 2013 года.

В ходе обследования уточнялись характеристики пропускной способности русел и прилегающих к ним пойменных участков, по которым перемещался катастрофический паводок 2013 г. Были уточнены многие детали и выявлены особенности прохождения паводка в районах, подвергшихся наибольшему затоплению и разрушениям (Отчёт..., 2014).

Полученные материалы были использованы для анализа изменения пропускной способности русел рек на указанных участках, определения зон затопления и уточнения характеристик катастрофического паводка 2013 г.

По данным наблюдений за стоком воды, выполнявшимся в 50 - 60-е годы прошлого столетия на гидрологических постах, приведенных в таблице 1, была выполнена приближенная оценка пропускной способности русла в соответствующих гидрометрических створах. Для получения зависимостей расходов от уровней воды (кривых расходов) были использованы все имеющиеся сведения об измеренных расходах воды.

Уравнения (УР) зависимостей расходов (Q) от уровней воды (H) Q(H) получены методом кусочно-полиномиальной регрессии [3] в виде:

$$Q = a_0 + a_1 * H + a_2 * H^2 + a_3 * H^3 + a_4 * H^4, \quad (1)$$

Оценка коэффициентов, аппроксимирующих Q(H) УР выполнена методом наименьших квадратов. При этом расходы воды выражены в м³/с, а уровни воды (для удобства представления коэффициентов УР) – в метрах (м) над нулём поста.

Параметры уравнений, аппроксимирующих зависимости расходов от уровней воды для гидрологических постов на реках Аргунь, Амур и Уссури, приведены в таблице 3.

Уравнения Q(H) получены для диапазонов уровней, освещённых измерениями расходов воды и приведённых в графе 3 таблицы 3. Известно, что для оценки пропускной способности русел за пределами диапазона измерения расходов воды требуется их экстраполяция до наивысших наблюдаемых уровней. В графе 4 даны значения наивысших уровней воды, наблюдаемых в период паводка 2013 г. В соответствии с данными таблицы 3 экстраполяция расходов воды за пределы диапазонов их измерения выполнена для гидрологических постов на р. Амур – с. Кумара и с. Гродеково.

При выполнении экстраполяции расходов воды в дополнение к широко распространённому способу экстраполяции, основанному на использовании известного уравнения Шези, в отделе гидрометрии ГГИ под руководством проф. И. Ф. Карасёва были разработаны ещё несколько расчётных приёмов экстраполяции. Их отличие от традиционного (по уравнению Шези) заключается в том, что в них не используются напрямую такие трудноопределяемые характеристики пропускной способности русла как уклон и шероховатость. При этом оценка параметров, входящих в расчётные схемы экстраполяции, выполняется непосредственно по данным совокупностей измеренных расходов воды прошлых лет.

Таблица 3 – Параметры уравнений зависимостей расходов Q (м³/с) от уровней воды H (м над нулём поста)

Река – пост	Период наблюдений	Диапазон уровней воды, м над нулём поста	Наивысший уровень 2013 г., м над нулём поста	Коэффициенты УР				
				a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
1	2	3	4	5	6	7	8	9
р. Аргунь – с. Олоча	1958-1971	-0,5 - 0,9	7,19	29,8	52,816	11,253	12,515	
		0,9 1- 2,10		23,5	-2,8459	97,796	-5,6818	
		2,11 - 7,80		15,3	107,33	-14,808	0,9112	0,0327
р. Аргунь – с. Урюпино	1958-1963	1,5 - 7,61	8,37	266	-311,09	204,09	-11,277	
р. Амур – с. Джалинда	1958	1,67 - 3,0	6,05	633	-32,142	228,15		
	1958	3,01 - 11,36		1630	-462,75	281,7603	-7,1401	
р. Амур – с. Черняево	1957	-0,13 - 0,5	6,82	36,8	193,89	1282,3	-534,05	
	1957-1961	0,51 - 11,84		1,31	704,865	134,9351	0,8824	-0,273
р. Амур – с. Кумара	1962-1968	0,47 - 6,54	8,17	510	261,17	274,73	-16,342	
	экстраполяция	6,55 - 8,17		-19500	13664	-2412,7	152,8	
р. Амур – с. Гродеково	1964-1968	1,6 - 2,7	11,44	273	963,51			
	1960-1968	2,71 - 10,38		1220	220,101	137,46	3,1148	
	экстраполяция	10,39 - 11,44		25100	-3903,5	345,63		
р. Амур – с. Помпеевка	1958-1963	2,67 - 14,68		2090	532,52	87,942		
р. Амур – с. Воскресеновка	1959-1960	3,58 - 6,00		10400	-5327,6	1228,8	-35,188	-2,767
		6,01 - 10,35		-73700	31462	-3988,32	185,22	
р. Усури – с. Шереметьево	1957-1967	3,86 - 8,52	8,53	-287	211,1	96,536		

При выборе схем расчёта был выполнен всесторонний анализ данных многолетних наблюдений на изучаемых гидрологических постах. Для оценки морфометрических параметров русел и поймы были использованы совокупности данных ИПВ за многолетний период и материалы отчёта ФГБУ «Дальневосточное УГМС» (Отчёт..., 2014).

Максимальные расходы воды определялись отдельно для русла и прилегающих участков поймы. Наибольший расход воды в русле вычислялся четырьмя способами – по уравнению Шези - Маннинга, с использованием системно - параметрической модели (СПМ) (Карасёв..., 2006), методом редукции по геометрическим элементам потока на основе инварианта (М) К. В. Гришанина (Гришанин..., 1979), а также соотношения, полученного И. Ф. Карасёвым на основе закономерностей перемещения паводка в форме кинематической волны (Карасёв..., 1980; Карасёв..., 2012).

В первом случае средняя скорость течения оценивалась по формуле:

$$V = C\sqrt{hI}, \quad (2)$$

где C – коэффициент Шези, h – средняя глубина, I – уклон водной поверхности на участке поста.

Вторая зависимость, применявшаяся для оценки максимальных расходов воды, вытекает из системно-морфометрической модели гидрометрического учёта стока, согласно которой средняя скорость течения потока определяется выражением:

$$V = K_c \left(\frac{gh}{\bar{b}} \right)^{0.5} \quad \text{или} \quad V = \frac{I^{0.25}}{\eta^2} \left(\frac{gh}{\bar{b}} \right)^{0.5}, \quad (3)$$

$$\eta = \frac{h}{Q^{0.5}} \left(\frac{gBI_0}{\lambda} \right)^{0.25} = idem., \quad (4)$$

где η – инвариант, предложенный И.Ф.Карасёвым (Карасёв..., 2006), I_0 – продольный уклон дна, λ – коэффициент гидравлических сопротивлений: $\lambda = 2g/C^2$, g – ускорение свободного падения, \bar{b} – относительная ширина русла, равная B/h .

Третья (5) используемая нами зависимость получена на основе редукции расходов воды по геометрическим характеристикам потока и вытекает из известного уравнения (6), полученного К. В. Гришаниным (Гришанин..., 1979). Она действительна для динамически равновесных русел в пойменных бровках.

$$Q_3 = Q_0 \left(\frac{h_3}{h_0} \right)^2 \left(\frac{B_3}{B_0} \right)^{0.5}, \quad (5)$$

где h_0 и h_3 , B_0 и B_3 – глубины и ширины потока, соответствующие расходам, известному по данным измерений Q_0 и экстраполируемому максимальному значению Q_3 .

$$Q = \frac{h^2}{M^2} (gB)^{0.5}, \quad (6)$$

Четвёртое расчётное соотношение получено И.Ф.Карасёвым непосредственно из уравнения (5) с учётом предпосылок кинематической волны (Карасёв..., 1980; Карасёв..., 2012) и обладает более широкой вариативностью параметров по сравнению с (5):

$$Q_3 = Q_0 \left(\frac{\omega_3}{\omega_0} \right)^s \quad (7)$$

где ω_0 и ω_3 – поперечные сечения потока, соответствующие расходам Q_0 и Q_3 .

Для определения показателя степени s для зоны максимальных уровней с учётом соотношения скоростей $\frac{v_3}{v_0} = \left(\frac{h_3}{h_0} \right)^{2/3}$ Карасёвым И. Ф. получено уравнение:

$$s = \left(\frac{h_3}{h_0} \right)^{2/3} \left(1 + \frac{2}{3} \varphi \right) \quad (8)$$

где v_3 – экстраполируемое значение скорости, $\varphi = \frac{h}{h_{\max}}$ – параметр формы поперечного сечения русла.

Перед тем, как использовать приведённые выше зависимости для ГП р. Амур – с. Кумара и р. Амур – с. Гродеково, где требовалась экстраполяция расходов воды до наивысших наблюдаемых в 2013 г. уровней, они были апробированы по данным ИРВ на постах р. Амур – г. Хабаровск (г. ст.) и р. Амур – г. Комсомольск, на которых в 2013 г. удалось выполнить инструментальные измерения максимальных расходов воды с помощью акустического доплеровского профилографа.

Для ГП Хабаровск (г. ст.) расчёты по всем четырём зависимостям (см. таблицу 3) выполнены в предположении, что последний расход воды был измерен при уровне 1208 см над «0» поста, наблюдаемом при прохождении максимального расхода воды 37000 м³/с в 1959 г.

Ключевой параметр СПМ (3) в виде комплекса $K_c = \frac{I^{0.25}}{\eta^2}$ так же, как и коэффициент Шези C формулы (2), рассчитывался нами по совокупностям наиболее надёжных данных об измеренных расходах воды прошлых лет.

Параметр K_c вычислялся по данным наблюдений по формуле:

$$K_c = \frac{V_{cp} \tilde{b}^{0.5}}{(gh)^{0.5}}. \quad (9)$$

Здесь V_{cp} – средняя скорость потока, при измерении расхода воды.

По рассчитанным данным строились зависимости параметра K_c от уровня воды: $K_c = f(H)$ (рисунок 1). Многочисленные исследования на различных реках России показали, что в верхнем диапазоне уровней воды значение K_c остается близким к постоянному, поэтому для расчёта средней скорости потока при прохождении максимального расхода воды можно использовать значение K_c , снятое с графика в диапазоне высоких уровней воды. Средняя скорость потока для расчёта максимального расхода воды в бровках русла вычисляется по формуле (10):

$$V_{cp} = K_c \left(\frac{gh_s}{\tilde{b}_s} \right)^{0.5} \quad (10)$$

Здесь V_{cp} – рассчитанная средняя скорость потока для наивысшего наблюдаемого уровня воды.

Коэффициент формулы Шези также оценивался по данным наблюдений прошлых лет по формуле:

$$C = \frac{Q}{\omega \sqrt{hI}}. \quad (11)$$

По рассчитанным значениям C строились зависимости коэффициента Шези C от уровня воды: $C = f(H)$ (рисунок 2). Оценивалось значение параметра C в верхнем диапазоне уровня воды и по его значению вычислялась средняя скорость потока в бровках русла по формуле (2).

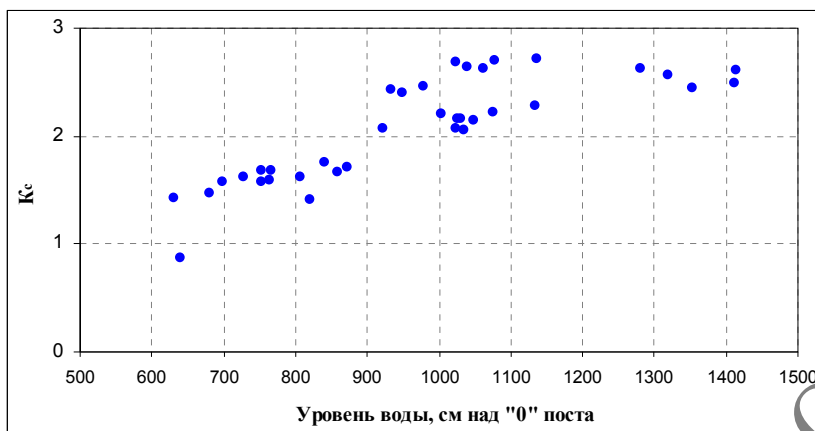


Рисунок 1 – Зависимость параметра K_c от уровня воды, ГП р. Амур – г. Хабаровск, г/ст.

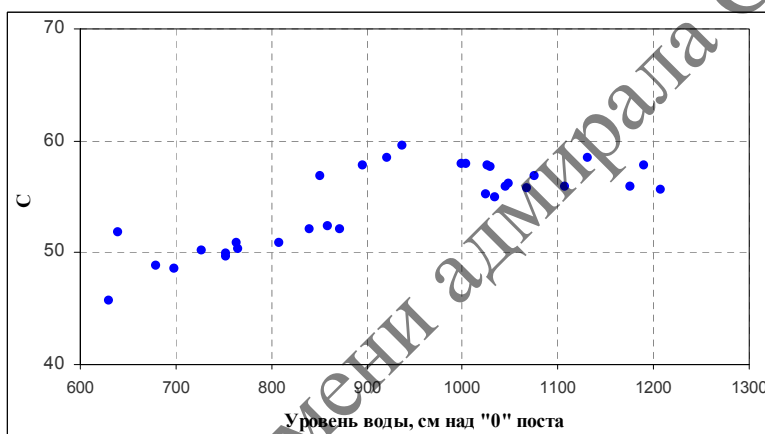


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента Шези C от уровня воды, ГП р. Амур – г. Хабаровск, г/ст.

Для ГП г. Хабаровск, г/ст. использовались все четыре схемы расчёта (таблица 4). В последней графе таблицы даны отклонения расчётных значений расходов воды (Q_3) от фактически наблюдаемого (Q_f). Лучшие результаты экстраполяции получены при использовании параметра K_c системно-параметрической модели и соотношения, полученного И. Ф. Карасёвым из уравнения кинематической волны, худшие (отклонение от фактического более 24%) – при использовании уравнения Шези. Для ГП г. Комсомольск из-за отсутствия данных об измеренных уклонах водной поверхности не использовалось уравнение Шези. По остальным трём схемам расчёта получены близкие результаты экстраполяции.

Проверенные по постам Хабаровск и Комсомольск схемы расчёта были использованы для экстраполяции зависимостей за пределы диапазонов измерения для ГП р. Амур – с. Кумара и р. Амур – с. Гродеково (таблица 5).

Для обоих гидрологических постов близкие результаты экстраполяции получены при использовании параметра K_c системно-параметрической модели и соотношения, полученного И. Ф. Карасёвым из уравнения кинематической волны. Поэтому было принято решение для оценки максимальных расходов воды 2013 г. в этих створах принять средние значения, полученные двумя указанными выше методами. Расходы воды, прошедшие по пойме, для всех вариантов расчёта вычислены по уравнению Шези. Коэффициент шероховатости поймы (n) для обоих створов принят равным 0,10, что соответствует её описанию по результатам обследования (Отчёт..., 2014). В ходе полевого обследования выявлено, что на участках гидрологических постов пойма занята кустарниками средней и большой густоты, местами заболоченная. Значения уклонов на пойме приняты по данным наблюдений прошлых лет: для ГП с. Кумара $I_n = 0,24\%$, для ГП с. Гродеково $I_n = 0,10\%$, Суммарный рассчитанный максимальный расход для ГП с. Кумара составил 14400 м³/с, для ГП с. Гродеково – 25600 м³/с. С учётом результатов экстраполяции получены уравнения аппроксимирующих зависимостей в диапазонах экстраполяции расходов воды (см. таблицу 3). Ежедневные значения расходов воды по экстраполяции вычислены для ГП р. Амур – с. Кумара в период со 2 по 23 августа 1984 г. для уровней воды выше 654 см над нулём поста; для ГП р. Амур – с. Гродеково – в период с 8 по 27 августа 1984 г. для уровней воды выше 1038 см над нулём поста.

На рисунках 3-5 приведены графики аналитических зависимостей расходов от уровней воды для постов р. Амур – с. Черняево и с. Гродеково и для р. Усури – с. Шереметьево, на которых нанесены также точки расходов воды, измеренных в рамках Российско - Китайского мониторинга (РКМ) в 2014 г., а для поста р. Амур – с. Гродеково на график нанесены данные измерений в предшествующие 2007 - 2013 гг.

После анализа полной совокупности данных наблюдений 2013 г. были уточнены параметры зависимости расходов от уровней воды в створе р. Амур – г. Хабаровск, г. ст. (рисунок 6).

Таблица 4 – Вариации экстраполяции максимальных расходов воды 2013 г. для ГП р. Амур – г. Хабаровск, г. ст. и р. Амур – г. Комсомольск

Метод	$H_{\text{высок}}$, см над «0» поста	Q_0 , м ³ /с	W_0 , м ²	h_0 , м	W_3 , м ²	h_3 , м	K_c	I , ‰	C	S	Q_3 , м ³ /с	$Q_{0, \text{ис}}$, м ³ /с	δQ , %
р. Амур – г. Хабаровск, г. ст.													
	1414	37000	26000	9,6	30658	9,87						46000	
по параметру K_c СПМ							2,61				43951		-4,4
по уравнению Шези								0,068	56,0		57275		24,5
редукция по геометрическим элементам											41948		-8,8
по уравнению кинематической волны										1,47	43507		-5,4
р. Амур – г. Комсомольск-на-Амуре													
	911	32800	21700	16,1	24880	18,6						43200	
по параметру K_c							1,14				45060		4,3
редукция по геометрическим элементам											45490		5,3
по уравнению кинематической волны										1,95	42818		0,8

Таблица 5 – Экстраполяция расходов за пределы диапазона их измерения для ГП р. Амур – с. Кумара и р. Амур – с. Гродеково

Метод	$H_{\text{высок}}$, см над «0» поста	Q_0 , м ³ /с	W_0 , м ²	$W_{\text{попик}}$, м ²	D_0 , м	W_3 , м ²	h_3 , м	K_c	I , ‰	C	S	Q_3 , м ³ /с	$Q_{0, \text{ис}}$, м ³ /с	Q_3 , м ³ /с
р. Амур – с. Кумара														
	817	6770	3610	100	5,51	5456	7,79							
по параметру K_c СПМ								2,81				14080	89,0	14170
по уравнению Шези									0,24	52,4		12362	89,0	12450
редукция по геометрическим элементам												16927	89,0	17100
по уравнению кинематической волны											1,85	14500	89,0	14600
р. Амур – с. Гродеково														
	1144	21700	11400	6264	9,8	12131	9,82							
по параметру K_c СПМ								2,07				23780	784	24560
по уравнению Шези									0,14	61,0		26563	784	27350
редукция по геометрическим элементам												22491	784	23280
по уравнению кинематической волны											1,11	24074	784	24760

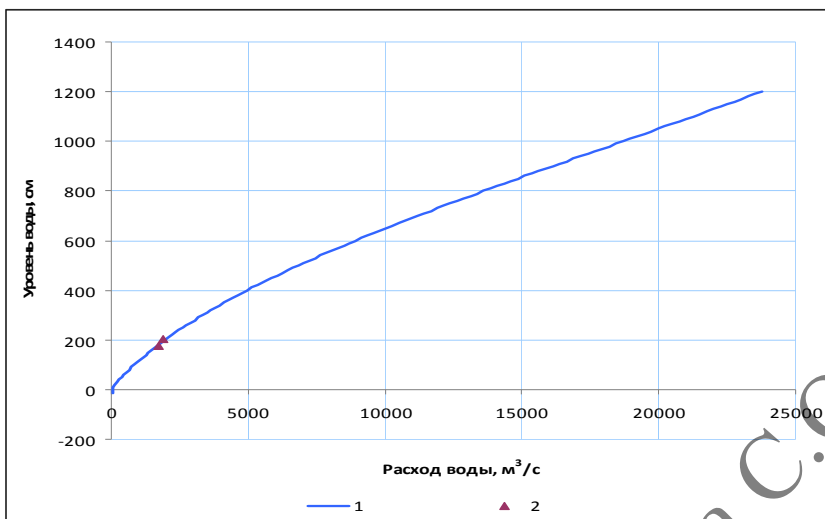


Рисунок 3 – Зависимость $Q(H)$ для р. Амур – с. Черняево: 1 – МКР 1957 -1961 г., 2 – ИРВ 2014 г.

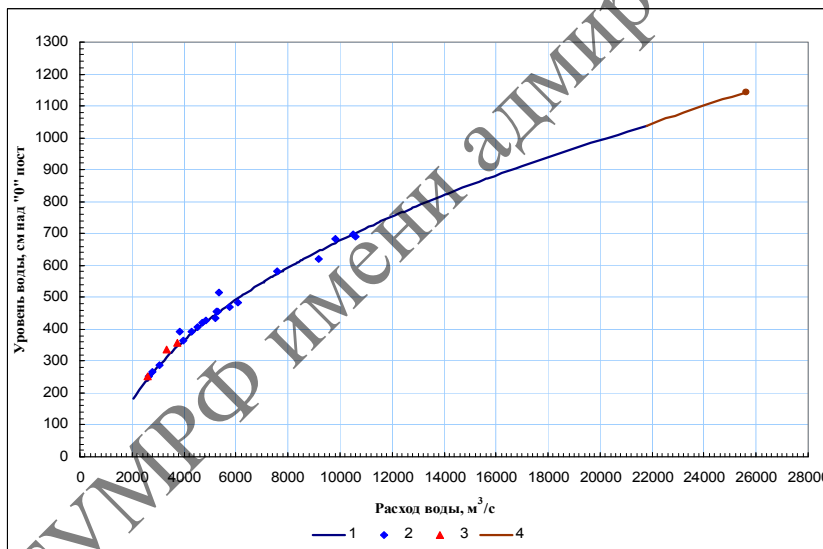


Рисунок 4 – Зависимость $Q(H)$ для р. Амур – с. Гродеково: 1 – МКР 1960-68 гг., 2 – ИРВ РКМ 2007-2013 гг., 3 – ИРВ РКМ 2014 г., 4 – область экстраполяции МКР

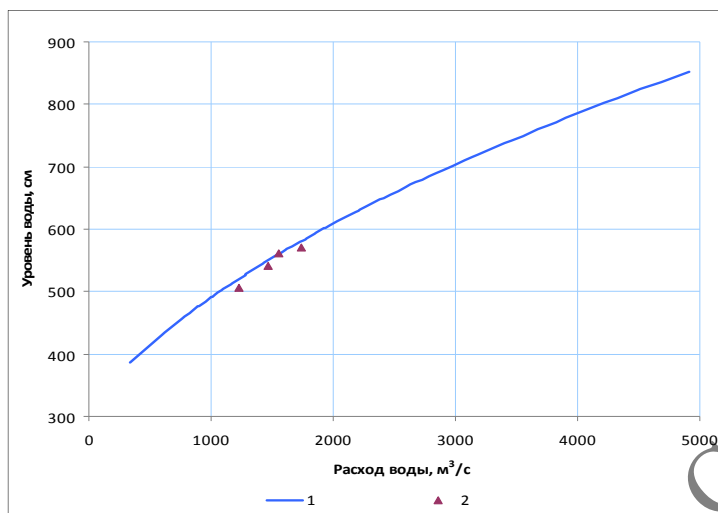


Рисунок 5 – Зависимость расходов от уровней воды, р. Усури – с. Шереметьево:

1 – МКР 1957 - 67 гг., 2 – ИРВ 2014 г.

Для оценки уровней воды различной обеспеченности была построена зависимость расходов воды для основного уровня поста в г. Хабаровск, который находится в районе городского водозабора (рисунок 7).

Уточнённая зависимость расходов от уровней воды для гидрологического поста на р. Амур в г. Комсомольск представлена на рисунке 8.

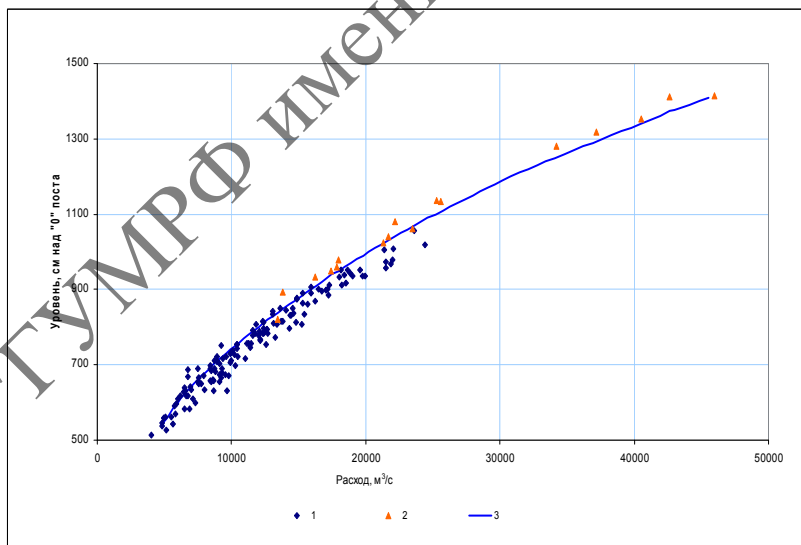


Рисунок 6 – Зависимость расходов от уровней воды, р. Амур – г. Хабаровск, г. ст.:

1 – ИРВ 1998 - 2012 гг., 2 – ИРВ 2014 г., 3 – МКР 1998 - 2013 г.

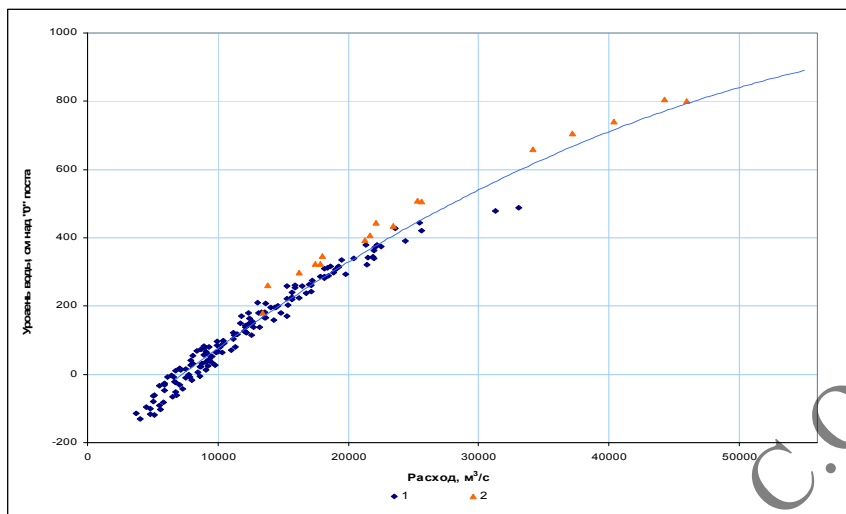


Рисунок 7 – Зависимость расходов от уровней воды, р. Амур – г. Хабаровск: 1 – ИРВ 1998-2012 гг., 2 – ИРВ 2013 г.

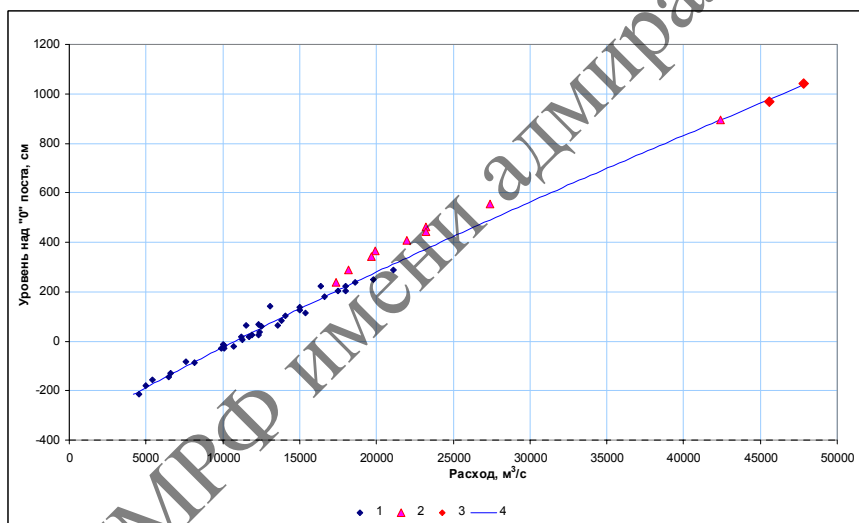


Рисунок 8 – Зависимость расходов от уровней воды, р. Амур – г. Комсомольск:

1 – ИРВ 2000 - 2009 гг., 2 – ИРВ 2013 г., 3 – экстраполяция РВ, 4 – МКР

На основе уточнённых зависимостей расходов от уровней воды и проверенных данных наблюдений о расходах воды за период паводка 2013 г. были построены гидрографы стока в основных створах реки Амур и её притоков и определены следующие характеристики паводка – наивысшие уровни и максимальные расходы воды паводка, средние за период паводка расходы воды, его продолжительность и объём (таблица 6).

Таблица 6 – Результаты расчётов по итогам паводка, прошедшего в 2013 г. на реках бассейна р. Амур

Река – пост	Площадь водосбора, км ²	Расстояние от устья, км	Расход воды, Ср. м ³ /с	Дата начала паводка	Дата конца паводка	Продолжительность, сут	Объём, км ³	Q _{макс ср.сут.} , м ³ /с	Наивысший уровень, см	Дата
р. Аргунь – с. Олоча	106000	425	1020	8.07	21.10	105	9,25	3230	733	4.5.08
р. Аргунь – с. Урюпино	145000	446	2910	16.07	31.10	107	26,9	5350	837	14.08
р. Шилка – г. Сретенск	175000	395	1160	27.06	17.10	112	11,2	2930	424	30.06
р. Шилка – х. Часовая	200000	145	1360	28.06	18.10	112	13,2	3130	544	1.07
р. Амур – с. Джалинда	406000	2618	3740	27.06	29.10	125	40,4	7690	605	17.08
р. Амур – с. Кумара	478000	2168	590	30.06	29.10	122	58,9	14400	817	16.08
р. Селемджа – с. Усть-Ульма	67000	45	2400	7.07	28.10	113	23,4	6350	614	20.08
р. Зeya – с. Белогорье	229000	43	6650	9.07	31.10	115	66,1	14400	819	23.24.08
р. Амур – с. Гродеково	726000	1921	12010	1.07	31.10	123	127,6	25600	1144	16.17.08
р. Бурья – с. Малниовка	67400	80	1650	28.07	31.10	96	13,7	3800	402	19.08
р. Большая Бира – г. Биробиджан	7560	125	413	17.07	3.11	110	3,93	1110	443	2.08
р. Сунгари – Цзямусы	524000		7095	2.07	18.09	91	55,8	13400	985	31.08
р. Уссури – с. Шереметьево	156000	147	2520	21.07	31.10	103	22,5	4920	853	31.08.1.09
р. Амур – г. Хабаровск	1630000	962	26900	9.07	31.10	115	267	46100	808	3.4.09
р. Тунгуска – с. Архангеловка	29400	61	1840	25.07	18.09	56	8,9	2940	1016	25.26.08
р. Амур – г. Комсомольск	1730000	614	29000	16.07	31.10	107	268	42600	911	12.09

Так, объём стока Амура у г. Хабаровска за период паводка составил 267 км³, объём стока за весь 2013 год – 446 км³, что уже является исторической величиной, т. к. зафиксированный ранее максимальный годовой объём стока составляет 422 км³ в 1897 г.

Список литературы

- Гришанин К. В. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеоздат, 1979 – 311 с.
- Карасёв И. Ф. Комплексы подобия и гидравлические сопротивления самоформирующихся русел рек и каналов. Гидротехническое строительство, № 12, 2006, с.17-31.
- Карасёв И. Ф. Речная гидрометрия и учёт водных ресурсов. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – 310 с.
- Карасёв И. Ф. Яковлева Т. И. Усовершенствованные методы гидрометрического учёта стока. Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда, Секция 1, с.195-202 М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006.
- Карасёв И. Ф., Винников С. Д., Кучеренко О. Е. Экстраполяция максимальных расходов воды при нестационарном движении руслового потока. Стр. 20 - 25. Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 25. Научно-теоретический журнал. – СПб. РГГМУ, 2012. – 204 с. ISSN 2074-2762.
- МУ № 92 «Определение максимальных расходов воды по меткам уровня высоких вод, Л. Гидрометеоздат, 1979 г., 48 с.
- Отчёт ФГБУ «ДВ УГМС» «Обследование зон затоплений р. Амур в период наводнения 2013 года. Измерение расходов воды на трансграничных водных объектах в рамках Российско – Китайского сотрудничества в 2014 году», г. Хабаровск, 214 г.

ASSESSMENT OF DISCHARGE CAPACITY OF THE AMUR RIVER CHANNEL AND ITS TRIBUTARIES BASED ON DISCHARGE MEASUREMENTS AT GAUGING SITES AND THEIR EXTRAPOLATION OUTSIDE MEASUREMENT DOMAIN (T.I. Yakovleva, O.E. Kucherenko)

The paper provides the results of long-term gauge measurements in the Amur River basin, as well as those collected after the 2013 flooding, which were used as a basis for assessing the channel discharge capacity during catastrophic 2013 flooding. The assessment of channel and flood plain discharge capacities at stages for which discharge measurements are not available is made based on techniques developed at SHI. Flow hydrographs for main cross-sections of the Amur River and its tributaries were developed and main flood characteristics (highest stages, maximum and average discharges, flood volume and duration) determined based on revised relationships and discharges measured during the 2013 flooding

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ РУСЛОВЫХ БАЛАНСОВ НА УЧАСТКЕ РЕКИ АМУР: Г. ХАБАРОВСК - Г. КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

Т. И. Яковлева, Ю.В. Шарина

ФГБУ «ГГИ», Санкт-Петербург. tiya-ilichovo@yandex.ru

В статье приводятся результаты разработки методики расчета динамических русловых водных балансов (РВБ) на участке р. Амур от г. Хабаровска до г. Комсомольска-на-Амуре для различных интервалов времени (суточных, декадных и месячных), в которой учтено время добегаания на участке и трансформация элементов руслового водного баланса при перемещении паводочной волны по многорукавному руслу с широкой поймой. Разработанная методика позволила по данным о расходах воды Амура в г. Хабаровске и боковых притоков на участке рассчитать ежедневные расходы воды в период открытого русла за многоводные 1958, 1959, 1984 и 2013 гг. в г. Комсомольске-на-Амуре с заблаговременностью 4–5 суток. За все эти годы получены удовлетворительные результаты сходимости расчетных и фактических гидрографов стока, Это позволяет рекомендовать разработанную методику для составления краткосрочных прогнозов стока р. Амур в г. Комсомольске с заблаговременностью 4–5 суток

Методы балансов используются в практике гидрологических расчетов и прогнозов при изучении закономерностей формирования речного стока и преобразований его режима в результате человеческой деятельности. Наиболее широко изучается водный баланс бассейнов рек, где сток воды выступает как элемент ландшафта. В русловой же сети речной сток рассматривается, прежде всего, как один из видов природных ресурсов. Контроль его использования осуществляется на основе русловых водных балансов (РВБ), как соотношение потерь и приращений по длине реки. Русловые водные балансы составляются для выделенных участков рек и являются инструментом для изучения условий формирования речного стока, выделения его отдельных генетических составляющих; а также оценки надежности учета стока в гидрометрических створах, ограничивающих расчетный участок. РВБ позволяют проанализировать и понять механизм перемещения и трансформации волн паводков и половодий при их продвижении по руслам и поймам рек в пределах фиксированных участков (Методические...,1977; Карасёв...,1980).

РВБ выражает соотношение между поступлением воды на участок реки (канала) через верхний ограничивающий створ и стоком в нижнем, замыкающем створе с учетом притока, изъятий, потерь и сбросов воды между ними (Методические..., 1977). В зависимости от характера решаемых задач могут быть использованы различные уравнения РВБ. При учете полного комплекса приходных и расходных составляющих баланса, т. е. при расчете детального РВБ, применяется развернутое уравнение, которое в наиболее общем случае имеет вид:

$$Q_в - Q_н + Q_{бп} + Q_{ск} - Q_{вз} + Q_{сб} - Q_{ит} + Q_{ос} + Q_{ин} \pm Q_{пр} \pm Q_{бр} + Q_ф + Q_л + Q_о = 0, \quad (1)$$

где: Q_v и Q_n - расходы воды в верхнем и нижнем створах;

Q_{bn} - расходы воды боковых притоков;

$Q_{ск}$ - расходы воды со склонов;

$Q_{вз}$ и $Q_{сб}$ - расходы воды водозаборов и сбросных вод на коллекторно-дренажной сети;

$Q_{ит}$ - испарение с поверхности воды и транспирация влаги растительностью в зоне затопления и подтопления поймы;

$Q_{ос}$ - поступление воды от осадков и таяния снегов запасов в русле;

$Q_{пт}$ - приток напорных подземных вод;

Q_{pp} - расходы руслового регулирования, обусловленные потерей воды на аккумуляцию в емкостях русла и поймы или возвратом из них при изменении наполнения русла;

$Q_{бр}$ - расходы берегового регулирования – фильтрационный отток в берега или приток из них при изменении наполнения русла;

$Q_{ф}$ - фильтрация воды в почву;

Q_o - расход воды, потраченный на ледообразование;

Q_o - остаточный член руслового водного баланса.

Детальное уравнение РВБ включает три группы данных: гидрометрическую, гидрофизическую и гидрогеологическую. Если значения элементов первой группы могут быть определены по данным основной сети, то для получения сведений об элементах двух других групп необходимы специальные наблюдения. Поэтому часто ограничиваются составлением гидрометрических РВБ. Для рассматриваемого участка р. Амур от г. Хабаровска до г. Комсомольска в период свободного ото льда русла уравнение РВБ по гидрометрическим данным записывается в виде:

$$Q_v - Q_n + Q_{bniz} + Q_{бррасч} + \dots \pm Q_{pp} - Q_{нрп} + Q_o = 0, \quad (2)$$

в котором представлены лишь элементы, определяемые гидрометрическим способом или по планам русловых съемок (Q_{pp}).

Здесь Q_{bniz} – расход боковых притоков, определенный гидрометрическим способом; $Q_{бррасч}$ – рассчитанный расходы неучтенного бокового притока; $Q_{нрп}$ – суммарные потери стока в русле и на пойме на испарение, заполнение бессточных участков поймы, а также инфильтрацию при выходе воды на надпойменные террасы.

Общая структура РВБ зависит как от климатических условий, так и от факторов подстилающей поверхности – ландшафта, характера почвогрунтов, строения водосбора, лесистости и заболоченности, наличия озер и др., которые перераспределяют поступающую на водосбор влагу между различными составляющими баланса. Структурные особенности РВБ связаны также с хозяйственным использованием речных и подземных вод. Имеет значение и местоположение расчетно-

го участка по длине реки: элементы РВБ в зоне формирования стока (верхнее течение) и зоны транзита (среднее и нижнее течение) существенно различаются.

Составляющие РВБ измеряются или рассчитываются с различной погрешностью, величина которой при уменьшении интервала осреднения, как правило, возрастает. Следствие этого – увеличение невязок РВБ, компенсирующих погрешности определения учтенных элементов и неучтенных составляющих баланса. Поэтому при интерпретировании результатов составления балансов важной задачей является выявление вклада каждого элемента в остаточный член детально-го уравнения. Именно этим определяется необходимость анализа источников погрешностей расчета баланса и способов получения их количественных оценок.

При оценке точности составления РВБ возникает вопрос о суммировании погрешностей. Согласно методическим указаниям (Методические..., 1977), результирующая погрешность расчета РВБ определяется методом частных погрешностей, т. е. оценивается совокупной погрешностью расчета его элементов σ_o , вычисляемой как корень квадратный из суммы квадратов средних квадратических погрешностей определения всех составляющих уравнения РВБ:

$$\sigma_o = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} \sigma_i^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (\delta_i Q_i)^2}, \quad (3)$$

где: n – число элементов РВБ; j – порядковый номер элемента; σ_o, σ_j – средние квадратические погрешности определения соответственно остаточного члена баланса и его отдельных составляющих; $\sigma_{\square j}$ – относительная средняя квадратическая погрешность определения j -го элемента баланса.

Для рассматриваемого участка реки Амур составлялись РВБ за следующие интервалы времени: сутки, декада, месяц, год. В таблице 1 приведены погрешности расчета элементов РВБ для различных расчетных интервалов времени.

Таблица 1 – Погрешности расчета элементов РВБ для различных интервалов времени

Интервал	Погрешности элементов РВБ	Погрешности, %			
		расходы в створах ГП	неучтенный боковой приток	расходы руслового и пойменного регулирования	потери стока
Сутки		7,0	10,0	20,0	20,0
Декада		5,0	10,0	20,0	20,0
Месяц		4,0	10,0	15,0	20,0
Год		3,0	10,0	-	20,0

Допустимая невязка баланса зависит от доверительной вероятности p оценки надежности РВБ. Для $p = 95\%$ остаточный член Q_o РВБ должен находиться в интервале:

$$-1,96 \sigma_o \leq Q_o \leq 1,96 \sigma_o \quad (4)$$

Выполнение этого критерия свидетельствует о том, что остаточный член баланса не значим – соизмерим с совокупной погрешностью его определения, а расчет РВБ надежен.

Очевидно, что основной вклад в остаточный член баланса вносят погрешности определения стока в ограничивающих участках створах на гидрологических постах Хабаровск и Комсомольск. На расчетном участке наблюдения за стоком ведутся также на трех притоках на следующих гидрологических постах (ГП): р. Тунгуска – ГП с. Архангеловка, р. Манома – ГП с. Манома 1-я, р. Гур – ГП пос. Снежный. Суммарная площадь водосборов этих притоков, освещенная наблюдениями за стоком, составляет 39680 км². Неосвещенная наблюдениями площадь водосбора на участке составляет 60320 км². Сток с этой территории оценивался по методу аналогии с корректирующим коэффициентом 0,9. В качестве аналогов использованы все три притока, на которых ведется учет стока воды. В отдельные годы не наблюдался также сток по постам – с. Архангеловка, с. Манома 1-я, и пос. Снежный. При отсутствии данных по какому-то из этих постов использовались связи расходов воды на них с расходами соседних притоков. Коэффициенты этих связей получены по данным совместных наблюдений в виде:

$$\begin{aligned} Q_{\text{Тунгуска}} &= 9,74 * Q_{\text{Манома}}; & Q_{\text{Тунгуска}} &= 1,59(Q_{\text{Манома}} + Q_{\text{Гур}}); \\ Q_{\text{Манома}} &= 0,06 * Q_{\text{Тунгуска}}; & Q_{\text{Манома}} &= 0,05(Q_{\text{Тунгуска}} + Q_{\text{Гур}}); \\ Q_{\text{Гур}} &= 4,07 * Q_{\text{Манома}}; & Q_{\text{Гур}} &= 0,25 * Q_{\text{Тунгуска}}. \end{aligned} \quad (5)$$

При расчете совокупной погрешности РВБ ввиду их незначительности не учитывались такие составляющие, как осадки на водное зеркало и береговое регулирование.

Неустановившееся движение речного потока сопровождается трансформацией расходов воды по его длине и изменением объема (W) воды в русле (русловых емкостях) и при выходе воды на пойму – пойменных емкостях. Связь этих процессов для участка реки оценивается посредством кривой объемов воды как функции $W(Q)$ или $W(H)$, отражающей в суммарном виде главные особенности морфометрии и гидравлики участка реки. Она используется при расчетах медленно изменяющегося движения воды. Для участка реки Амур от Хабаровска до Комсомольска нами получена зависимость объемов русла и поймы от среднего значения расхода воды на участке (рисунок 1). Для этого были использованы данные нивелировок трех морфометрических створов – выше моста в г. Хабаровск, в с. Елабуга, выше моста в г. Комсомольск – и полученные на их основе зависимости площадей поперечного сечения от уровней воды ближайших гидрологических постов. На рисунках 2 и 3 приведены графики зависимостей площадей поперечного сечения от уровня воды для Хабаровска и Комсомольска. Расстояние между городами составляет 348 км.

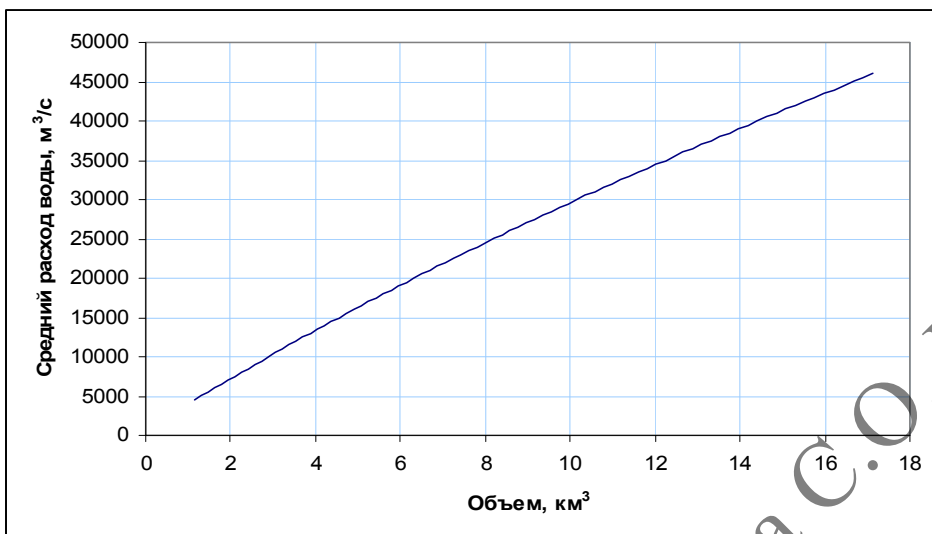


Рисунок 1 – Кривая объемов русла и поймы на участке Амура от Хабаровска до Комсомольска

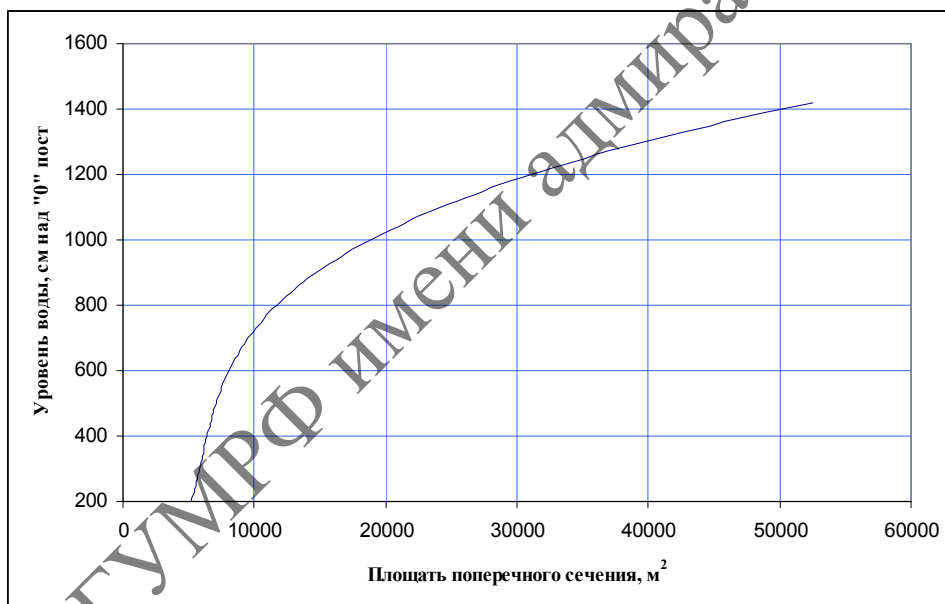


Рисунок 2 – Зависимость площади поперечного сечения Амура в г. Хабаровске (выше моста) от уровня на ГП Хабаровск (г/ст)

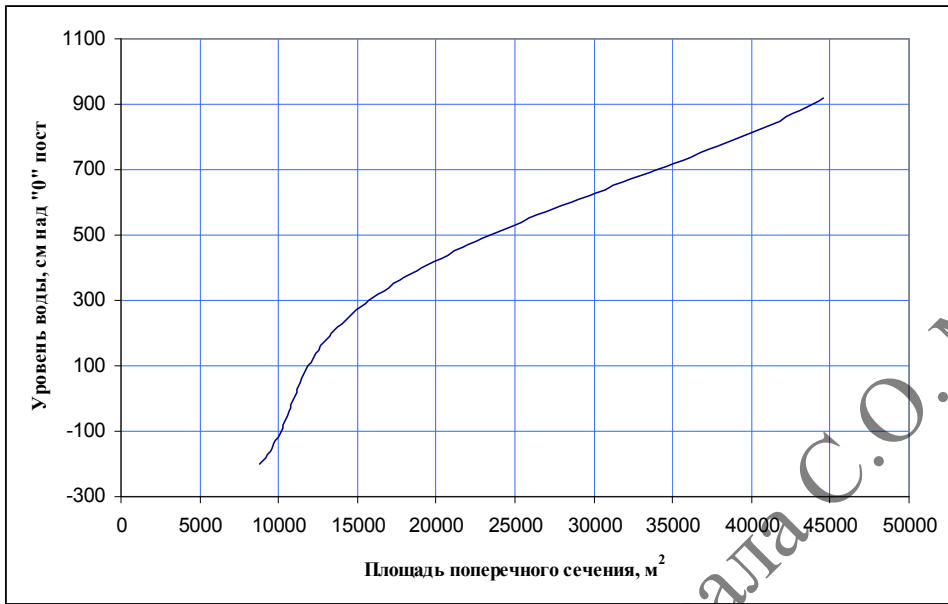


Рисунок 3 – Зависимость площади поперечного сечения Амура в г. Комсомольск (выше моста) от уровня на ГП р. Амур – г. Комсомольск

Расходы руслового и пойменного регулирования рассчитывались по формуле:

$$Q_{pp} = -\frac{\Delta W}{T}. \quad (6)$$

Здесь ΔW – изменение объема в русле и пойме за расчетный интервал времени РВБ (T).

Этот элемент РВБ нет необходимости учитывать при расчете РВБ за годовые интервалы времени, так как расходы руслового регулирования в уравнении РВБ имеют знак минус на фазе подъема и плюс – на фазе спада. В течение лет малой и средней водности отрицательные и положительные значения Q_{pp} взаимно компенсируют друг друга. На рисунке 4 приведен график РВБ, полученный по среднегодовым элементам водного баланса.

Анализ остаточных членов РВБ, предварительно рассчитанных за различные интервалы времени, показал, что в многоводные годы наблюдаются потери стока, которые остаются существенными даже для годовых интервалов времени. Так, остаточные члены РВБ 1959 и 2013 гг. (рисунок 4) превышают допустимые значения невязок. Это может объясняться только тем, что после затопления значительных территорий увеличиваются потери стока за счет существенного увеличения испарения с водной поверхности, транспирации растительностью пойменных массивов, а также заполнения бессточных участков поймы.

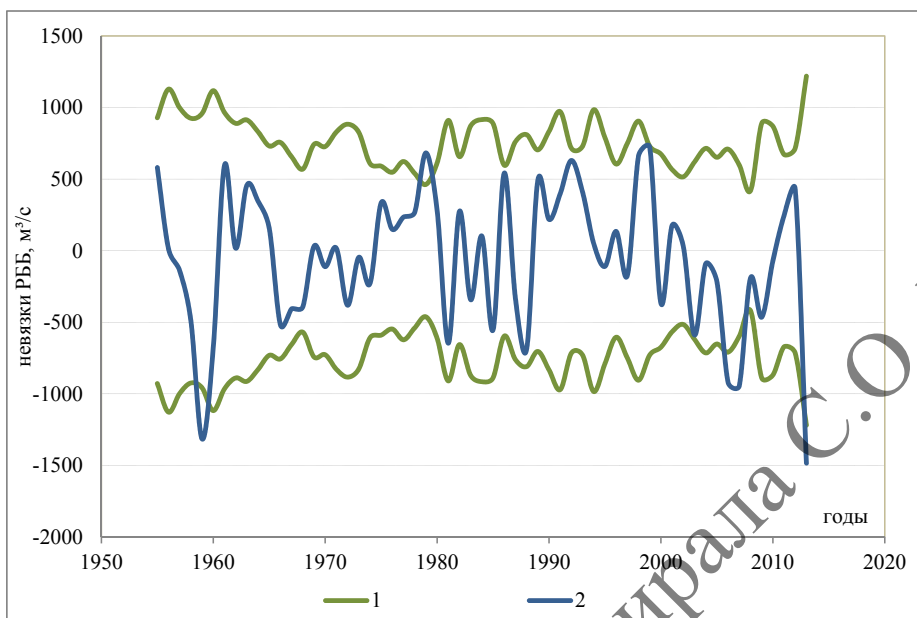


Рисунок 4 – Хронологический ход невязок РВБ за годовые интервалы времени: 1 – допустимая невязка РВБ, 2 – остаточные члены среднегодовых невязок РВБ

Анализ остаточных членов суточных РВБ показал, что потери стока наблюдаются в случаях, когда транзитный расход воды на участке превышает 20 тыс. м³/с. Для оценки потерь стока на пойме получена эмпирическая зависимость их величины от расходов руслового и пойменного регулирования.

$$Q_{прп} = -0,66 Q_{pp} - 2216. \quad (7)$$

Суточные (динамические) РВБ рассчитывались с учетом времени добегания на участке и трансформации элементов водного баланса. Время добегания от Хабаровска до Комсомольска меняется от 2 до 10 суток. На рисунке 5 приведена зависимость времени добегания на расчетном участке от расхода воды в г. Хабаровск.

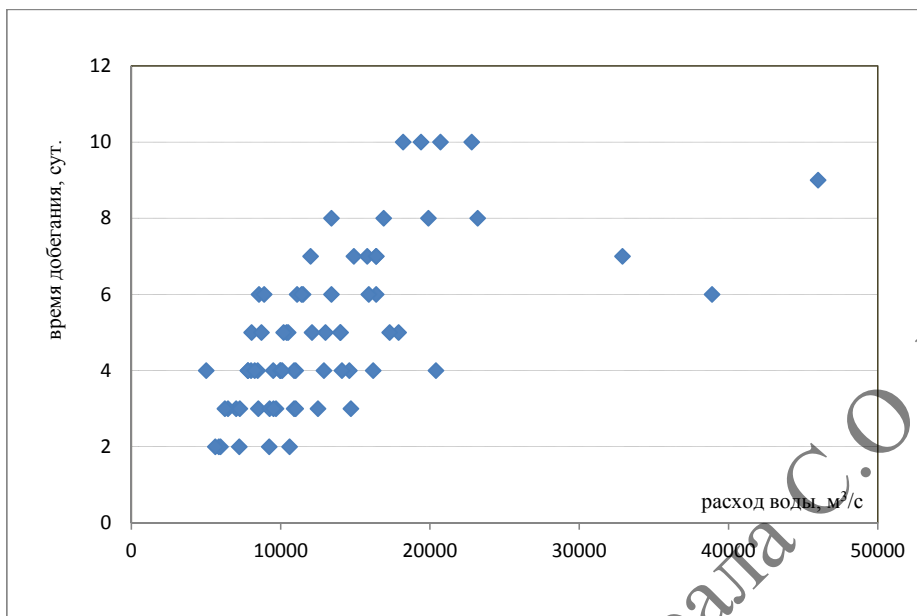


Рисунок 5 – Зависимость времени добегания на участке Амура от Хабаровска до Комсомольска от расхода воды в створе ГП г. Хабаровск

Такой разброс точек на графике (5) объясняется тем, что на столь протяженном участке на время добегания оказывают влияние множество факторов, определяющих распластывание паводочной волны [Апполонов..., 1974], таких как:

- величина перемещающихся расходов воды;
- повышение скорости в период подъема, по сравнению с периодом спада;
- регулирование стока за счет пойменных и береговых емкостей;
- заполнение пойменных озер (стариц) на подъеме и сток из них на спаде;
- уменьшения уклонов на устьевых участках притоков вследствие подпора от главной реки в период подъема паводка и сток этой воды в главную реку на спаде паводка.

Для учета распластывания паводочной волны на участке г. Хабаровск – г. Комсомольск на основе решения оптимизационной задачи с учетом времени добегания были рассчитаны параметры трансформации элементов суточных РВБ (таблица 2).

Таблица 2 – Коэффициенты трансформации элементов РВБ для суточных интервалов времени

Элемент РВБ	Коэффициенты трансформации		
	t-5	t-4	t-3
Заблаговременность в период половодья	t-7	t-6	t-5
Заблаговременность в период дождевых паводков	0,8	0,1	0,1
Расход по ГП Хабаровск	0,7	0,1	0,2
Боковой приток	0,8	0,1	0,1
Расходы руслового и пойменного регулирования	0,8	0,1	0,1
Потери на пойме	0,8	0,1	0,1

Параметры методики расчета РВБ по данным ежедневных расходов воды были получены по совокупности данных наблюдений 2013 г. На рисунке 6 приведены совмещенные фактический и рассчитанный на основе суточных РВБ гидрографы стока 2013 года в створе р. Амур – г. Комсомольск, Среднее квадратическое расхождение ежедневных данных расчетного и фактического гидрографов за период свободного русла составило 7,2%.

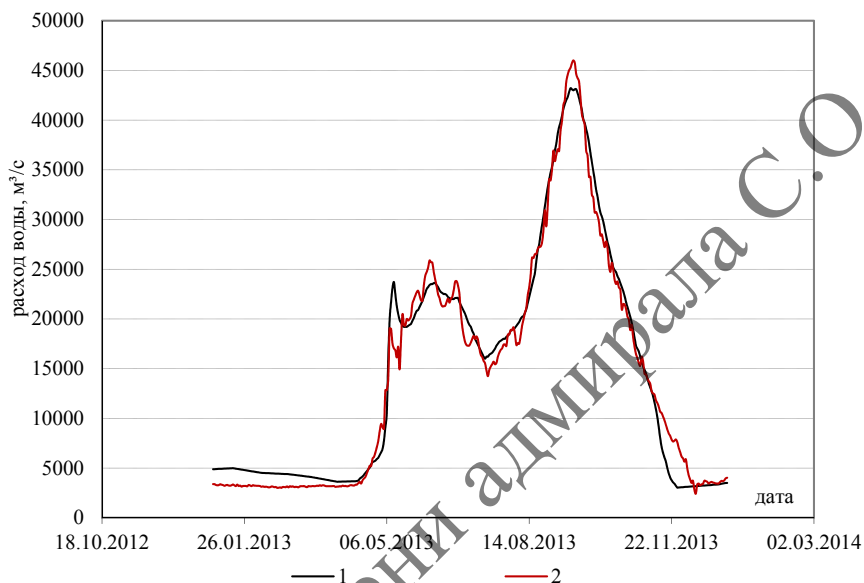


Рисунок 6 – Фактический (1) и расчетный (2) гидрографы стока 2013 г., р.Амур–г. Комсомольск

По этой же методике были рассчитаны гидрографы стока за многоводные 1958, 1959 и 1984 годы (рисунки 7-9). Расхождение расчетных и фактических данных в эти годы составило соответственно 10,6; 6,9 и 7,8%.

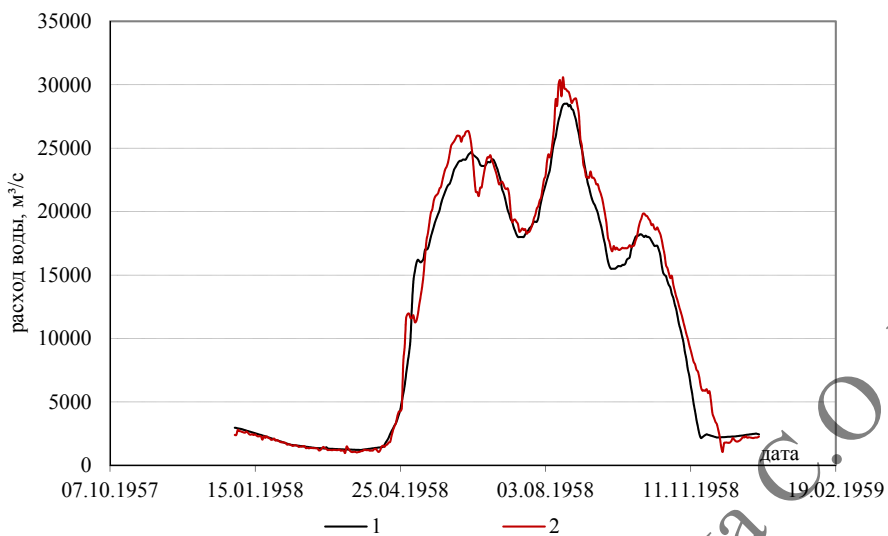


Рисунок 7 – Фактический (1) и расчетный (2) гидрографы стока 1958 г., р.Амур–г.Комсомольск

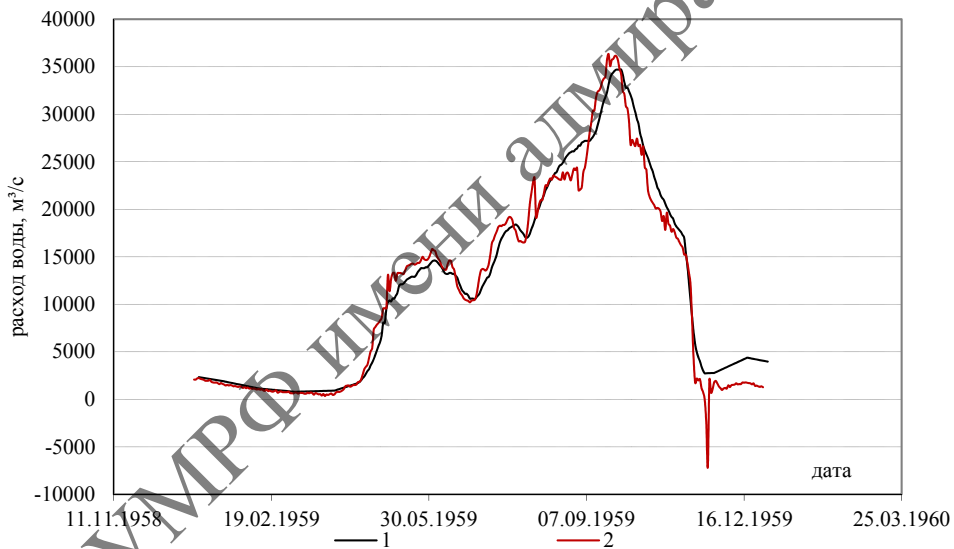


Рисунок 8 – Фактический (1) и расчетный (2) гидрографы стока 1959 г., р.Амур–г.Комсомольск

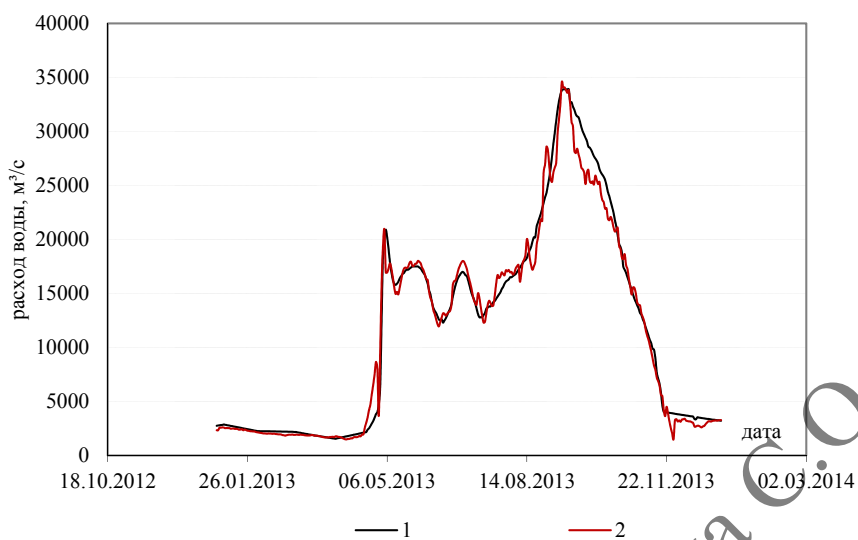


Рисунок 9 – Фактический (1) и расчетный (2) гидрографы стока 1984 г., р.Амур–г.Комсомольск

По данным рассчитанных динамических РВБ были получены осредненные характеристики элементов РВБ за декадные и месячные интервалы времени. Графики невязок РВБ за декадные и месячные интервалы времени приведены на рисунках 10 и 11.

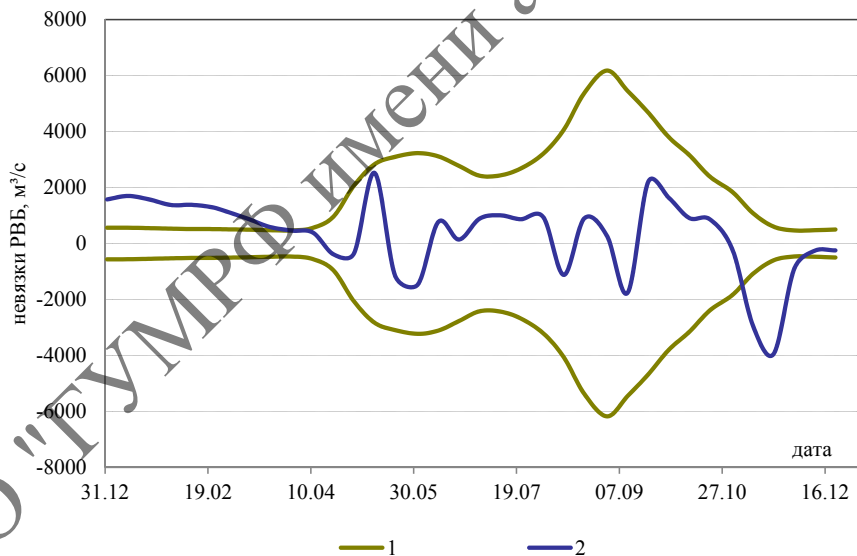


Рисунок 10 – Хронологический ход невязок декадных РВБ, 2013 г.:

1 – допустимая невязка РВБ, 2 – остаточные члены среднегодовых невязок РВБ

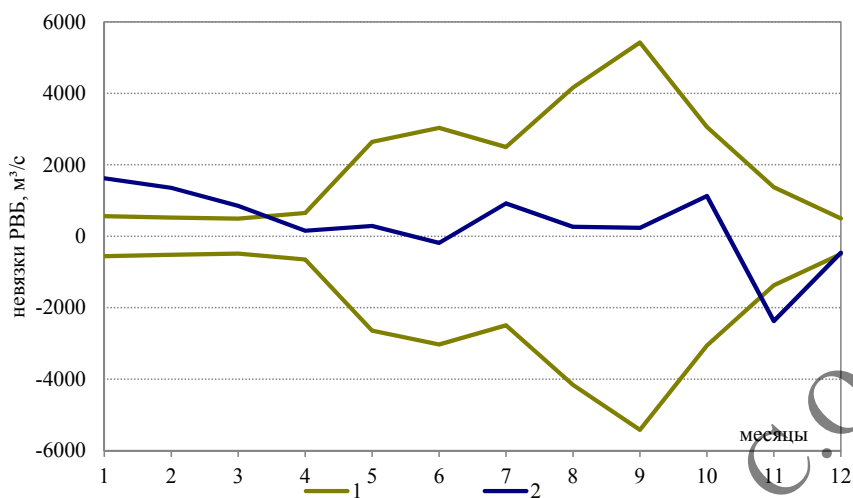


Рисунок 11 – Хронологический ход невязок месячных РВБ, 2013 г.:
1 – допустимая невязка РВБ, 2 – остаточные члены среднегодовых невязок РВБ

Анализ русловых водных балансов за 2013 год и прошлые многоводные годы показал, что в целом закономерности перемещения волн половодья и дождевых паводков на участке Амура от Хабаровска до Комсомольска сохраняются. Невязки балансов в большинстве случаев остаются в допустимых пределах при свободном состоянии русла. Существенные невязки стока отмечаются в зимний и переходные периоды, что свидетельствует о пониженной надежности учета стока в рассматриваемых створах в условиях ледостава и ледообразования.

На основе предложенной методики выполнена оценка среднегодовых потерь стока в многоводные 1958, 1959, 1984 и 2013 годы, которые составили соответственно: -1145, -1103, -427 и -1078 м³/с. После пересчета РВБ за годовые интервалы времени с учетом приведенных выше значений потерь стока на пойме, невязки среднегодовых РВБ на рассматриваемом участке за весь период с 1955 по 2013 гг. оказались в допустимых пределах (рисунок 12). Без их учета невязки среднегодовых расходов воды, превышающие допустимые значения, отмечались в 1958, 1959 и 2013 гг. (рисунок 4).

В заключение следует отметить, что разработанная методика расчета суточных (динамических), декадных и месячных РВБ с учетом времени добегания на участке и трансформации элементов руслового водного баланса при перемещении по многорукавному руслу с широкой поймой, может быть рекомендована не только для анализа надежности учета стока на рассматриваемом участке, но для использования в оперативной работе ДВ УГМС для составления краткосрочных прогнозов расходов воды Амура в г. Комсомольске с заблаговременностью 4-5 суток.

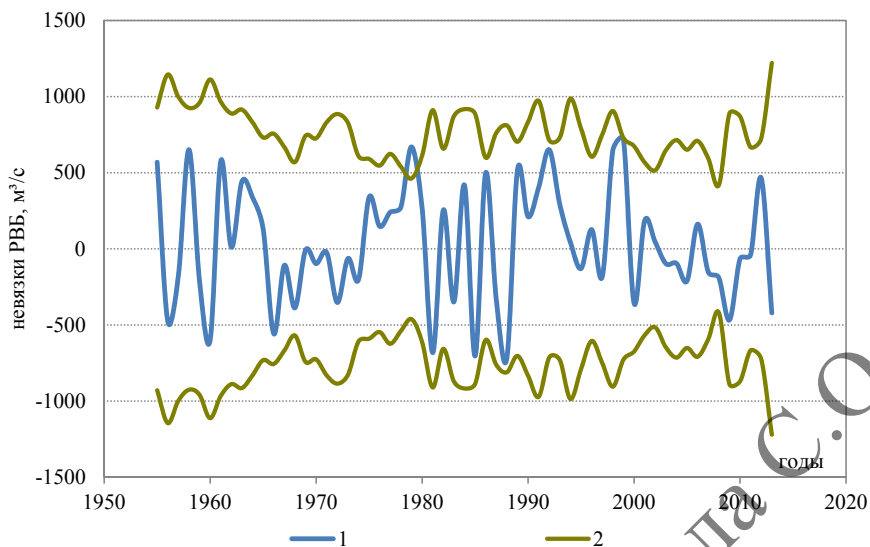


Рисунок 12 – Хронологический ход невязок РВБ за годовые интервалы времени: 1 – остаточные члены среднегодовых невязок РВБ, 2 – допустимая невязка РВБ

Список литературы

- Апполов Б. А., Калинин Г. П., Комаров В. Д. Курс гидрологических прогнозов. - Л., Гидрометеиздат, 1974, 419 с.
 Карасев И. Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. - Л., Гидрометеиздат, 1980, 310 с.
 Методические указания управлениям гидрометслужбы, № 90 – Л., Гидрометеиздат, 1977, 104 с.

ⁱ COMPUTATION AND ANALYSIS OF CHANNEL WATER BALANCES IN A REACH OF THE AMUR RIVER BETWEEN THE CITIES OF Khabarovsk AND Komsomolsk-on-Amur (T.I. Yakovleva, Yu.A. Sharina)

The paper provides results of developing a technique for computation of dynamic channel water balances (CWB) in a reach of the Amur River between the cities of Khabarovsk and Komsomolsk-on-Amur for various time intervals (daily, ten-day and monthly). The technique takes account of the travel time and transformation of water balance elements during flood wave travel in a braided channel with a wide flood plain. The technique developed enabled computation of daily discharges of a free channel for wet years 1958, 1959, 1984 and 2013 near Komsomolsk-on-Amur with a lead time of four to five days using discharge data for the Amur River reach and its side tributaries near Khabarovsk. For all study years, the computed and actual hydrographs coincide satisfactory, which makes it possible to recommend the technique for developing short-term Amur discharge forecasts near the city of Komsomolsk-on-Amur with a lead time of four to five days

ОЦЕНКА ВЫБОРОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ, ОРДИНАТ КРИВЫХ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ И ИХ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА ПРИМЕРЕ НАИВЫСШИХ УРОВНЕЙ ВОДЫ Р.АМУР

Лобанова А.Г.

ФГБУ «ГГИ», Санкт-Петербург. lobanovaantonina@mail.ru

Рассматриваются вопросы средних квадратических погрешностей расчетных значений наивысших уровней различной обеспеченности от числа лет наблюдений и отношения коэффициентов асимметрии от коэффициентов вариации

Аналитические функции распределения ежегодных вероятностей превышения – кривые обеспеченности применяются в практике инженерно-гидрологических расчетов как в России, так и за рубежом.

Параметры, входящие в уравнения кривых распределения, определяются на основании гидрометрических наблюдений за гидрологическими характеристиками. В силу ограниченности наблюдений за речным стоком точное определение параметров распределения невозможно. Поэтому при статистических расчетах речного стока с использованием аналитических функций распределения вероятностей возникает задача оценки точности назначения параметров распределения. Эта задача включает оценку смещенности выборочных параметров (систематические погрешности) и оценку случайного рассеивания (случайные погрешности).

Выборочное среднее арифметическое значение является несмещенной оценкой. Выборочные значения дисперсии, коэффициентов вариации и асимметрии являются отрицательно смещенными оценками. Для уменьшения, а в некоторых случаях и устранения отрицательного смещения в расчетные формулы вводят поправки: $n/(n-1)$ – для дисперсии и $n^2/(n-1)(n-2)$ – для коэффициента асимметрии, где n – число членов ряда наблюдений. На величину отрицательного смещения выборочных оценок параметров распределения (среднее квадратическое отклонение, коэффициенты вариации и асимметрии) оказывает влияние объем выборки, значение параметра распределения, а также тип исходного закона распределения. На величину отрицательного смещения существенное влияние оказывает коэффициент автокорреляции между смежными членами ряда (Рождественски..., 1974).

Так как аналитическое решение по оценке смещенности выборочных параметров отсутствует, эта оценка осуществляется на основании метода Монте-Карло (метода статистических испытаний).

Окончательным результатом инженерно-гидрологических расчетов различных гидрологических характеристик являются ординаты интегральных кривых распределения (квантили) заданной вероятности ежегодного превышения. Поэтому случайные погрешности выборочных квантилей распределения имеют особое значение в практике расчетов основных

гидрологических характеристик. При оценке точности выборочных квантилей, в виду отсутствия, а иногда недостаточности аналитического решения, используется метод статистических испытаний. Частичное решение по оценке случайных погрешностей было выполнено рядом авторов (Крицкий..., 1946; Крицкий..., 1968; Блохинов..., 1968; Румянцев..., 1973; Алексеев..., 1975; Рождественский..., 1975) по формулам, полученным теоретическим путем. Формулы стандартных погрешностей выборочных параметров распределения (среднее, коэффициенты вариации и асимметрии), коэффициента автокорреляции между смежными членами ряда и квантилей, рассчитанных аналитическим путем, дают, как правило, преувеличенные значения по сравнению с данными статистического моделирования.

В полном объеме оценку случайных погрешностей выборочных квантилей во всем диапазоне применяемых в гидрологии обеспеченностей можно получить на основании многочисленных экспериментов по статистическому моделированию (Рождественский, 1977).

Расчетное значение основных гидрологических характеристик существенно зависит от объема выборочных данных и в большей мере от соотношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации. Поэтому и случайные погрешности выборочных квантилей зависят от объема выборочных данных и от соотношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации.

Рассмотрим возможные варианты расчетов наивысших уровней Амура на примере гидрологического поста у г. Хабаровск (1896-2013 гг.) и сведения об историческом уровне воды 1872 г.). Расчеты осуществлялись на основе применения аналитических функций распределения ежегодных вероятностей превышения (Методические..., 2010; СП..., 2004). Случайные погрешности параметров распределения и квантилей определялись в соответствии с СП 33-11-2003, а также по специальным таблицам, полученным методом статистических испытаний (Рождественский..., 1977). Учет выдающихся значений максимумов производился согласно (СП..., 2004; Методические..., 2007).

В качестве примера рассмотрим расчеты аналитических функций распределения ежегодных вероятностей превышения (кривых обеспеченностей) наивысших уровней воды р. Амур у г. Хабаровск для различных периодов наблюдений, которые представлены в таблице 1. В таблице даны расчетные параметры (среднее значение \bar{H}_{\max} , коэффициенты вариации C_v , асимметрии C_s , отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации C_s/C_v) и значения уровней воды $H_{0,1\%}$ и $H_{1\%}$. В знаменателе приводятся средние квадратические погрешности параметров и расчетных значений максимальных уровней заданной обеспеченности.

В первой строке таблицы расчетные значения уровней воды $H_{0,1\%}$ и $H_{1\%}$ получены за период 1896-2013 гг. по кривой распределения Пирсона III типа (биномиальной кривой распределения).

Во второй строке таблицы – по кривой распределения Пирсона III типа с учетом выдающегося значения 2013 года (808 см), повторяемость которого принята раз в 142 года, так как было установлено, что имелось наблюдение в 1872 году.

В третьей и четвертой строках приводятся расчетные значения максимального уровня, полученные по кривой распределения Крицкого-Менкеля (трехпараметрическое распределение) также за период 1896-2013 гг. и соответственно с учетом выдающегося значения уровня 2013 года, повторяемость которого принята также раз в 142 года.

В пятой строке кривая распределения Пирсона III типа с учетом двух выдающихся значений 2013 года (808 см) и 1872 года (722 см).

В шестой и седьмой строках таблицы даны расчетные параметры и значения максимальных уровней воды за период 1975 – 2013 гг. Расчетные значения максимальных уровней воды $H_{0,1\%}$ и $H_{1\%}$ определены соответственно по кривой распределения Пирсона III с учетом экстремума в 2013 г. и без него.

В восьмой и девятой строках аналогично представлены расчеты только по кривой распределения Крицкого-Менкеля.

Таблица 1 - Варианты расчетов наивысших уровней р.Амур у г.Хабаровска при различных расчетных периодах и кривых распределений

№ п/п	Расчетный период	Статистические параметры кривой распределения уровня и их случайные погрешности					Обеспеченные уровни, (см)		Примечания
		H_{\max} , см	C_v	C_s	C_s/C_v	0,1%			
1	1896-2013	$\frac{431}{14}$	$\frac{0,27}{0,02}$	$\frac{0,10}{0,23}$	0,40	$\frac{805}{71}$	$\frac{708}{33}$	Кривая распределения Пирсона III типа	
2	1872-2013	$\frac{433}{14}$	$\frac{0,28}{0,02}$	$\frac{0,13}{0,23}$	0,45	$\frac{836}{66}$	$\frac{730}{36}$	Кривая распределения Пирсона III типа, с экстремумом (2013 г.)	
3	1896-2013	$\frac{431}{14}$	$\frac{0,27}{0,02}$	$\frac{0,10}{0,23}$	0,40	$\frac{790}{71}$	$\frac{705}{33}$	Кривая распределения Крицкого-Менкеля	
4	1872-2013	$\frac{433}{14}$	$\frac{0,28}{0,02}$	$\frac{0,13}{0,23}$	0,45	$\frac{836}{66}$	$\frac{730}{36}$	Кривая распределения Крицкого-Менкеля, с экстремумом (2013 г.)	
5	1896-2013	$\frac{431}{16}$	$\frac{0,30}{0,02}$	$\frac{0,07}{0,23}$	0,23	$\frac{846}{60}$	$\frac{740}{39}$	Кривая распределения Пирсона III типа, с двумя экстремумами (1872, 2013г г.)	
6	1975-2013	$\frac{387}{25}$	$\frac{0,34}{0,06}$	$\frac{0,75}{0,41}$	2,20	$\frac{930}{126}$	$\frac{759}{77}$	Кривая распределения Пирсона III типа	
7	1975-2013	$\frac{387}{25}$	$\frac{0,36}{0,06}$	$\frac{0,69}{0,40}$	1,91	$\frac{943}{129}$	$\frac{770}{78}$	Кривая распределения Пирсона III типа, с экстремумом (2013 г.)	
8	1975-2013	$\frac{387}{26}$	$\frac{0,34}{0,06}$	$\frac{0,75}{0,41}$	2,20	$\frac{930}{126}$	$\frac{759}{77}$	Кривая распределения Крицкого-Менкеля	
9	1975-2013	$\frac{387}{26}$	$\frac{0,34}{0,06}$	$\frac{0,75}{0,40}$	1,94	$\frac{936}{126}$	$\frac{818}{76}$	Кривая распределения Крицкого-Менкеля, с экстремумом (2013 г.)	

Анализ представленных в таблице данных, позволяет сделать следующие выводы:

- Оценки наивысших уровней воды обеспеченности 1% и 0,1%, полученные с использованием распределения Крицкого-Менкеля и Пирсона III типа очень близки, их

расхождения находятся в пределах случайных средних квадратических погрешностей определения.

- Учет исторического максимума повышает расчетные значения уровня примерно на 20-40 см.
- При расчете уровня по данным наблюдений за 1975-2013 гг. (период работы Зейского водохранилища) значения квантилей возрастают, но при этом значительно увеличивается случайная погрешность их определения.

Далее на примере наивысших ряда уровней воды р.Амур – с. Кумары, по которому имеются наблюдения за 115 лет (1899-2013гг), рассмотрим каким образом изменяются средние квадратические погрешности расчетных значений обеспеченностью от 0,01% до 25% в зависимости от расчетного периода и соотношения коэффициентов асимметрии к коэффициентам вариации (C_s/C_v).

Расчетные значения параметров, значений наивысших уровней и средних квадратических погрешностей для створа р. Амур – с. Кумары даны в таблице 2.

На рисунке 1 приводятся зависимости средних квадратических погрешности расчетных значений наивысших уровней различной обеспеченности (от 0,01% до 25%) от расчетного периода (n). Средние квадратические погрешности уменьшаются как с увеличением расчетного периода (n), так и в зависимости от заданных обеспеченностей (от 0,01% до 25%).

Таблица 2 - Расчетные значения параметров, значений наивысших уровней и средних квадратических погрешностей для створа р. Амур – с. Кумары

Расчетный период	Количество лет	H_{max} , см	C_v	C_s	C_s/C_v	Обеспеченные уровни воды P%, (см)					
						0.01%	0.10%	1%	5%	10%	25%
1899-2013	114	<u>588</u>	<u>0.26</u>	<u>0.4</u>	1.50	<u>1292</u>	<u>1156</u>	<u>995</u>	<u>863</u>	<u>795</u>	<u>688</u>
		17	0.01	0.22		104	87	48	32	28	21
1899-1955	57	<u>577</u>	<u>0.28</u>	<u>0.42</u>	1.50	<u>1313</u>	<u>1170</u>	<u>1000</u>	<u>862</u>	<u>791</u>	<u>679</u>
		24	0.01	0.31		148	110	72	45	35	28
1956-2013	57	<u>600</u>	<u>0.25</u>	<u>0.63</u>	2.50	<u>1403</u>	<u>1218</u>	<u>1024</u>	<u>872</u>	<u>799</u>	<u>691</u>
		24	0.03	0.34		167	119	75	47	39	31
1899-1936	38	<u>581</u>	<u>0.31</u>	<u>0.47</u>	1.50	<u>1418</u>	<u>1253</u>	<u>1059</u>	<u>901</u>	<u>822</u>	<u>695</u>
		33	0.06	0.37		198	145	87	61	47	39
1937-1975	38	<u>591</u>	<u>0.25</u>	<u>0.67</u>	2.70	<u>1398</u>	<u>1206</u>	<u>1009</u>	<u>857</u>	<u>785</u>	<u>678</u>
		31	0.02	0.4		197	141	92	59	51	41
1976-2013	38	<u>593</u>	<u>0.24</u>	<u>0.6</u>	2.50	<u>1340</u>	<u>1170</u>	<u>990</u>	<u>849</u>	<u>781</u>	<u>678</u>
		26	0.02	0.38		174	123	77	48	41	31
1899-1926	28	<u>535</u>	<u>0.31</u>	<u>0.76</u>	2.50	<u>1451</u>	<u>1230</u>	<u>1004</u>	<u>834</u>	<u>752</u>	<u>632</u>
		31	0.06	0.39		248	175	104	65	52	39
1927-1955	29	<u>617</u>	<u>0.25</u>	<u>0.37</u>	1.50	<u>1295</u>	<u>1165</u>	<u>1011</u>	<u>884</u>	<u>817</u>	<u>715</u>
		37	0.01	0.4		178	135	92	66	53	45
1956-1984	28	<u>604</u>	<u>0.28</u>	<u>0.9</u>	3.20	<u>1656</u>	<u>1375</u>	<u>1121</u>	<u>917</u>	<u>828</u>	<u>699</u>
		42	0.01	0.47		299	214	142	90	77	59
1985-2013	29	<u>596</u>	<u>0.23</u>	<u>0.23</u>	1.00	<u>1146</u>	<u>1049</u>	<u>929</u>	<u>826</u>	<u>772</u>	<u>684</u>
		25	0.03	0.47		133	110	66	43	30	26

* во второй строке для каждого периода приводятся средние квадратические погрешности параметров распределения и значений уровней различной обеспеченности

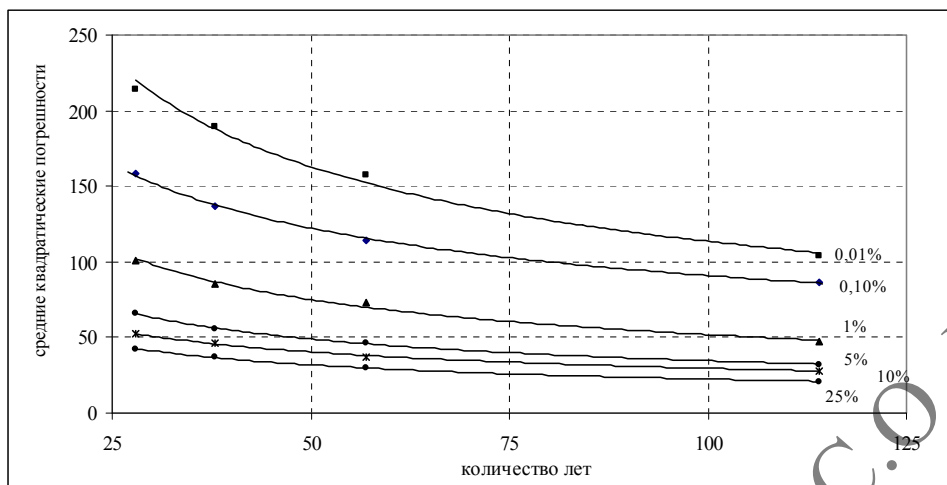


Рисунок 1 – Зависимость средних квадратических погрешностей расчета наивысшего уровня воды для заданных обеспеченностей р. Амур – с. Кумары от числа лет наблюдений

Таким образом, для наивысших уровней различной обеспеченности средние квадратические погрешности расчетных значений уменьшаются с увеличением числа лет наблюдений. Также отмечается, что средние квадратические погрешности расчетных значений уровней уменьшаются для обеспеченностей от 0,01% до 25%

На рисунке 2 приводится пример зависимости осредненных средних квадратических погрешности для периода 28 лет.

Установлено, что с увеличением отношения C_s/C_v погрешности для наивысших уровней воды различной обеспеченности увеличиваются.

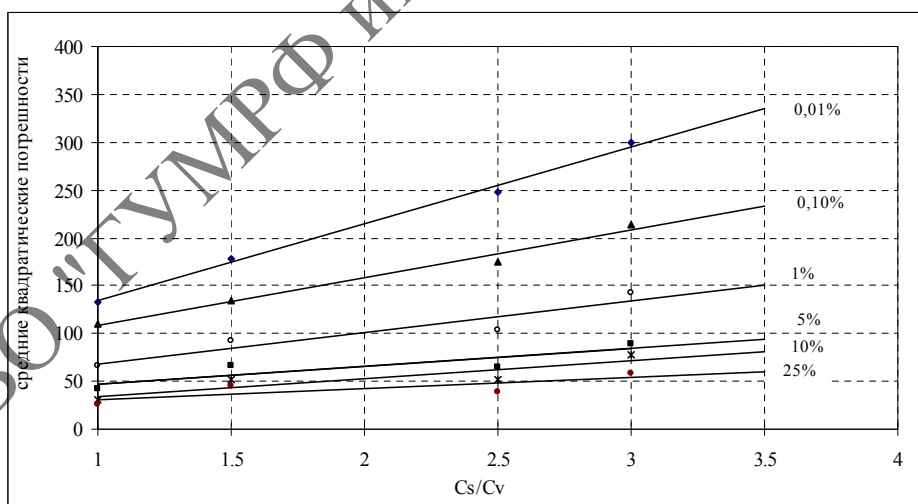


Рисунок 2 – Зависимость средних квадратических погрешностей расчета наивысшего уровня воды для заданных обеспеченностей р. Амур – с. Кумары от соотношения C_s/C_v

Таким образом при статистических расчетах речного стока, и в частности наивысших уровней воды, с использованием аналитических функций распределения вероятностей при оценке точности определения параметров распределения и расчетных значений различной обеспеченности необходимо учитывать их средние квадратические погрешности, которые зависят как от числа лет наблюдений, так и отношения коэффициентов асимметрии к коэффициентам вариации, что очень важно при инженерно-гидрологических расчетах для строительного и водохозяйственного проектирования.

Список литературы

- Алексеев Г.А. Методы оценки случайных погрешностей гидрометеорологической информации. Л., Гидрометеоздат, 1975. 96 с.
- Блохинов Е.Г. Новые приемы для оценки параметров случайных колебаний речного стока по данным многолетних наблюдений / Е.Г. Блохинов // Труды ГГИ, 1968, вып.143, с. 134-185
- Крицкий, С.Н. О приемах исследования случайных колебаний речного стока/ С.Н Крицкий, М.Ф. Менкель // Труды НИУ ГУГМС, сер.4.- вып.29.-1946. С. 3-32.
- Крицкий, С.Н., Менкель М.Ф. О некоторых приемах статистического анализа гидрологических рядов./ С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель //Труды ГГИ.- вып.143,1968.- С. 110-133.
- Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений/ Типография «Вектор-ГиС», Нижний Новгород, 2007. - 134 с.
- Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определение их расчетных значений по неоднородным данным, С-Пб, Исттор-История, 2010, - с.162.
- Рождественский А.В., Зверева В.М. Оценка смещенности выборочных параметров распределения и квантилей. _Труды ГГИ, 1975, вып.212, с.3-18
- Рождественский, А.В. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик/ А.В. Рождественский.- Л.: Гидрометеоздат, 1977.-269 с
- Рождественский, А.В., А.И. Чеботарев. Статистические методы в гидрологии/ А.В. Рождественский, А.И. Чеботарев. Л.: Гидрометеоздат, 1974. - 422 с.
- Румянцев В.А., Сулимов В.С. Об устойчивости эмпирических значений статистических параметров гидрологических процессов. Труды ГГИ, 1973, вып. 196, с.3-41
- СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик/ М. Госстрой России, 2004. - с.73.

ⁱ ASSESSMENT OF SELECTED PARAMETERS, THE ORDINATES OF THE PROBABILITY CURVES AND THEIR RANDOM ERRORS USING THE EXAMPLE OF THE HIGHEST LEVELS OF THE AMUR RIVER (A.G. Lobanova)

Considered are the issues of standard deviations of estimated values of the highest levels of various probabilities from the number of years and the asymmetry ratio from variation coefficients

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И МЕТОДИКА ПРОГНОЗА МАКСИМАЛЬНЫХ ЗАТОРНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ РЕКИ АМУР

Бузин В.А., Горошкова Н.И.

ФГБУ «ГГИ», Санкт-Петербург, goroshnat@yandex.ru

Рассматривается такое опасное природное явление как заторы льда и формирование обусловленных ими наводнений в бассейне р. Амур, а также особенности этого процесса в изучаемом бассейне и существующие подходы к прогнозу заторных максимумов. Предложена усовершенствованная методика прогноза максимальных заторных уровней для реки Амур

Наиболее сложные ситуации возникают на реках России весной, когда вследствие наличия ледяного покрова и сопровождающих его образование и разрушение процессов в сочетании с большой водностью этого периода, наблюдаются заторы льда. Являясь неотъемлемой частью весеннего половодья, заторные наводнения имеют совершенно иную природу, чем наводнения, связанные с прохождением по руслу волны паводка. Стеснение русла льдом и уменьшение его водопрпускной способности приводит к быстрому росту уровня воды выше очага затора. Убытки от заторных наводнений, наивысшие в году уровни при которых отмечаются на почти половине гидрологических постов, нередко составляют десятки миллиардов рублей (Против..., 2012).

Важной задачей является повышение эффективности прогнозов заторных наводнений в условиях современных изменений климата и антропогенных воздействий (Георгиевский и др., 1996; Шаночкин, 1991). Учет климатических и антропогенных факторов может повысить оправдываемость таких прогнозов на 5–15%.

Многолетний ряд количественной характеристики того или иного гидрологического явления считается однородным, если в течение всего рассматриваемого периода условия явления оставались неизменными (Методические...2010). Для проверки на однородность максимальных заторных уровней воды рек бассейна р. Амур их ряды делились на две части (две выборки n_1 и n_2). Оценка однородности выполнялась с помощью статистических критериев Стьюдента

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}} * \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (1)$$

и Фишера

$$F = S_1^2 / S_2^2, \quad (2)$$

где x - переменная величина, в данном случае уровень воды,

$$S_1^2 = \frac{1}{n_1 - 1} \sum_{1 \leq i \leq n_1} (x_{1i} - \bar{x}_1)^2 \text{ и } S_2^2 = \frac{1}{n_2 - 1} \sum_{1 \leq i \leq n_2} (x_{2i} - \bar{x}_2)^2 - \text{дисперсии.}$$

По заданному уровню значимости ($2\alpha = 5\%$) и числу степеней свободы ($n_1 + n_2 - 2$) из таблиц распределения критериев найдены критические значение $t_{кр}$ и $F_{кр}$. Если $t \leq t_{кр}$ и $F < F_{кр}$, то ряд однороден, и влияние климата на него незначительно.

Сопоставление рассчитанных значений статистик Стьюдента и Фишера с критическими табличными значениями показывает, что ряды максимальных заторных уровней с ненарушенной хозяйственной деятельностью режимом однородны (таблица 1). Потепление климата в северном полушарии Земли на них не повлияло. В створах, расположенных ниже впадения рек Зеи и Буреи, явно прослеживается влияние водохранилищ на этих реках.

Таблица 1 – Значения критериев Стьюдента (St) и Фишера (F) и коэффициентов линейных уравнений трендов максимальных заторных уровней воды реки Амур

Река-пункт	Периоды	Среднее значение	Дисперсия	Значения	Критерий		Коэффициент уравнения линии тренда	
		Нср, см			St	F	a_0	a_1
р. Амур – с. Джалинда	1948-1979	551	523	расчетное	0,14	1,15	598	-2,86
	1980-2011	543	454	критическое	1,67	1,15	548	-0,28
р. Амур – с. Кумара	1936-1981	394	170	расчетное	0,23	0,85	400	-0,254
	1982-2011	387	199	критическое	1,67	0,58	485	-6,34
р. Амур – с. Сергеевка	1934-1981	396	224	расчетное	0,30	0,91	404	-0,332
	1982-2011	385	245	критическое	1,67	0,58	483	-6,28
р. Амур – с. Нагибово	1937-1981	411	242	расчетное	0,39	1,81	404	0,257
	1982-2011	523	134	критическое	1,67	1,79	530	-0,420
р. Амур – г. Хабаровск	1948-1978	168	127	расчетное	0,003	1,27	174	-0,359
	1979-2011	167	100	критическое	1,67	1,82	175	-0,421
р. Амур – с. Тахта	1938-1979	487	54	расчетное	-0,18	0,81	507	-0,930
	1980-2014	490	67	критическое	1,67	0,58	497	-0,389

Вместе с тем, установлено, что на многих реках Дальнего Востока с началом потепления климата изменяются некоторые количественные показатели факторов процесса заторообразования, в частности – максимальный уровень воды при ледоставе и максимальная за зиму толщина ледяного покрова. В результате этого при сохранении в целом однородности рядов максимальных заторных уровней воды рек происходит нарушение существующих прогностических зависимостей (в основном линейных) ввиду изменения детерминированных вкладов аргументов.

Вскрытие р. Амур сопровождается образованием заторов льда вследствие своеобразия формирования весеннего половодья в его бассейне (Каталог..., 1978). Ледоход проходит при низких уровнях, так как снежный покров на водосборе реки невелик, а грунтовое питание в значительной мере задерживается мерзлотными процессами. Поэтому весенними паводками не обеспечивается льдотранспортирующая способность потока, достаточная для свободного движения льда большой толщины и прочности.

Начинается вскрытие в средней части реки, которая характеризуется наибольшей приточностью, и отсюда оно распространяется вверх и вниз по течению. В соответствии с распределением толщины льда по длине реки, наиболее мощные заторы льда образуются на Верхнем Амуре. Значительное стеснение русла создает здесь заторные подъемы высотой 8–9 м.

На Среднем Амуре заторы не отличаются ни мощностью, ни устойчивостью, их повторяемость относительно невелика. Однако в отдельные годы их максимальные уровни достигают 5 м. На Нижнем Амуре стеснение русла льдом уменьшается, заторные подъемы уровня уменьшаются, а их максимумы не превышают 3,5 м (таблица 2).

Таблица 2. — Максимальные уровни воды р. Амур в период ледовых явлений

Река	Пункт	Расстояние от устья, км	Отметка нуля поста, м БС 77	Максимальные уровни воды над нулем поста, см			
				годовой	год	лдж	год
Амур	с. Сергеевка	2015	133,18	961	1958	954*	1960
Амур	г. Благовещенск	1941	119,88	895	1958	561	1930
Амур	с. Гродеково	1921	114,63	1202	1958	905	1950
Амур	с. Константиновка	1831	107,64	930	1984	661	1943
Амур, протока Покровская	с. Поярково	1773	101,90	875	1928	575	1930
Амур	с. Иннокентьевка	1641	87,52	1090	1928	828	1988
Амур	с. Пашково	1533	72,50	1803	1984	1269	1941
Амур	с. Екатерино-Никольское	1366	56,62	1138	1928	737	1941
Амур	с. Нагибово	1313	50,88	1202	2013	837	1985
Амур	с. Ленинск	1190	42,94	1044	2013	705	2013
Амур, протока Нижнепасская	с. Нижнепасское	1012	34,11	710	2013	340	1988
Амур, протока Амурская	с. Казакевичево	1004	27,88	1296	2013	936	1973
Амур	г. Хабаровск	966	30,69	808	2013	529*	1915
Амур	г. Хабаровск (гст)	962	24,10	1010	2013	1040	1973
Амур	с. Елабуга	875	25,49	756	2013	563	1988
Амур	с. Троицкое	770	20,52	610	2013	460	1973
Амур	с. Малмыж	707	16,89	794	2013	519	1973
Амур	г. Комсомольск-на-Амуре	614	12,93	912	2013	599	1973
Амур	с. Нижнетамбовское	514	8,18	1016	2013	888*	1957
Амур	с. Циммермановка	407	5,11	835*	1957	835*	1957
Амур	с. Мариинское**	326	3,33	662	2013	569	1957
Амур	с. Богородское	228	1,36	651	2013	604	1973
Амур	с. Тахта	123	-2,10	708*	1957	708*	1957
Амур	г. Николаевск	48	-1,10	417	1957	417	1957

Примечание: лдж — в период весеннего ледохода; * — уровни воды заторного происхождения; ** — нет данных о максимальных уровнях воды в 2013 г, максимальные годовые значения уровня воды восстановлены

Заторные явления отмечаются практически на всех реках бассейна Амура, наиболее мощные — на реках Шилка, Аргунь и Усури; на последней заторные максимумы достигают 6 м.

При формировании ледостава на р. Амур характерно образование зажоров, однако образующиеся при этом максимальные уровни воды, не приводя к наводнениям, оказывают влияние на весенние процессы (Бузин, 2004).

Формирование устойчивого ледостава на Верхнем и Нижнем Амуре происходит примерно в одинаковые календарные сроки и несколько позже — на Среднем Амуре.

Образованию заторов льда, обуславливающих максимальные весенние уровни воды на р. Амур, способствуют большая толщина ледяного покрова (100–140 см), быстрый сброс (благодаря горному рельефу) талых вод в речную сеть и многочисленные препятствия в русле для продвижения льда.

При прогнозе наводнений, обусловленных заторами льда, обычно учитывают следующие показатели процесса заторообразования (Руководство..., 1989):

- максимальный уровень в начале ледостава ($H_{лс}$), характеризующий мощность скопления шуги в русле, у верхней границы которого весной формируется затор;
- расход (уровень) воды у перемещающейся вниз по течению реки кромки ледяного покрова ($Q_{кр}$), который является характеристикой сил, развиваемых водным потоком в зоне торошения льда;
- максимальная за зиму толщина ледяного покрова на участке образования затора и ниже по течению;
- температура воздуха в период весеннего таяния льда и при образовании.

Средняя разница между максимальными уровнями ледохода и максимальными годовыми уровнями воды в Амуре возрастает от с. Сергеевка до с. Пашково и уменьшается вниз по течению реки. В результате максимальные уровни воды в период ледохода у с. Сергеевка и г. Благовещенска сопоставимы по абсолютным отметкам с максимальными годовыми уровнями воды (рисунок 1а). Соотношение дат прохождения основной волны половодья и фронта вскрытия определяет возможность формирования максимальных уровней воды в период ледохода или в более отдаленные сроки. На участке реки между с. Иннокентьевка и с. Ленинск уровни воды в период ледохода существенно ниже максимальных годовых уровней (рисунок 1б). В нижнем течении реки максимальные годовые и максимальные уровни воды в период ледохода часто совпадают и даже превышают уровни дождевых паводков (рисунок 1в).

На участках реки, для которых максимальные ледоходные уровни воды ниже максимальных годовых, вода редко выходит на пойму в период весенних ледовых явлений.

Интенсивность процесса заторообразования по длине реки неодинакова. Особенно мощные заторы присущи Верхнему (с. Покровка – г. Благовещенск) и Нижнему (г. Хабаровск – с. Тахта) Амuru. Иногда они причиняют значительный материальный ущерб. На Среднем Амуре, который вскрывается снизу вверх по течению, заторы небольшой мощности наблюдаются только в отдельные годы.

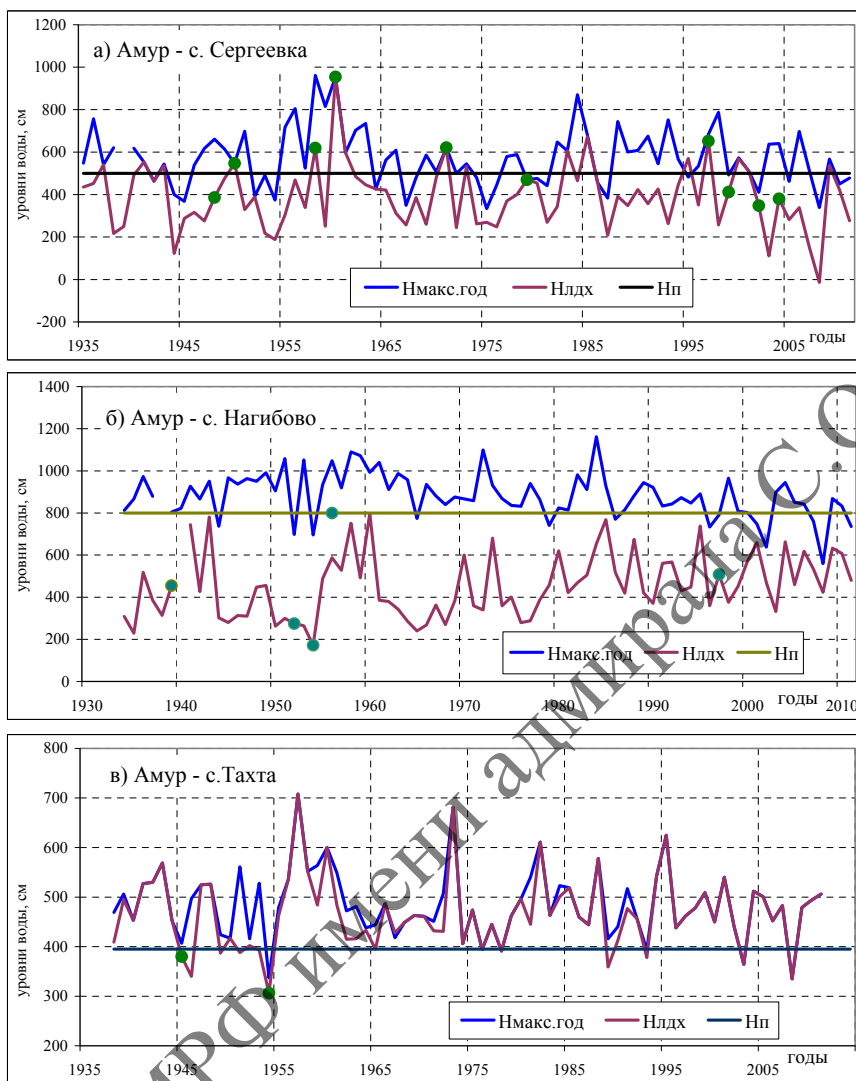


Рисунок 1 — Изменение максимальных годовых (Hмакс.год), ледоходных (Hлдж) и заторных (Hзтр) уровней воды (Hп — уровень выхода воды на пойму), ● - Hзтр

Гидрологический режим р. Амур существенно изменился после введения в строй Зейской (1978 г.), а затем и Бурейской ГЭС (2009 г.). С 1980 г. особенно существенно изменился режим уровней в осенний и зимний период, что связано с пусками воды из водохранилища (Рождественский и др., 2004). С началом работы Зейской ГЭС существенно выросли максимальные зимние расходы и уровни воды Среднего и даже Нижнего Амура, что в свою очередь привело к увеличению интенсивности образования внутриводного льда, шуги и зажоров, которые могут угрожать стабильной работе водозаборов и других хозяйственных объектов. В мае

при заполнении водохранилища расходы воды уменьшаются. Разнонаправленное изменение этих двух главных факторов заторообразования – максимальных зимних уровней и весенних расходов воды – сказались на условиях образования заторов, однако значительного снижения максимальных заторных уровней не отмечено (см. рисунок 1).

Влияние условий замерзания реки и весенней водности на формирование максимальных уровней воды реки Амур при его вскрытии учитывается во всех существующих к настоящему времени методиках прогноза максимальных ледоходных (заторных) уровней, как используемых в Дальневосточном УГМС, так и в методике, разработанной в 1980 году в ГГИ (Бузин и Шаночкин, 1985).

Для изучения влияния климатических факторов на условия заторообразования были использованы данные по гидрометрическим створам с наиболее полным объемом информации (таблица 3). Периоды наблюдений в этих створах превышают 25 лет.

Максимальные ледоходные (заторные) уровни воды р. Амур зависят в основном от осеннего и весеннего факторов процесса заторообразования. На некоторых участках реки вклад первого фактора настолько велик, что может быть использован для разработки методики долгосрочного прогноза максимальных уровней в период весеннего половодья. Например, на Амуре и Шилке имеют место настолько тесные связи между H_z и $H_{лс}$ (таблица 3), что они могут использоваться для долгосрочного прогноза заторного максимума уровня с заблаговременностью несколько месяцев.

Таблица 3 – Парные коэффициенты корреляции между максимальными ледоходными (заторными) уровнями воды Амура и уровнями в начале ледостава

Пункт	$r_{H_z, H_{лс}}$	Пункт	$r_{H_z, H_{лс}}$
с. Покровка	0,78	с. Троицкое	0,68
с. Черняево	0,63	г. Комсомольск	0,68
с. Кумара	0,68	с. Нижнетамбовское	0,64
с. Сергеевка	0,71	с. Сухановка	0,68
с. Казакевичево	0,69	с. Богородское	0,73
г. Хабаровск	0,60	с. Воскресенское	0,75
с. Елабуга	0,66	с. Тахта	0,71

Прогнозное уравнение имеет вид

$$H_{лс} = a_0 + a_1 H_z, \quad (3)$$

где a_0 и a_1 – коэффициенты уравнения регрессии, значения которых для пяти участков Амура приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения коэффициентов a_0 и a_1 в прогностическом уравнении (3) и сведения об эффективности прогнозов

Пункт на Амуре	a_0	a_1	Средняя квадратическая погрешность прогнозов (s), см	$\frac{s}{\sigma}$	Допустимая погрешность прогноза, см	Средняя заблаговременность, месяцы
с. Покровка	180	2,18	123	0,63	132	5,6
с. Сергеевка	277	2,00	108	0,70	103	5,6
с. Богородское	262	0,852	84	0,69	82	5,9
с. Воскресенское	230	0,868	66	0,66	67	5,9
с. Тахта	231	0,786	52	0,69	50	6,0

Коэффициенты уравнения (3) устанавливались по срочным значениям уровня $H_{лх}$ и среднесуточным значениям уровня $H_{лс}$. При составлении прогноза максимальный уровень воды при ледоставе определяется по графику или таблице ежедневных уровней воды.

При разработке методики установлено, что на Амуре уровни $H_{лх}$ имеют заторное происхождение, если они превышают отметку 575 см у с. Покровка, 450 см – у с. Сергеевка, 175 см – у с. Богородское, 205 см – у с. Воскресенское и 330 см – над нулем поста у с. Тахта.

Для участков на р. Амур с. Покровка – с. Сергеевка и с. Богородское – с. Тахта путем совместного учета осеннего и весеннего факторов процесса заторообразования установлена следующая прогностическая зависимость:

$$H_{лх} = a_0 + a_1 H_{лс} + a_2 H_Q \quad (4)$$

где H_Q – уровень, характеризующий водность реки в период ледохода и определённый методом графической срезки.

На участке Амура от г. Хабаровска до с. Сухановка скопления шуги, сформировавшиеся осенью, весной частично размываются тёплыми водами, поступающими со среднего течения реки, а также его притоков – Усури и Сунгари, – в связи с чем на этом участке Амура максимальные за период ледохода уровни воды более точно прогнозируются с помощью выражения:

$$H_{лх} = a_0 + a_1 H' + a_2 H_Q \quad (5)$$

где H' – средний суточный уровень воды на дату составления прогноза (см. ниже). Он является показателем степени стеснения русла льдом накануне вскрытия. Значения коэффициентов a_0 , a_1 и a_2 в уравнениях (4) и (5) приводятся в таблице 5.

Таблица 5 – Значения коэффициентов a_0 , a_1 и a_2 в прогностических уравнениях (4) и (5) и сведения об эффективности методик прогнозов в 1948–1980 гг.

Пункт	Уравнение (4)			Уравнение (5)			Средняя квадратическая погрешность прогноза s , см	$\frac{s}{\sigma}$	$\frac{s}{\sigma_{\Delta}}$	Допустимая погрешность прогноза, см	Средняя заблаговременность прогнозов, сутки
	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2					
с. Покровка	55	0,564	1,81				109	0,56	0,67	110	5
с. Джалинда	-185	1,71	1,31				151	0,67	0,60	151	6
с. Черняево	156	0,846	0,303				87	0,66	0,57	88	8
с. Кумара	40	0,826	0,581				67	0,56	0,51	79	10
с. Сергеевка	40	1,22	0,822				90	0,59	0,62	98	10
г. Хабаровск				341	1,02	1,16	49	0,43	0,69	48	12
с. Елабуга				268	1,00	1,06	51	0,44	0,57	61	15
г. Комсомольск				467	1,27	1,63	79	0,57	0,68	78	20
с. Суханово				789	0,95	1,80	97	0,57	0,62	106	26
с. Богородское	181	0,873	0,759				73	0,59	0,63	83	29
с. Воскресенское	164	0,556	0,755				61	0,61	0,63	66	31
с. Тахта	-23	0,833	0,709				48	0,61	0,60	53	33

Принимая во внимание значительную протяжённость Амура и его притоков, величину H_Q , необходимую для составления прогноза по уравнениям (4) и (5), можно предвычислить на основе данных гидрометрических наблюдений в верхней части речного бассейна. С учётом того, что волна половодья на Верхнем Амуре формируется за счёт выноса масс воды из рек Аргунь и Шилка, а на Нижнем – из Сунгари и Уссури, для прогноза показателя весенней водности H_Q установлены следующие зависимости:

$$H_Q = a_0 + a_1 H_{ш} + a_2 I_{ш} + a_3 H_A, \quad (6)$$

для Верхнего Амура и

$$H_Q = a_0 + a_1 H_V + a_2 I_V, \quad (7)$$

для Нижнего Амура.

В формулах (6) и (7): $H_{ш}$ и $I_{ш}$ - уровень и интенсивность подъёма уровня воды р. Шилка в первый день ледохода у г. Сретенск;

H_A - уровень р. Аргунь в этот день у с. Олоча; H_V и I_V - уровень и интенсивность подъёма уровня воды р. Уссури в первый день ледохода у г. Лесозаводск.

Значения коэффициентов линейных зависимостей (6) и (7) приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Значения коэффициентов a_0 , a_1 , a_2 и a_3 в прогностических уравнениях (6) и (7)

Пункт	Уравнение (6)				Уравнение (7)		
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_0	a_1	a_2
с. Покровка	43	1,52	- 1,29	0,425			
с. Джалинда	88	1,33	- 1,13	0,373			
с. Черняево	16	1,48	- 1,26	0,415			
с. Кумара	88	1,44	- 1,22	0,405			
с. Сергеевка	36	1,17	- 1,00	0,329			
г. Хабаровск					- 212	1,05	- 1,87
с. Елабуга					- 107	0,966	- 1,72
г. Комсомольск					- 159	1,12	- 1,99
с. Суханово					- 189	1,12	- 2,00
с. Богородское					- 118	0,931	- 1,66
с. Воскресенское					- 57	0,836	- 1,49
с. Тахта					211	0,544	- 0,968

Прогноз по уравнениям (3–7) составляется в следующем порядке. На дату выпуска прогноза (для Верхнего Амура – это день вскрытия Шилки у Сретенска, а для Нижнего Амура – день вскрытия Уссури у Лесозаводска) выписываются исходные данные:

- максимальные за первую ледостава уровни воды в расчетных створах;
- уровни и интенсивности подъема уровней в первый день ледохода на р. Шилка у г. Сретенск и на р. Уссури у г. Лесозаводск.

Затем по формулам (6) и (7) предвычисляются уровни H_Q . И, наконец, с помощью выражений (4) и (5) предсказываются максимальные за период весеннего ледохода уровни воды (H_n). Они будут заторного происхождения, если подъем уровня за счёт ледовых явлений, выражаемый разностью H_n и H_Q , превысит подъем воды при простой остановке льдин без торошения, который рассчитывается по формуле

$$\Delta H = h_Q \left[1,07 \frac{(n_l^2 + n_p^2)^{0,3}}{n_p^{0,6}} - 1 \right] + h_l, \quad (8)$$

где h_Q – глубина реки, соответствующая уровню H_Q ; n_l – шероховатость нижней поверхности ледяного покрова ($n_l = 0,015$); n_p – шероховатость русла без льда; h_l – толщина ледяного покрова при вскрытии реки.

Оценка оправдываемости разработанной в 1980 году методики прогнозов (Бужин и Шапочкин, 1985) выполнена по двум критериям: отношению средней квадратической погрешности прогнозов (s) к вариации предсказываемого уровня (σ) и к вариации изменения уровня за период заблаговременности прогноза (σ_A).

Отношения $\frac{s}{\sigma}$ и $\frac{s}{\sigma_{\Delta}}$ не превышают 0,7 (см. таблицу 5). Таким образом, разработанная методика была эффективна до начала работы Зейской ГЭС. Затем её эффективность начала уменьшаться ввиду изменения условий формирования стока воды в Амуре зимой и весной. Несмотря на это, методика использовалась для прогнозов максимальных заторных уровней воды Амура в УГМС Дальнего Востока до 1986 г., когда были изменены нули ряда гидрологических постов на Амуре, что неизбежно сказалось на значениях коэффициентов линейных уравнений (4-5). Для трёх участков Амура эти коэффициенты были пересчитаны, и составлены прогнозы за период 1990-2011 гг. Их оправдываемость уменьшилась (таблица 7), особенно для Нижнего Амура. С учётом этого обстоятельства возникает необходимость доработки методики при сложившихся новых условиях процесса формирования заторов льда.

Таблица 7 – Оправдываемость краткосрочных прогнозов максимальных заторных уровней воды р. Амур

Пункт	Ноль графика поста, м БС	Оправдываемость (%) в период	
		1948-1980 гг.	1990-2011 гг.
с. Покровка	301,99	77	72
с. Джалинда	250,94	80	74
с. Сергеевка	133,18	81	74
г. Комсомольск	12,93	74	69
с. Тахта	2,10	70	58

Основные выводы.

1. На реках бассейна р. Амур достаточно часто наблюдаются такие опасные ледовые явления, как заторы льда. Хотя заторные наводнения и кратковременны (до 10 суток), ущерб от них, как правило, намного больше ущерба от наводнений периода свободного русла.

2. Повышение в последние 30 лет средней годовой и, особенно, средней зимней температуры воздуха, приводящее к уменьшению толщины ледяного покрова, не снижает величины максимальных заторных уровней на участках рек с естественным режимом. Таким образом, угроза заторных наводнений в ближайшем будущем сохраняется.

3. Климатические изменения увеличивают погрешность прогноза максимальных заторных уровней воды, поэтому в прогностические зависимости следует вносить соответствующие поправки.

4. Методики прогнозов, в основе которых лежат зависимости, установленные статистическим путем, нуждаются в уточнении, особенно после лет с экстремальными условиями заторообразования. Использовать их можно, пересчитывая входящие в них коэффициенты.

Список литературы

- Бузин В.А. (2004): Заторы льда и заторные наводнения на реках. – С.-Пб., Гидрометеиздат, с. 120-127.
- Бузин В.А., Шаночкин С.В. (1985): Прогнозы максимальных заторных уровней воды рек Амур и Уссури. – Труды ГГИ, вып. 309, с. 44-52.
- Георгиевский В.Ю., Ежов А.В., Шалыгин А.Л., Шикломанов И.А., Шикломанов А.И. (1996): Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР. – Метеорология и гидрология, № 11, с. 89-99.
- Каталог заторных и загорных участков рек СССР (1978); т.2. Азиатская часть СССР. - Л.: Гидрометеиздат. – 288 с.
- Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным (2010) – С.-Пб., изд-во «Нестор-История». – 176 с.
- Против водной стихии. Инженерные защитные сооружения в Республике Саха (Якутия) (2013). И. М. Андросов [и др.]. - Якутск: Бичик. – 119 с.: ил.
- Рождественский А.В., Лобанов В.А., Бузин В.А. (2004): Оценка влияния Зейского гидроузла на зимний уровеньный режим р. Амур у г. Хабаровск. – Сб. работ по гидрологии, № 27, с.122-134.
- Руководство по гидрологическим прогнозам (1989). – Л.: Гидрометеиздат, вып. 3. –168 с.
- Шаночкин С.В. (1991): Оценка изменений сроков основных фаз ледового режима в связи с изменением климата. Труды ГГИ, вып. 354, с. 69-74.

¹ FEATURES OF FORMATION AND METHOD OF PREDICTING HIGHEST ICE-JAM STAGES IN THE AMUR RIVER (*V.A. Buzin, N.I. Goroshkova*)

Considered are natural hazards such as ice jams and resulting floods in the Amur River basin as well as specific features of this process in the study basin and existing approaches to predicting maximum ice jam stages. An improved technique is proposed to predict maximum ice jam stages in the Amur River

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СТОКА В БАССЕЙНЕ РЕКИ АМУР НА ПЕРСПЕКТИВУ ДО 2020 И 2050 ГОДОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

Георгиевский М.В., Голованов О.Ф.

ФГБУ «ГГИ», Санкт-Петербург, mgeorgievsky@hotmail.com

В статье приводятся оценки вероятного изменения речного стока в бассейне р. Амур с учетом изменения климата на перспективу 2020 и 2050 г., выполненные на основе использования данных по речному стоку проекта CMIP5 IPCC (МГЭИК). Проанализировано, какая информация по речному стоку предоставляется моделями общей циркуляции атмосферы и океана. Выполнен сравнительный анализ расчетных схем речного стока более чем 30 МОЦАО. Представлена методика прогнозирования изменений речного стока путем ансамблевого осреднения на основе современных сценариев выбросов парниковых газов (RCP 4.5/RCP8.5)

1. Речной сток в МОЦАО

Практическое решение проблемы прогнозирования климата стало возможным благодаря развитию математического моделирования. Это, в первую очередь, обусловлено усилиями коллективов, занимающихся разработкой и применением глобальных численных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), объединенных в рамках проекта сравнения объединенных моделей CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), выполняемого под эгидой Всемирной программы исследования климата WCRP (World Climate Research Programme).

В настоящей статье приводится прогноз изменения годового стока в бассейне реки Амур на перспективу 2020 и 2050 гг., выполненный на основе данных климатических моделей, представленных в рамках 5-й фазы проекта сравнения объединенных моделей CMIP5 (WCRP..., 2011).

Проект CMIP5 объединяет более 60 МОЦАО, разрабатываемых в ведущих мировых научных центрах, отобранных для подготовки 5-го Оценочного доклада Межправительственной группы ученых по изменению климата (МГЭИК).

Современные МОЦАО обычно представляют из себя комплекс нескольких моделей климатических систем, взаимодействующих между собой: 1) атмосфера - газовая оболочка Земли сложного состава (кислород, азот, углекислый газ, водяной пар, озон и т.д.), воздействующая на перенос к поверхности Земли солнечной радиации, поступающей на ее верхнюю границу, и являющаяся наиболее изменчивой составляющей рассматриваемой системы; 2) океан - главный водный резервуар в системе, состоящий из соленых вод Мирового океана и прилегающих к нему морей, поглощающий основную часть поступающей на его поверхность солнечной радиации и

представляющий собой, благодаря высокой теплоемкости воды, мощный аккумулятор энергии; 3) суша - поверхность континентов с ее гидрологической системой (внутренние водоемы, болота и реки) и почва (в том числе с грунтовыми водами); 4) криосфера - континентальные и морские льды, горные ледники, снежный покров и криолитозона («вечная мерзлота»); 5) биота — растительность на суше и в океане, а также живые организмы в воздухе, море и на суше, включая человека.

Расчет стоковой составляющей в МОЦАО осуществляется в климатической системе «Земная поверхность». Исходной метеорологической информацией для расчета речного стока являются данные, предоставляемые блоком «Атмосфера». В стандартизированный, для всех существующих МОЦАО, набор расчетных переменных блока «Земная поверхность» входит два параметра, характеризующие поверхностный речной сток: $mrros$ и $mrro$ • (http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/IPCC_output_requirements.htm).

mrros (англ. *surface runoff flux*) – поверхностный сток. Является среднемесячной переменной, входящей в «базовый набор» стандартизированных расчетных параметров глобальных климатических моделей общей циркуляции атмосферы и океана. Данный модельный параметр выражает поверхностный речной сток, формирующийся в расчетной ячейке модели и предоставляемый в размерности $кг \times м^{-2} \times с^{-1}$.

mrro (англ. *total runoff flux*) – общий сток. Имеет аналогичную размерность с $mrros$. Основное отличие $mrro$ от $mrros$ заключается в том, что $mrro$ дополнительно учитывает сток, дренирующий толщу почвенного покрова.

В таблице 1 представлен сравнительный анализ значений поверхностного и общего стока, представляемых параметрами $mrros$ и $mrro$, соответственно. Анализ осуществлялся путем сопоставления значений $mrros$ и $mrro$ между собой, а также сравнением этих значений с фактическим стоком крупнейших рек Российской Федерации. Сток $mrros$ и $mrro$ рассчитывался путем ансамблевого осреднения. В качестве исходного ансамбля был выбран ансамбль из 29 моделей проекта CMIP5, которые предоставляли полный набор смоделированных данных как по $mrros$, так и по $mrro$ за исторический и все прогнозные модельные прогоны.

Как видно из таблицы, если анализировать осредненные для 7 водосборов значения, сток полученный по $mrros$ на более чем 40% занижен по сравнению с фактическим, в то время как $mrro$ -сток близок к фактическому. Принимая во внимание тот факт, что по своему определению общий, или как его еще называют – суммарный сток, наиболее близко соответствует понятию фактического речного стока, а также, что сравнительный анализ, представленный в таблице 1, продемонстрировал, что в целом для территории РФ значения $mrro$ -стока более близки к

наблюденным, а m_{TGO} сильно занижены, было принято решение для дальнейшего анализа использовать данные m_{TGO} .

Таблица 1 – Значения стока, рассчитанные путем ансамблевого осреднения данных 29 МОЦАО для параметров m_{TGO} и m_{TGOs} , по сравнению с фактическим стоком крупнейших рек РФ.

№	Река - пост	Фактический сток (1981-2000), мм	Смоделированный ансамблем 29 МОЦАО сток (1981-2000), мм		Разница (фактический - смоделированный), мм	
			m_{TGO}	m_{TGOs}	m_{TGO}	m_{TGOs}
1	Нева - устье	286	314	170	-28	116
2	Печера - устье	423	239	143	184	280
3	Северная Двина - устье	304	312	184	-8	120
4	Волга - Верхнее Лебяжье	191	236	147	-45	44
5	Обь - Салехард	136	172	126	-36	10
6	Лена - устье	225	214	140	11	85
7	Енисей - устье	247	218	147	29	100
Среднее		259	243	151	16	108

В таблице 2 приводятся основные схемы расчета речного стока в МОЦАО, данные по которым были использованы в настоящей статье.

В семействе китайской модели климатических систем BCC, разрабатываемой в Пекинском климатическом центре для расчета процессов происходящих в климатической системе “Земная поверхность”, используется модель BCC AVIP1.0. За основу для создания AVIP1.0 были взяты обобщенная земная модель (версия 3) Национального центра атмосферных исследований США, NCAR CLM3 (Community Land Model) и модель взаимодействия Атмосфера-Растительность AVIM (Atmosphere-Vegetation Interaction Model) (Tongwen et al., 2013). За схему расчета речного стока в CLM3 принята упрощенная концептуальная форма гидрологической модели TOPMODEL (Oleson et al., 2004).

TOPMODEL была разработана К. Бевеном и М. Киркби в 1979 г. (Beven and Kirkby, 1979). Как видно из таблицы 2 схема параметризации речного стока на основе упрощенных версий TOPMODEL является наиболее популярной в современных МОЦАО.

Например, китайские модели FGOALS-g2 и FIO-ESM, аналогичные моделям BCC, используют CLM3. Американские модели CCSM4, CESM1-BGC и CESM1-WACCM, а также норвежские NorESM1-M и NorESM1-ME, используют следующую версию общей земной модели CLM4, где используется все та же упрощенная версия TOPMODEL (Oleson et al., 2010), которая получила название SIMTOP.

Другая китайская климатическая модель BNU-ESM для расчета процессов происходящих в сфере деятельности земной поверхности использует простую модель земли CoLM (Common Land Model) (Dai et al., 2003). В CoLM сток рассчитывается как поверхностный, так и базисный, каждый отдельно над насыщенной и ненасыщенной областями. Фракция насыщенной области зависит от состояния влажности почвы, которое в свою очередь зависит от уровня грунтовых вод и топографических особенностей. Поверхностный сток параметризуется как комбинация потока через насыщенный грунт и поверхностного стока BATS-типа, т.е. схема обмена Биосфера-Атмосфера (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme), подробно описанная в (Yang and Dickinson, 1996), и является пропорциональным поверхностной влажности почвы в ненасыщенной фракции. Формирование базисного стока включает в себя три различных механизма: русловой дренаж, сток, сформированный при насыщении почвы и перетекания подземного стока из-за местных уклонов.

Канадская модель CanESM2 использует канадскую схему земной поверхности CLASS (Canadian Land Surface Scheme) версии 2.7 (Lambert et al., 2013). Почва в CLASS 2.7 представлена в виде трех слоев, дополнительно учитывается формирование снежного покрова, влияние растительности на баланс системы «осадки-испарение», а также инфильтрация воды в пористый грунт. Схема расчета речного стока включает в себя оценку поверхностного и подземного стока. Подземный сток рассчитывается как вода, дренирующая верхний слой почвы, а поверхностный сток формируется после превышения поверхности слоя инфильтрации.

Модель земной поверхности SILVA, используемая семейством итальянской климатической модели CMCC, моделирует гидрологические изменения между почвой, растительностью и атмосферой на основе гидрологического модуля SECHIBA, подробное описание которого можно найти в (Guimberteau et al., 2012). Модуль SECHIB был разработан во французском институте Пьер-Симон Лапласа (Pierre Simon Laplace Institute) для модели земной поверхности ORCHIDEE (ORganising Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms) семейства MOЦАО IPSL.

Другая французская модель CMRM-CM5 для расчета стока использует интерфейс SURFEX (Voltaire et al., 2013), который рассчитывает изменение во времени поверхностной энергии и водного баланса с помощью комбинированного почва-растительность-снег подхода. В результате, смоделированный в каждой ячейке общий сток (поверхностный + подземный) с помощью глобальной модели речной сети TRIP (Total Runoff Integrating Pathways), разработанной в Токийском университете Т. Оки и Ю. Садам (Oki and Sud, 1998), конвертируется в речной суточный сток.

В австралийской CSIRO-Mk3.6.0 блок “земная поверхность” является частью глобальной климатической модели общей циркуляции атмосферы AGCM (Atmospheric General Circulation Model). Оценка речного стока осуществляется по простой схеме: сток с узлов сетки,

располагающихся на земной поверхности, сформированный осадками, перемещается в соседнюю ячейку на основе заранее рассчитанной схемы уклонов с учетом временной задержки. Более детальное описание схемы расчета речного стока в CSIRO-Mk3.6.0 приводится в (Gordon et al., 2010).

ФГУП ВО "ТУМРФ имени адмирала С.О. Макарова"

Таблица 2 – Схемы расчета речного стока в МОЦАО, которые были отобраны для анализа.

№	Научный центр (страна)	Организация	Модель	Блок климатической системы "Земная поверхность"	Расчет речного стока	Горизонтальное разрешение	Литература
1	BCC (Китай)	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	BCC-CSM1.1	BCC AVIP 1.0	упрощенная TOPMODEL	2.8125° × 2.8125°	(Tongwen et al., 2013), (Oleson et al., 2004)
2			BCC-CSM1.1(m)			1.125° × 1.125°	
3	BNU (Китай)	College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University	BNU-ESM	CoLM+BNUDGVM (C/N)		2.8125° × ~2.8125°	(Dai et al., 2003), (Yang and Dickinson, 1996)
4	CCCma (Канада)	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	CanESM2	CLASS 2.7 + CTM1		2.81° × 2.81°	(Lambert et al., 2013), (Verseghy, 2009)
5	NCAR (США)	National Center for Atmospheric Research	CCSM4	CLM4	SIMTOR (упрощенная версия TOPMODEL)	1.25° × 0.95°	(Oleson et al., 2010)
6	NSF-DOE-NCAR (США)	Community Earth System Model Contributors	GESM1-BGC	CLM4	SIMTOR (упрощенная версия TOPMODEL)	1.25° × 0.95°	(Oleson et al., 2010)
7			GESM1-WACCM				
8	CMCC (Италия)	Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici	CMCC-CM	SILVA	SECHIBA	~1.87° × 1.87°	(Guimberteau et al., 2012)
9			CMCC-CMS				
10	CNRM-CERFACS (Франция)	Centre National de Recherches Meteorologiques	CNRM-CM5	ISBA	SURFEX + TRIP	~1.4° × 1.4°	(Voldoire et al., 2013), (Oki and Sud, 1998)
11	CSIRO-QCCCE (Австралия)	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queens land Climate Change Centre of Excellence	CSIRO-Mk3.6.0	Land Surface Model (часть AGCM)		~1.87° × 1.87°	(Gordon et al., 2002), (Gordon et al., 2010)
12	LASG-CES (Китай)	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; and CESS, Tsinghua University	FGOALS-g2	CLM3	упрощенная TOPMODEL	2.81° × 1.67°	(Oleson et al., 2004)
13	FIO (Китай)	The First Institute of Oceanography, SOA, China	FIO-ESM	CLM3	упрощенная TOPMODEL	2.8125° × ~2.8125°	(Oleson et al., 2004)
14	NOAA GFDL (США)	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	GFDL-ESM2G	LM3		2.5° × 2.0°	(Jeong et al., 2012), (Shevliakova et al., 2009)
15			GFDL-ESM2M				
16			GFDL-CM3				
17	INM (Россия)	Institute for Numerical Mathematics	INM-CM4	L5M/ICM/G SB RAS	Модифицированная TOPMODEL	2.0° × 1.5°	(Дымыков, Лысков, Володин, 2012)

Продолжение таблицы 2

18	MIROC (Япония)	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine- Earth Science and Technology	MIROC5	MATSIRO	упрощенная TOPMODEL	$1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$	(Takata., Emori and Watanabe, 2003), (Watanabe et al., 2010)
19			MIROC-ESM				
20	MIROC (Япония)	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies	MIROC-ESM-CHEM	MATSIRO + SEIB-DGVM	упрощенная TOPMODEL	$\sim 2.8125^{\circ} \times 2.8125^{\circ}$	(Takata., Emori and Watanabe, 2003), (Watanabe et al., 2011)
21			MPI-ESM-LR				
22	MPI-M (Германия)	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	MPI-ESM-MR	JSBACH	BETHY	$\sim 1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$	(Haese, Werner, and Lohmann, 2013), (Knorr, Lakshmi, 2013)
23	MRI (Япония)	Meteorological Research Institute	MRI-CGCM3		HAL	$1.12^{\circ} \times 1.12^{\circ}$	(Yukimoto et al., 2012)
24			NorESM1-M				
25	NCC (Норвегия)	Norwegian Climate Centre	NorESM-ME	CLM4		$\sim 2.5^{\circ} \times 1.9^{\circ}$	(Oleson et al., 2010)
26			GISS-E2-H				
27	NASA GISS (США)	NASA Goddard Institute for Space Studies	GISS-E2-H-CC	MODEL II-LS	MODEL II-LS	$2.5^{\circ} \times 2.0^{\circ}$	(Schmidt et al., 2006), (Rosenzweig and Abramopoulos, 1997)
28			GISS-E2-R				
29			GISS-E2-R-CC				
30			IPSL-CM5A-LR			$3.75^{\circ} \times 1.875^{\circ}$	
31	IPSL (Франция)	Institut Pierre-Simon Laplace	IPSL-CM5A-MR	ORCHIDE	SECHIBA	$2.5^{\circ} \times 1.26^{\circ}$	(Guimberteau et al., 2012)
32			IPSL-CM5B-LR			$3.75^{\circ} \times 1.875^{\circ}$	

Модель земли LM3 разработанная Национальным управлением по исследованию океанов и атмосферы США (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) для климатических моделей семейства GFDL состоит из двух основных компонентов: модели земной поверхности и глобальной динамической модели растительности. Модель земной поверхности включает биофизику растительного покрова, экосистемный обмен CO₂, термодинамику и гидрологию почва/снег, а также радиационный обмен (Jeong et al., 2012). В последнюю версию LM3 включены новые гидрологические особенности: динамика замершей почвы, параметризация глубины залегания уровня грунтовых вод, а также питание рек грунтовыми водами на основе гидравлических допущений и топографической информации о поверхности земли.

Единственная российская модель INC-СМ4 (Дымников, Лысоков, Володин, 2012), разрабатываемая в институте вычислительной математики РАН, за основу расчетной схемы речного стока модели земной поверхности, аналогично большинству МОЦАО, представленных в таблице 2, использует модифицированную концепцию TOPMODEL.

Климатические модели MIROC, разрабатываемые в стране восходящего солнца, в качестве блока земной поверхности используют собственную разработку под названием MATSIRO (Minimal Advanced Treatments of Surface Interaction and RunOff) (Takata, Emori and Watanabe, 2003). Аббревиатуру MATSIRO можно перевести как минимально углубленное рассмотрение взаимодействия поверхности земли и речного стока. Основой для расчета стока в MATSIRO является все та же упрощенная TOPMODEL.

Модели института метеорологии Макса Планка MPI-ESM используют Йенскую схему взаимодействия Биосфера-Атмосфера JSBACH (Jena Scheme for Biosphere-Atmosphere Interaction in Hamburg) (Haese, Werner, and Lohmann, 2013), которая в свою очередь основана на модели энергетического баланса биосферы и гидрологии BETHY (Biosphere Energy Transfer and Hydrology scheme) (Knorr and Lakshmi, 2013). Модель гидрологии суши содержит три водных резервуара: слой снега, поверхностный слой воды на растительности или непокрытой почве и слой почвенной воды. Каждый из этих типов представлен в виде однослойной модели типа “ведро” (bucket model). Переход воды в слой снега зависит от твердых осадков, снеготаяния и сублимации. Слой воды на растительности и почве пополняется жидкими осадками и снеготаянием в следующем порядке: вначале поверхностный слой пополняется, пока не превысит свою влагоудерживающую способность, после чего вода начинает пополнять слой почвы. Уменьшение поверхностного слоя осуществляется благодаря испарению, слоя воды в почве – благодаря испарению и транспирации. Не существует никакого взаимодействия между этими двумя слоями. В случае, когда резервуар почвенной воды насыщен, осуществляется поверхностный сток. Дренажное подземное стока

происходит независимо от новых осадков и осуществляется в том случае, если величина воды в почве достигает 5% и более максимальной влагоемкости почвы.

Модель Гидрология, Атмосфера и Земля HAL (Hydrology, Atmosphere and Land) служит описанием всех гидрологических процессов, происходящих на земной поверхности в японской климатической модели MRI-CGCM3 (Yukimoto et al., 2012). Модель содержит три подмодели: модель растительности SiByl, модель снега SNOWA и модель почвы SOILA. Подмодель SOILA может содержать неограниченное количество слоев, но для участия в проекте CMIP5 в модель было включено 14 слоев. Температура каждого слоя рассчитывается на основе уравнения теплопроводности. Изменения состояния воды происходит между $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Количество слоев, в которых изменяется влажность почвы зависит от типа растительности (от 350 см для ячеек покрытых лесом до 50 см в пустынных ячейках). Инфильтрация жидкой воды осуществляется согласно формуле Дарси, в которой влагопроводность зависит от влажности почвы. Подземный сток осуществляется из самого нижнего слоя, поверхностный сток – из самого верхнего.

Модель земной поверхности MODEL II-LS (Schmidt et al., 2006) семейства климатических моделей Национального агентства по аэронавтике и исследованию космического пространства США GISS-E2 состоит из трех взаимосвязанных блоков: почва, лиственный покров и снежный покров. Поверхностный сток рассчитывается в зависимости от насыщения и инфильтрационной способности верхнего слоя почвы. Подземный сток рассчитывается в зависимости от среднего уклона и плотности подземного водотока в ячейке (Rosenzweig and Abramopoulos, 1997).

2. Выбор МОЦАО и сценариев для дальнейшего анализа

В качестве исходной информации анализировались модельные расчеты более чем по 50-ти климатическим моделям (с учетом их модификаций) проекта CMIP5. Описание проекта и соответствующих МОЦАО приведено в (Taylor, Stouffer and Meehl, 2012), а расчетные данные доступны на нескольких интернет-порталах, например на <http://pcmdi9.llnl.gov/>.

На начальном этапе проверялось наличие смоделированных данных по стоку у рассматриваемых климатических моделей, т.к. некоторые из них не предоставляют в полном объеме данные по стоковым составляющим mm0 и mm0s , в отличие от данных по приземной температуре воздуха и осадкам.

Проверялось наличие данных по историческому прогону (сценарий historical) за период 1981-2000 гг., а также двум прогнозным сценариям: RCP-4.5 и RCP-8.5, за периоды 2011-2030 гг. и 2041-2060 гг. Если данные по какой-либо модели отсутствовали за любой из вышеуказанных прогонов или периодов, то данная модель в дальнейшем анализе участия не принимала.

В качестве прогнозных сценариев были приняты прогнозные проекции RCP-4.5 и RCP-8.5. RCP-4.5 – это умеренно агрессивный сценарий, а RCP-8.5 – наиболее агрессивный сценарий антропогенного воздействия. Описание данных сценариев можно найти в работах (Wayne, 2013; Катцов, Говоркова, 2013).

Сценарий RCP 4.5 разработан группой MiniCAM (Global Change Assessment Model) в Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории Объединенного института исследований глобальных изменений (Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute). Это сценарий, в котором радиационный форсинг стабилизируется до 2100 г. путем применения технологий и стратегий по уменьшению выбросов парниковых газов.

Сценарий RCP 8.5 разработан группой MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact) и IIASA Integrated Assessment Framework в международном институте прикладного системного анализа (International Institute for Applied Systems Analysis), Австрия. Этот сценарий описывает выбросы парниковых газов, увеличивающиеся со временем. Они типичны для тех из представленных в литературе сценариев (Riahi, Gruebler and Nakicenovic, 2007), что приводят к высокой концентрации парниковых газов.

В результате выполненного анализа из всего набора данных было отобрано 32 МОЦАО, предоставляющих информацию по речному стоку в полном объеме как за исторический, так и за прогнозные периоды по каждому сценарию.

3. Методика расчетов

Ввиду того, что климатические модели имеют различное пространственное разрешение, которое составляет от $0.95^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ для модели CESM1-BGC до $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$ у моделей BCC-csm1.1, CanESM2, MIROC-ESM и др., данные по всем моделям приводились, с помощью специально разработанного в ФГБУ «ГИИ» программного обеспечения, к единой сетке с разрешением $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$. Каждому конкретному узлу сетки бассейна р. Амур присваивалось ближайшее модельное значение. Далее проводилась проверка полученных в узлах сетки слоев стока для каждой из рассматриваемой модели на ошибки. Проверялось и анализировалось наличие отрицательных значений, нулевых и заведомо завышенных значений слоев стока. Все данные за каждый месяц для каждой модели записывались в специальный файл. Затем осуществлялась проверка на соответствие полученных значений фактическим, корректному пространственному распределению этих стоковых величин по территории водосбора реки Амур и т.п. После выполнения проверки, на основе полученных матриц регулярной сетки, рассчитывались месячные значения слоя стока для водосбора реки Амур путем элементарного осреднения по территории водосбора. Из полученных таким образом месячных значений рассчитывался годовой стока.

Дальнейший анализ полученных рядов значений годовых слоев стока выполнялся следующим образом.

Рассчитывались возможные изменения речного стока для каждой модели на перспективу для бассейна р. Амур. Расчеты осуществлялись для прогнозных периодов 2011-2030 и 2041-2060 гг. по отношению к периоду 1981- 2000, который был выбран как базовый. Вычисления производились, как для умеренно-агрессивного сценария RCP-4.5, так и для “жесткого” сценария RCP-8.5. Полученные результаты осреднялись за эти 20-летние периоды и сравнивались с соответствующими значениями за период 1981-2000 гг.

Далее для каждого из двух прогнозных периодов для всех моделей строились карты-схемы возможных изменений речного стока по территории бассейна р. Амур.

4. Анализ результатов

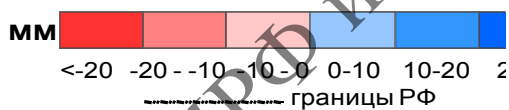
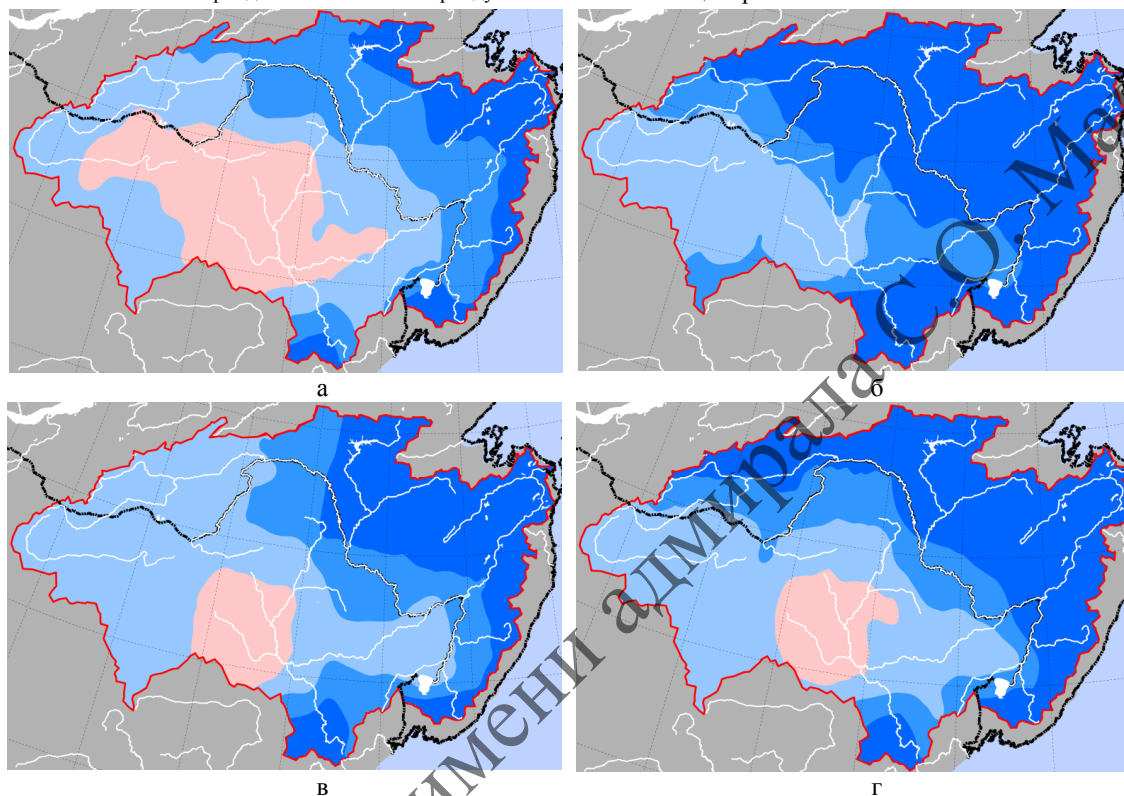
Из большого количества климатических моделей проекта CMIP5 было выбрано 32 МОЦАО, предоставляющие данные о месячном речном стоке. Рассчитанные возможные изменения речного стока в первой половине XXI века для прогнозных сценариев RCP-4.5 и RCP-8.5 (периоды 2011-2030 гг. и 2041-2060 гг.) по сравнению с базовым периодом 1981-2000 гг. приведены в таблицах 3 и 4, для р.Амур – г. Хабаровск и р.Амур – г. Комсомольск-на-Амуре. Значения среднегодового фактического стока за базовый период (1981-2000) составляет для р. Амур - г. Хабаровск (г/ст) – 162 мм, а для р. Амур - г. Комсомольск-на-Амуре – 181 мм.

Как видно из представленных результатов, рассчитанные величины годового стока сильно отличаются для разных моделей, то же можно сказать и о полученных изменениях на перспективу. Более того, некоторые климатические модели демонстрируют заведомо некорректные значения стока: либо сильно заниженные, либо необъяснимо высокие (семейство моделей IPSL и GISS). Изменения годового стока на перспективу по разным моделям имеют также и разный знак. Для нивелирования подобных тенденций в моделируемых величинах стока было решено объединить результаты наиболее близких к фактическому стоку МОЦАО в ансамбль, а модели, которые показывают наиболее неправдоподобные результаты исключить из дальнейших расчетов.

На основе анализа рассчитанных значений стока, его изменений и построенных карт осуществлялся дополнительный отсев моделей методом визуального анализа достоверности воспроизведения ими речного стока: из выбранного количества климатических моделей отбрасывались те, которые демонстрировали наименее правдоподобные результаты по сравнению с фактическими значениями, а также наименее соответствующие наблюдающимся в рядах фактических значений годовых слоев стока современным изменениям и их тенденциям.

В результате проведенного анализа были отсеяны 8 моделей, а из оставшегося количества МОЦАО был сформирован модельный ансамбль и дальнейший анализ осуществлялся на основе ансамблевого осреднения данных по стоку 24 МОЦАО.

а - за период с 2011 по 2030 к периоду с 1981 по 2000 гг.. Сценарий RCP-45



а - за период с 2011 по 2030 к периоду с 1981 по 2000 гг.. Сценарий RCP-45

б - за период с 2041 по 2060 к периоду с 1981 по 2000 гг.. Сценарий RCP-45

в - за период с 2011 по 2030 к периоду с 1981 по 2000 гг.. Сценарий RCP-85

г - за период с 2041 по 2060 к периоду с 1981 по 2000 гг.. Сценарий RCP-85

Рисунок 1 – Изменения годовых слоев стока по территории бассейна р.Амур. Ансамбль 24 моделей (CMIP-5).

Таблица 3 – Изменения годовых слоев речного стока (в мм. и %) в начале (2011-2030 гг.) и середине (2041-2060 гг.) XXI в. по отношению к базовому периоду (1981-2000 гг.), полученные по 24 климатическим моделям проекта SMIP5 путем ансамблевого осреднения для различных сценариев радиационного воздействия. (р.Амур – г.Хабаровск)

№	Модель	historical 1981- 2000 сток, мм	RCP-45				RCP-85						
			2011-2030		2041-2060		2011-2030		2041-2060				
			сток, мм	изм. в мм	изм. в в %	сток, мм	изм. в мм	изм. в мм	изм. в мм	сток, мм	изм. в мм	изм. в %	
1	bcc-csm1-1-m	179	8	4	206	27	15	200	21	12	200	21	12
2	BNU-ESM	179	7	4	216	37	21	171	-8	-5	206	27	15
3	CanESM2	175	-7	-4	176	0	0	174	-2	-1	180	4	2
4	CCSM4	176	-7	-4	185	9	5	189	13	7	191	16	9
5	CESM1-BGC	157	21	13	198	41	26	189	32	20	197	40	26
6	CESM1-WACCM	205	8	4	242	37	18	210	6	3	210	5	2
7	CMCC-CM	177	-8	-5	181	4	2	180	3	2	197	20	11
8	CMCC-CMS	189	8	4	199	10	6	200	11	6	206	17	9
9	CNRM-CM5	164	26	16	188	24	15	163	-1	-1	174	11	6
10	CSIRO-Mk3-6-0	134	15	11	161	27	20	182	47	35	163	28	21
11	FGOALS-g2	256	-1	0	270	14	6	264	8	3	277	21	8
12	FIO-ESM	233	-17	-7	213	-20	-9	223	-10	-4	230	-3	-1
13	GFDL-CM3	79	33	41	126	46	58	105	26	33	125	46	57
14	GFDL-ESM2G	123	23	19	161	38	31	149	26	21	145	23	18
15	GFDL-ESM2M	153	-1	-1	179	26	17	162	9	6	179	26	17
16	inmcm4	219	-2	-1	216	3	-2	204	-16	-7	210	-9	-4
17	MIROC5	205	42	20	233	28	14	228	23	11	239	34	16
18	MIROC-ESM	280	22	8	310	31	11	282	2	1	313	33	12
19	MIROC-ESM-CHEM	278	9	3	308	30	11	268	-10	-3	275	-3	-1
20	MPI-ESM-LR	188	-17	-9	219	31	16	172	-16	-8	181	-7	-4
21	MPI-ESM-MR	172	-4	-3	184	12	7	219	47	28	189	17	10
22	MRI-CGCM3	143	2	1	140	-3	-2	150	7	5	143	0	0
23	NorESM1-M	166	9	6	196	31	18	182	17	10	183	18	11
24	NorESM1-ME	152	24	16	206	54	35	184	32	21	186	34	22
Ансамбль 24 моделей		183±47*	8±15	6	205±45	22±18	14	194±40	11±18	8	200±43	17±15	11

Примечание: * - межмодельное стандартное отклонение

Таблица 4 – Изменения годовых слоев речного стока (в мм. и %) в начале (2011-2030 гг.) и середине (2041-2060 гг.) XXI в. по отношению к базовому периоду (1981-2000 гг.), полученные по 32 климатическим моделям проекта SMIP5 путем ансамблевого осреднения для различных сценариев радиационного воздействия. (р.Амур – г.Комсомольск-на-Амуре)

№	Модель	Historical 1981-2000				RCP-45				RCP-85			
		СТОК, мм		ИЗМ. В мм	ИЗМ. В %	2011-2030		2041-2060		2011-2030		2041-2060	
		СТОК, мм	СТОК, мм			СТОК, мм	ИЗМ. В мм	СТОК, мм	ИЗМ. В мм	СТОК, мм	ИЗМ. В мм		
1	bcc-csm1-1-m	187	196	9	5	216	28	15	212	25	210	22	12
2	BNU-ESM	186	192	6	3	222	36	19	179	-8	212	26	14
3	CanESM2	184	175	-9	-5	183	0	0	183	-1	189	6	3
4	CCSM4	189	182	-7	-4	199	10	5	202	13	204	15	8
5	CESM1-BGC	169	190	21	12	213	43	26	202	33	212	43	25
6	CESM1-WACCM	215	224	9	4	251	37	17	221	6	221	7	3
7	CMCC-CM	189	182	-7	-4	193	4	2	192	4	209	21	11
8	CMCC-CMS	200	210	9	5	214	13	7	213	12	220	19	10
9	CNRM-CM5	172	200	28	16	198	25	15	171	-1	184	12	7
10	CSIRO-Mk3-6-0	147	163	16	11	174	28	19	195	48	179	33	22
11	FGOALS-g2	264	264	1	0	277	14	5	271	7	287	23	9
12	FIO-ESM	241	227	-14	-6	222	-19	-8	233	-9	239	-2	-1
13	GFDL-CM3	86	122	36	41	133	47	55	113	27	133	47	54
14	GFDL-ESM2G	132	156	23	18	170	37	28	160	27	155	23	17
15	GFDL-ESM2M	161	161	0	0	187	27	17	171	10	187	27	17
16	inmcm4	232	227	-5	-2	224	-7	-3	212	-20	219	-13	-6
17	MIROC5	218	260	41	19	247	29	13	240	22	254	36	16
18	MIROC-ESM	295	315	20	7	324	29	10	295	0	328	33	11
19	MIROC-ESM-CHEM	291	300	9	3	323	32	11	280	-10	289	-2	-1
20	MPI-ESM-LR	201	184	-17	-8	234	33	17	185	-16	195	-5	-3
21	MPI-ESM-MR	183	179	-5	-3	197	13	7	233	50	201	18	10
22	MRI-CGCM3	155	157	2	1	151	-4	-2	162	7	155	0	0
23	NorESM1-M	178	188	10	6	209	32	18	195	18	197	19	11
24	NorESM1-ME	165	189	24	15	219	54	33	198	34	199	35	21
Ансамбль 24 моделей		193±48*	202±46	9±15	6	216±46	23±18	14	205±41	12±19	212±44	19±15	11

Примечание: * - межмодельное стандартное отклонение

В результате произведенных расчетов были построены карты-схемы распределения изменений величин годового стока (в мм) по территории бассейна р. Амур за периоды с 2011 по 2030 гг. и с 2041 по 2060 гг., по отношению к периоду с 1981 по 2000 гг., который был принят за базовый. Карты построены для двух прогнозных сценариев: RCP-45 (умеренный) и RCP-85 (более резких изменений), рисунок 1.

Для первого из выбранных для рассмотрения сценария (RCP-45) на территории водосбора реки в начале века (рисунок 1 а) следует ожидать увеличение годового стока в пределах до 10 мм (Таблица 5). Наибольшее увеличение стока будет наблюдаться на северо-востоке, в низовьях р.Амур и верховьях реки Зеи, в верховьях же рек Сунгари и Аргунь наоборот, наиболее вероятно небольшое, до 5-10 мм уменьшение годовых значений речного стока. К середине XXI века по всей территории водосбора ожидается повышение стока, которое также будет наибольшим (до 20 – 30 мм) в северо-восточной и южной частях бассейна (рисунок 1 б, в), а наименьшим (до 10 мм) в верховьях рек Сунгари и Аргунь, в целом по водосбору сток повысится до 20 мм, что составит до 15% от его среднееголетних значений.

Таблица 5 – Изменения годовых слоев стока в бассейне р.Амур. Ансамбль 24 моделей (CMIP-5). Сценарий RCP-45.

№ по ГВК	река-пост	RCP-45					
		2011-2030			2041-2060		
		сток, мм	изм. в мм	изм. в %	сток, мм	изм. в мм	изм. в %
5013	р. Амур - г. Хабаровск (г/ст)	191±45	8±15	6	205±45	22±18	14
5024	р. Амур - г. Комсомольск-на-Амуре	202±46	9±15	6	216±46	23±18	14

Таблица 6 – Изменения годовых слоев стока в бассейне р.Амур. Ансамбль 24 моделей (CMIP-5). Сценарий RCP-85.

№ по ГВК	река-пост	RCP-85					
		2011-2030			2041-2060		
		сток, мм	изм. в мм	изм. в %	сток, мм	изм. в мм	изм. в %
5013	р. Амур - г. Хабаровск (г/ст)	194±40	11±18	8	200±43	17±15	11
5024	р. Амур - г. Комсомольск-на-Амуре	205±41	12±19	8	212±44	19±15	11

Результаты, полученные для сценария RCP-85 в целом повторяют ту картину, что и для более умеренного сценария RCP-45, увеличение годового стока для всего водосбора в первой четверти XXI века составит те же 10 мм (таблица 6). Однако, здесь небольшое (до 5-10 мм) уменьшение величин годового стока будет наблюдаться только в верховьях реки Сунгари. При этом, уменьшение значений годового стока будет происходить как в начале, так и в середине XXI века.

В целом же на водосборе картина к середине века не сильно изменится, также как и в начале наибольшее увеличение (до 20 – 30 мм) будет наблюдаться на северо-востоке водосбора р.Амур,

но к середине века его наибольшие значения затронут все его течение, в то время, как в начале века на территориях бассейнов рек Шилки и Аргунь повышение значений годового стока будет менее выражено, здесь его значения будут доходить лишь до 10 мм.

Представленные результаты показывают, что как в первой четверти XXI века, так и к его середине следует ожидать незначительного, в пределах статистической погрешности, увеличения величин годового стока (до 10 и 20 мм соответственно), по сравнению с его значениями в последние десятилетия XX века. Рассчитанные изменения годового стока на перспективу, также хорошо коррелируют с выводами, которые были сделаны в процессе аналогичного анализа данных МОЦАО коллегами из ГГО (Катцов, Говоркова, 2013).

Список литературы

- В.П. Дымников, В.Н. Лысков и Е.М. Володин (2012). Моделирование климата и его изменений: современные проблемы. Вестник российской академии наук, том 82, № 7, с. 227–236.
- В.А. Катцов, В.А. Говоркова (2013). Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в XXI-м веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5). Труды ГГО.- вып. 569. - С. 75-97.
- Beven, K.J., and Kirkby, M.J. 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* 24: 43-69.
- Yongjiu Dai, Xubin Zeng, Robert E. Dickinson, Ian Baker, Gordon B. Bonan, Michael G. Bosilovich, A. Scott Denning, Paul A. Dirmeyer, Paul R. Houser, Guoyue Niu, Keith W. Oleson, C. Adam Schlosser, and Zong-Liang yang. The Common Land Model. August 2003. American Meteorological Society, pp. 1013-1023.
- Hal Gordon, Siobhan O'Farrell, Mark Collier, Martin Dix, Leon Rotstayn, Eva Kowalczyk, Tony Hirst and Ian Watterson. The CSIRO Mk3.5 Climate Model. Centre for Australian Weather and Climate Research. CAWCR Technical Report No. 021, April 2010.
- H.B. Gordon, L.D. Rotstayn, J.L. McGregor, M.R. Dix, E.A. Kowalczyk, S.P. O'Farrell, L.J. Waterman, A.C. Hirst, S.G. Wilson, M.A. Collier, I.G. Watterson, and T.I. Elliott (2002), The CSIRO Mk3 Climate System Model. CSIRO Atmospheric Research Technical Paper No. 60.
- M. Guimberteau, A. Perrier, K. Laval, and J. Polcher. A comprehensive approach to analyze discrepancies between land surface models and in-situ measurements: a case study over the US and Illinois with SECHIBA forced by NLDAS. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3973–3988, 2012.
- B. Haese, M. Werner, and G. Lohmann (2013). Stable water isotopes in the coupled atmosphere–land surface model ECHAM5-JSBACH. *Geosci. Model Dev.*, 6, 1463–1480, www.geosci-model-dev.net/6/1463/2013/, doi:10.5194/gmd-6-1463-2013.
- Su-Jong Jeong, David Medvigy, Elena Shevliakova, and Sergey Malyshev (2012), Uncertainties in terrestrial carbon budgets related to spring phenology. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 117, G01030, doi:10.1029/2011JG001868.
- Wolfgang Knorr and Venkataraman Lakshmi (2013). Assimilation of fAPAR and Surface Temperature Into a Land Surface and Vegetation Model. *Land Surface Hydrology, Meteorology, and Climate: Observations and Modeling Water Science and Application Volume 3*, pages 177-200.
- Nicolas Lambert, Joël Chassé, Will Perrie, Zhenxia Long, Lanli Guo and John Morrison (2013). Projection of future river runoffs in Eastern Atlantic Canada from Global and Regional climate models. *Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences* 288.
- 70ki T., Sud Y.C. (1998) Design of total runoff integrating pathways (TRIP). A global river channel network. *Earth Interact* 2:1–36.
- Keith W. Oleson, Yongjiu Dai, Gordon Bonan, Mike Bosilovich, Robert Dickinson, Paul Dirmeyer, Forrest Hoffman, Paul Houser, Samuel Levis, Guo-Yue Niu, Peter Thornton, Mariana Vertenstein, Zong-Liang Yang,

- Xubin Zeng. "Technical Description of the Community Land Model (CLM)." NCAR/TN-461+STR, NCAR TECHNICAL NOTE, May 2004.
- Keith W. Oleson, David M. Lawrence, Gordon B. Bonan, Mark G. Flanner, Erik Kluzek, Peter J. Lawrence, Samuel Levis, Sean C. Swenson, Peter E. Thornton Aiguo Dai, Mark Decker, Robert Dickinson, Johannes Feddes, Colette L. Heald, Forrest Hoffman, Jean-Francois Lamarque, Natalie Mahowald, Guo-Yue Niu, Taotao Qian, James Randerson, Steve Running, Koichi Sakaguchi, Andrew Slater, Reto Stöckli, Aihui Wang, Zong-Liang Yang, Xiaodong Zeng, Xubin Zeng. "Technical Description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM)". NCAR/TN-478+STR, NCAR TECHNICAL NOTE, April 2010.
- Riahi K., Gruebler A., Nakicenovic N. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization // *Technol. Forecasting and Soc. Change.* — 2007. — Vol. 74, N 7. — P. 887–935.
- Cynthia Rosenzweig and Frank Abramopoulos (1997). Land-Surface Model Development for the GISS GCM. *Journal of Climate*, Volume 10, p. 2040-2054.
- Gavin A. Schmidt, Reto Ruedy, James E. Hansen, Igor Aleinov, Nadine Bell, Mike Bauer, Susanne Bauer, Brian Cairns, Vittorio Canuto, Ye Cheng, Anthony Del Genio, Greg Faluvegi, Andrew D. Friend, Tim M. Hall, Yongyun Hu, Max Kelley, Nancy Y. Kiang, Dorothy Koch, Andy A. Lacis, Jean Lerner, Ken K. Lo, Ron L. Miller, Larissa Nazarenko, Valdar Oinas, Jan Perlwitz, Judith Perlwitz, David Rind, Anastasia Romanou, Gary L. Russell, Makiko Sato, Drew T. Shindell, Peter H. Stone, Shan Sun, Nick Tausnev, Duane Thresher, and Mao-Sung Yao (2006). Present-Day Atmospheric Simulations Using GISS ModelE: Comparison to In Situ, Satellite, and Reanalysis Data. *Journal of Climate*, Volume 19, p. 153-192.
- Shevliakova, E., S. W. Pacala, S. Malyshev, G. C. Hurtt, P. C. D. Milly, J. P. Caspersen, L. T. Sentman, J. P. Fisk, C. Wirth, and C. Crevoisier (2009), Carbon cycling under 300 years of land use change: Importance of the secondary vegetation sink, *Global Biogeochem. Cycles*, 23, GB2022, doi:10.1029/2007GB003176.
- Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2012. - V. 93. - P. 485–498.
- Kumiko Takata, Seita Emori, Tsutomu Watanabe. Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. *Global and Planetary Change* 38 (2003) 209–222.
- Wu Tongwen, Song Lianchun, Li Weiping, Wang Zaizhi, Zhang Hua, Xin Xiaoge, Zhang Yanwu, Zhang Li, Li Jianglong, Wu Fanghua, Liu Yiming, Zhang Fang, Shi Xueli, Chu Min, Zhang Jie, Fang Yongjie, Wang Fang, Lu Yixiong, Liu Xiangwen, Wei Min (2013). "An Overview of BCC Climate System Model Development and Application for Climate Change Studies. *Journal of Meteorological Research.*" VOL. 28. P. 34-56.
- Diana Verseghy. CLASS – the canadian land surface scheme (version 3.4). Technical documentation (version 1.1). Environment Canada Climate Research Division, Science and Technology Branch, January 2009.
- A. Voldoire, E. Sanchez-Gomez, D. Salas y Melia, B. Decharme, C. Cassou, S. Se'ne'si, S. Valcke, I. Beau, A. Alias, M. Chevallier, M. De'que', J. Deshayes, H. Douville, E. Fernandez, G. Madec, E. Maiconnave, M.-P. Moine, S. Planton, D. Saint-Martin, S. Szopa, S. Tytca, R. Alkama, S. Belamari, A. Braun, L. Coquart and F. Chauvin. The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Clim Dyn* (2013) 40:2091–2121, DOI 10.1007/s00382-011-1259-y.
- S. Watanabe, T. Hajima, K. Sudo, T. Nagashima, T. Takemura, H. Okajima, T. Nozawa, H. Kawase, M. Abe, T. Yokohata, T. Ise, H. Sato, E. Kato, K. Takata, S. Emori, and M. Kawamiya. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geosci. Model Dev.*, 4, 845–872, 2011.
- Masahiro Watanabe, Tetsuo Suzuki, Ryouta O'ishi, Yoshiki Komuro, Shingo Watanabe, Seita Emori, Toshihiko Takemura, Minoru Chikira, Tomoo Ogura, Miho Sekiguchi, Kumiko Takata, Dai Yamazaki, Tokuta Yokohata, Toru Nozawa, Hiroyasu Hasumi, Hiroaki Tatebe, and Masahide Kimoto (2010). Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *Journal of Climate*, 23, 6312–6335.
- Wayne G.P. (2013). *The Beginner's Guide to Representative Concentration Pathways*. Skeptical Science, <http://gpwayne.wordpress.com>, August 2013.
- WCRP Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5. 2011. Special Issue of the CLIVAR Exchanges Newsletter. No. 56. Vol. 15. No. 2.
- Seiji Yukimoto, Yukimasa Adachi, Masahiro Hosaka, Tomonori Sakami, Hiromasa Yoshimura, Mikitoshi Hirabara, Taichu Y. Tanaka, Eiki Shindo, Hiroyuki Tsujino, Makoto Deushi, Ryo Mizuta, Shoukichi Yabu, Atsushi Obata, Hideyuki Nakano, Tsuyoshi Koshiro, Tomoaki Ose, and Akio Kiton. A New Global Climate Model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 90A, pp. 23–64, 2012. DOI:10.2151/jmsj.2012-A02.

Zong-Liang Yang and Robert E. Dickinson. Description of the Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the Soil Moisture Workshop and evaluation of its performance. *Global and Planetary Change* 13 (1996) pp. 117-134.

¹ PROJECTED CHANGES IN RUNOFF FROM THE AMUR RIVER BASIN BY THE YEARS 2020 AND 2050
BASED ON RUNOFF DATA FROM ATMOSPHERE-OCEAN GENERAL CIRCULATION MODELS
(*M.B. Georgievskiy, O.F. Golovanov*)

The paper assesses projected changes in river runoff from the Amur River basin taking account of prospective climate changes (until 2020 and 2050). The assessment is made using runoff data from IPCC Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5). An analysis is made of the type of information provided by Atmosphere-Ocean Global Circulation Models (AOGCM). Compared are runoff computational schemes used in more than 30 AOGCM. A technique is proposed for predicting river runoff changes by ensemble averaging based on modern greenhouse gas emissions scenarios (RCP 4.5/RCP8.5).

СОДЕРЖАНИЕ

	ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
1	КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ПАВОДКИ В БАССЕЙНЕ РЕКИ АМУР В XIX–XX СТОЛЕТИЯХ..... <i>Грек Е.А., Иванов В.А., Молчанова Т.Г.</i>	4
2	КАТАСТРОФИЧЕСКОЕ НАВОДНЕНИЕ 2013 ГОДА В БАССЕЙНЕ АМУРА: ПРИЧИНЫ, ОСОБЕННОСТИ, ПОСЛЕДСТВИЯ..... <i>Шальгин А.Л., Дугина И.О.</i>	22
3	НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА РЕКАХ БАССЕЙНА АМУРА В ПЕРИОД ПРОХОЖДЕНИЯ ПАВОДКА 2013 ГОДА..... <i>Шкарбанов Р.И.</i>	36
4	АНАЛИЗ ПАВОДКОВОЙ СИТУАЦИИ В БАССЕЙНЕ АМУРА В 2013 ГОДУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ..... <i>Иванов В.А.</i>	44
5	ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАИВЫСШИХ УРОВНЕЙ ВОДЫ Р. АМУР У ХАБАРОВСКА И КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ..... <i>Георгиевский В.Ю., Молчанова Т.Г.</i>	53
6	О ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИНАХ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РУСЛА АМУРА В РАЙОНАХ ХАБАРОВСКА И КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ..... <i>Католиков В.М., Католикова Н.И.</i>	63
7	ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ АМУРСКИХ НАВОДНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫДАЮЩИХСЯ ПАВОДКОВ В БАССЕЙНЕ АМУРА..... <i>Шальгин А.Л.</i>	84
8	ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УРОВНЕНОГО РЕЖИМА РЕК АМУР И ЗЕЯ У Г. БЛАГОВЕЩЕНСКА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ПАВОДКОВ..... <i>Иванов В.А.</i>	91
9	ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ В БАССЕЙНЕ Р. ЗЕЯ С УЧЕТОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЗЕЙСКИМ ВОДОХРАНИЛИЩЕМ..... <i>Грек Е.А., Владимирова Т.И.</i>	102
10	ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РУСЕЛ РЕКИ АМУР И ЕЁ ПРИТОКОВ ПО ДАННЫМ ОБ ИЗМЕРЕННЫХ РАСХОДАХ ВОДЫ В ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ СТВОРАХ И ИХ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ЗА ПРЕДЕЛЫ ДИАПАЗОНОВ ИЗМЕРЕНИЯ..... <i>Яковлева Т.И., Кучеренко О.Е.</i>	109
11	РАСЧЕТ И АНАЛИЗ РУСЛОВЫХ БАЛАНСОВ НА УЧАСТКЕ РЕКИ АМУР: Г. ХАБАРОВСК-Г. КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ..... <i>Яковлева Т.И., Шарина Ю.А.</i>	123
12	ОЦЕНКА ВЫБОРОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ, ОРДИНАТ КРИВЫХ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ И ИХ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА ПРИМЕРЕ НАИВЫСШИХ УРОВНЕЙ ВОДЫ Р.АМУР..... <i>Лобанова А.Г.</i>	136
13	ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И МЕТОДИКА ПРОГНОЗА МАКСИМАЛЬНЫХ ЗАТОРНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ РЕКИ АМУР..... <i>Бузин В.А., Горошкова Н.И.</i>	143
14	ОЦЕНКА ВЕРОЯТНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СТОКА В БАССЕЙНЕ РЕКИ АМУР НА ПЕРСПЕКТИВУ ДО 2020 И 2050 ГОДОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА <i>Георгиевский М.В., Голованов О.Ф.</i>	153

БОУ ВО "ТУМРФ имени адмирала С.О. Макара