

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-1-102-119>

УДК 551.583+556

Анализ причин наводнения на реке Партизанская (Приморский край) в сентябре 2022 года

***И.А. Лисина¹, Л.Н. Василевская¹, Д.Н. Василевский²,
Л.С. Крамарева³, Ю.А. Шамилова³***

¹ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,
г. Владивосток, Россия;

²Дальневосточный филиал ФГБУ «Российский научно-исследовательский
институт комплексного использования и охраны водных ресурсов»,
г. Владивосток, Россия;

³Дальневосточный центр ФГБУ "НИЦ "Планета", г. Хабаровск, Россия
irlisina@mail.ru

Выполнен анализ условий возникновения и развития наводнения, вызванного влиянием тайфуна «Хиннамнор» в сентябре 2022 г. на реке Партизанская, не характерного для данного бассейна и поэтому приведшего к крупному экономическому ущербу. Установлено, что интенсивные осадки, связанные с развитием глубокой конвекции в системе бывшего тайфуна, в сочетании с повышенным увлажнением поверхности водосбора в предыдущие летние месяцы, явились, на фоне орографических особенностей юго-востока Приморского края, причиной сильнейшего наводнения 2022 г. в бассейне реки Партизанская.

Ключевые слова: Приморский край, река Партизанская, влияние тайфунов, сильный ливень, выдающееся наводнение, вегетационный индекс NDVI

Analysis of the causes of flooding on the Partizanskaya River (Primorsky Krai) in September 2022

***I.A. Lisina¹, L.N. Vasilevskaya¹, D.N. Vasilevsky²,
L.S. Kramareva³, Yu.A. Shamilova³***

¹FGAOU VO "Far Eastern Federal University", Vladivostok, Russia;

²Far Eastern Branch of FSBI Russian Research Institute for the Integrated Use
and Protection of Water Resources, Vladivostok, Russia;

³Far Eastern Center of FSBI "SIC "Planeta", Khabarovsk, Russia
irlisina@mail.ru

The article presents the analysis of conditions for the occurrence and development of flooding caused by the influence of typhoon Hinnamnor in September 2022 on the Partizanskaya River, which is not typical of this basin and therefore led to major economic damage. It was found that, against the background of orographic features of the south-eastern Primorsky Krai, intense precipitation was registered due to the development of deep convection in the system of the former typhoon, which along with increased wetting of the catchment surface in the previous summer months, caused the 2022 strongest flood on the Partizanskaya River.

Keywords: Primorsky Krai, Partizanskaya River, typhoon impact, heavy shower, outstanding flood, NDVI

Введение

Возросшие в последнее время темпы изменения климата влияют на все сферы человеческой деятельности. Человечество подчас не успевает к ним адаптироваться. Изменение климата на региональном уровне (ландшафтные зоны, бассейны рек) имеет индивидуальный характер. Поэтому оценка таких изменений является актуальной задачей.

Наибольшую опасность воздействия на экономику и население Приморского края представляют стихийные гидрологические явления, из которых самыми опасными являются паводки, возникающие в результате ливневых дождей. Они причиняют крупный экономический ущерб (разрушение участков автомобильных дорог, множества мостов и жилых домов, гибель посевов и домашних животных).

Недостаточный учет аномального характера гидрометеорологических явлений, в том числе и по причине антропогенных воздействий на водосбор (вырубка лесов, распашка территорий) и русло реки (за счет естественного и искусственного сужения), приводит к негативным последствиям для человека и экосистемы в целом. Поэтому для Приморского края проблема изучения, обобщения и дифференциации причин, вызывающих наводнения, не теряет актуальности.

По официальной информации ФГБУ «Приморское УГМС» [<http://www.primgidromet.ru/>] тайфун «Хиннамнор» (HINNAMNOR) зародился в Тихом океане 28 августа 2022 года.

Японским метеоагентством [<https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/trackarchives.html>] тайфун «Хиннамнор» отнесен к супертайфунам по своим характеристикам: 30 августа давление в его центре составляло 920 гПа, а порывы ветра 70–80 м/с. 2 сентября в Приморском крае было объявлено штормовое предупреждение на период 5–7 сентября, связанное с влиянием тайфуна «Хиннамнор».

Штормовые предупреждения, касающиеся очень сильных дождей, сильных ветров, паводков, интенсивных подъемов воды, значительных разливов воды, оправдались на 100 %. То есть службы МЧС, население Приморского края были готовы встретить удары стихии, однако последствия, связанные с тайфуном, сложно оценить. Аномальность этого события, на наш взгляд, связана со «стремительными» подъемами уровней воды в реках юго-восточной, восточной части Приморского края.

Целью настоящего исследования явилась оценка причин, обусловивших наводнения в бассейнах рек юго-восточной части Приморья, на примере реки Партизанская. Задачи, поставленные в работе, включают: анализ условий прохождения паводка и развития атмосферных процессов в сентябре 2022 года, поиск аналогов тайфунного влияния на исследуемый район, оценку изменения растительного покрова на водосборе реки Партизанская.

Материалы и методы исследований

Исходными материалами послужили: синоптический архив Японского метеорологического агентства [https://www.jma.go.jp/bosai/weather_map]; спутниковые снимки ИСЗ серии «Landsat» за 2000 и 2022 гг. [<https://gis-lab.info/qa/landsat-glovis.html>]; сведения о метеорологической обстановке на станциях Приморья [<https://rp5.ru/>, <http://meteo.ru/data>]; ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ФГБУ «ДВНИГМИ» [<http://www.ferhri.ru/>]; гидрологическая обстановка за сентябрь 2022 года [https://meteo-dv.ru/hydro_dfo/]; гидрологические ежегодники [8].

Методами исследования являются аналитический, графический и визуальный. Для проведения оценки изменения растительного покрова с использованием спутниковой информации применялась процедура атмосферной коррекции, а для увеличения разрешения изображений до 15 м – «pan-sharpening»; для количественной оценки растительного покрова – показатели количества фотосинтетически активной биомассы (индексы NDVI) [19].

Районом исследования является территория юго-восточной части Приморского края, включающая бассейн реки Партизанская. Эта территория по схеме ландшафтного районирования относится к Южно-Приморской горно-долинной провинции Сихотэ-Алинской физико-географической области, ограниченной с севера горами Пржевальского (среднегорный массив, который протянулся зигзагообразной полосой, разделяя низкогорное базальтовое Шкотовское плато со средними высотами около 850 м на два сегмента); с юго-запада, запада Ливадийским хребтом (средняя высота гор 500–700 м), а с востока – хребтом Заповедным (средняя высота гор составляет 500–700 м, отдельные вершины достигают 1200–1400 м над уровнем моря, склоны гор имеют различную крутизну, в среднем 20–25°, их гребни узкие, но плоские) (рис. 1) [9].

Река Партизанская берет свое начало на южных склонах Сихотэ-Алия, впадает в залив Находка. Длина реки – 142 км, площадь водосборного бассейна – 4140 км². Внутри бассейна частными водоразделами, разделяющими водосборы его притоков, служат многочисленные, преимущественно короткие и различно ориентированные хребты и горные гряды, отдельные вершины которых достигают отметок 700–1000 м и более. Обширные пространства бассейна (около 79 % его площади) заняты смешанным лесом. Гидрографическая сеть хорошо развита, средний коэффициент ее густоты составляет 1,1 км/км². На участке от села Сергеевка до устья долина реки прямая, пойменная, шириной около 3 км (рис. 1). Ее склонами являются крутые (у подножий почти обрывистые) и залесенные склоны гор высотой 200–300 м.

Поверхность поймы сильно пересечена протоками и староречьями и полностью затопляется лишь во время больших паводков, при обычных

паводках покрываются водой лишь отдельные пониженные участки. В нижнем течении русло извилистое, неустойчивое, разделяется на рукава и протоки. Водность реки значительно возрастает в среднем течении, где впадают наиболее значительные притоки. Приустьевой участок находится в сфере влияния приливо-отливных течений Японского моря.



Рис.1. Фрагмент физической карты Приморского края [1].

Fig. 1. Fragment of the physical map of Primorsky Krai [1].

Крупные притоки (от истока к устью): реки Сергеевка (левый), Мельники (правый), Тигровая (правый), Водопадная (левый). Параметры основных рек приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры основных рек

Table 1. Parameters of the main rivers

Название реки	Длина реки, км	Водосборная площадь, км ²
Сергеевка	35	700
Мельники	38	292
Тигровая	53	687
Водопадная	36	190

В бассейне реки расположено четыре гидрологических поста (р. Партизанская – с. Молчановка, р. Партизанская – с. Партизанск, р. Тигровая – с. Хмельницкое, р. Водопадная – с. Николаевка).

Результаты и обсуждение

Весеннее половодье на реке Партизанская состоит из двух волн, так же как и на других водотоках Приморского края, оно невысокое и не достигает уровня выхода воды на пойму. Высота первого подъема от притока в русло реки талых вод обычно не превышает 0,5–0,7 м над условным уровнем воды (УУВ). После очищения реки ото льда уровень понижается. В середине или конце апреля происходит второй подъем, обусловленный таянием снега в горах и выпадением дождей. Высота этого подъема в среднем составляет 1,0–1,2 м над УУВ. На волну спада половодья обычно накладываются пики дождевых паводков. В летне-осенний период на реке проходит от 2 до 7 паводков. Средняя высота паводка составляет 1–2 м. Чаще всего паводки следуют один за другим и, накладываясь друг на друга, обуславливают гребенчатый вид гидрографа стока. Продолжительность такого рода многомодальных паводков достигает 30–35 дней. Наиболее высокие подъемы уровня наблюдаются в августе и сентябре, они обусловлены, как правило, ливневыми осадками или продолжительными обложными дождями [14].

Суммарная продолжительность периодов с низким стоком между отдельными паводками на реке Партизанская за теплый период составляет в среднем 25–30 дней, наибольшая – 45–48 дней. Наинизший уровень воды наступает в различное время, чаще всего в июле. Высота его в среднем составляет 10–15 см ниже УУВ.

Дальневосточными учеными-гидрологами [2–6, 17, 18] изучаются причинно-следственные связи возникновения и развития опасных уровней воды на реках бассейна Тихого океана. Так, по [6] «временная динамика абсолютных значений максимального стока, его аномалий и многолетних циклов водности для рек прибрежной зоны Приморского края не синхронна, за исключением группы рек восточного побережья, а также р. Раздольная. Рекам побережья края свойственна сложная пространственная дифференциация опасных явлений, связанных с высокими уровнями воды, на близко расположенных реках их повторяемость различна». Подтверждением тому является наводнение в сентябре 2022 г. на реке Партизанская, вызванное влиянием тайфуна «Хиннамнор».

Детальный анализ возникновения наводнения на реке Партизанской, проведенный в данной работе, включает исследование хода уровней воды, метеорологических условий в бассейне, последовательности развития синоптических процессов с учетом тайфунного влияния на развитие паводочного процесса, оценку изменения залесенности водосбора.

Согласно данным метеорологических наблюдений, акватория Японского моря с 1951 по 2021 год претерпела агрессивное воздействие тайфунов не менее 150 раз. Общее число тайфунов, которые зародились в этот период в Тихом океане, составляет около 1,6 тысяч, т. е. около 10 %

из них вышли на Приморский край [10]. Схожие с траекторией тайфуна «Хиннамнор» треки отмечены в 15 случаях в течение 21 века [<https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/trackarchives.htm>]. Тайфуны, ставшие внетропическими циклонами, проходили по западной акватории Японского моря в июне (2006 г.), июле (2004, 2008, 2012, 2019 гг.), августе (2014, 2015, 2018, 2020 гг.) и сентябре (2000, 2002, 2006, 2011, 2012, 2016 гг.). Однако ни один из них не вызвал выдающегося повышения уровня воды в исследуемом районе Приморья за последние 22 года.

Для нахождения гидрологической аналогии с рассматриваемой ситуацией – по рядам максимальных паводочных расходов и уровней воды, а также по траекториям движения тайфунов, вызвавших подъем уровня воды, сопровождающийся выходом воды на пойму – были подобраны годы-аналоги. В итоге детального анализа схожим по вышеперечисленным условиям оказался сентябрь 1980 г. (рис. 2). Как следует из рис. 2, динамика повышения уровня реки Партизанская в сентябре 1980 г. аналогична таковой в сентябре 2022 г. Однако паводок в сентябре 1980 г., несмотря на более высокое значение уровня воды, превышающего предел неблагоприятного явления (501 см против 435 см в 2022 г.), не вызвал столь разрушающего наводнения, как в 2022 году.

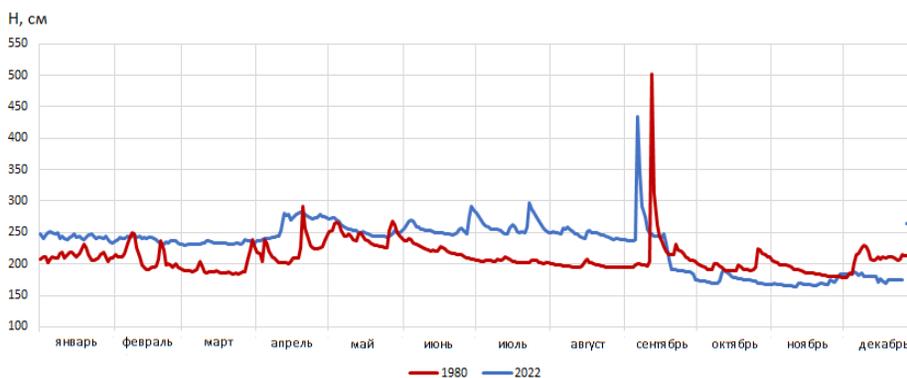


Рис. 2. График хода уровней воды в створе р. Партизанская – с. Молчановка за 1980 и 2022 гг.

Fig. 2. Graph of the course of water levels in the alignment of the Partizanskaya river – Molchanovka village for 1980 and 2022.

Для анализа приняты данные по гидрологическому посту р. Партизанская – с. Молчановка, ведущему в настоящее время наблюдения в бассейне реки. Обоснование репрезентативности материалов наблюдений по этому посту для всей реки выполнено путем сравнения совмещенных графиков изменения уровня воды на существовавших ранее четырех постах (р. Партизанская – г. Партизанск,

р. Партизанская – с. Молчановка, р. Водопадная – с. Николаевка, р. Тигровая – с. Хмельницкое) за период совместных наблюдений с 1972 по 1986 год. На рис. 3 приведен пример такого графика за 1980 г., подобранного в качестве аналога к 2022 г. Из анализа графика следует, что внутригодовое изменение уровня воды на всех постах является синхронным. Исключение составляет зимний период (январь–февраль), когда наблюдаются отдельные случаи повышенного значения уровня, вероятнее всего связанные с антропогенным влиянием. Но данное отличие не играет существенной роли в контексте нашего исследования.

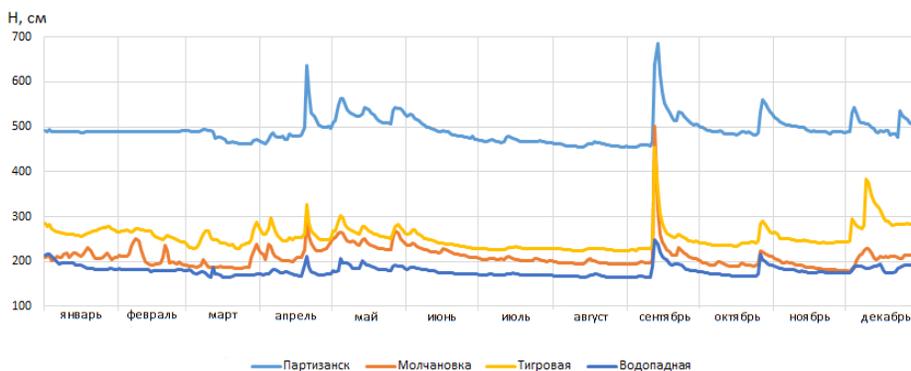


Рис. 3. Графики хода уровня воды в створах р. Партизанская – с. Молчановка, р. Партизанская – г. Партизанск, р. Тигровая – с. Хмельницкое, р. Водопадная – с. Николаевка за 1980 г.

Fig. 3. Graphs of the course of the water level along the sections of the Partizanskaya River – the village of Molchanovka, the Partizanskaya River – the city of Partizansk, the Tigrovaya River – the village of Khmel'nitskoye, the Vodopadnaya River – the village of Nikolaevka for 1980.

11–13 сентября 1980 года Приморье ощутило на себе воздействие стихии, виновником которой стал тайфун «Орхид» (рис. 4а). После выхода тайфуна на Японию 11 сентября, он полностью перешел во внетропическую стадию и продолжил движение на север в Приморский край. Сильнее всего досталось восточным, южным и северным районам, где скорость ветра достигла 35–40 м. Местами вылилось до 150 мм дождей за сутки [<https://maglipogoda.ru/tayfuny-v-primorskom-krae-s-1971-po-2000-god/>].

Траектории смещения тайфунов в 1980 и 2022 гг. над акваторией Японского моря весьма схожи (рис. 4). В 1980 г. в предшествующие выходу тайфуна Орхид месяцы почва в бассейне была недонасыщена влагой, поскольку в июле выпало около 55 % осадков от нормы, а в августе – всего лишь 35 %. В сентябре же за 3 дня выпало 166 мм, что составило 140 % от нормы. В целом за месяц выпало 215 мм, что составляет 182 % от нормы.

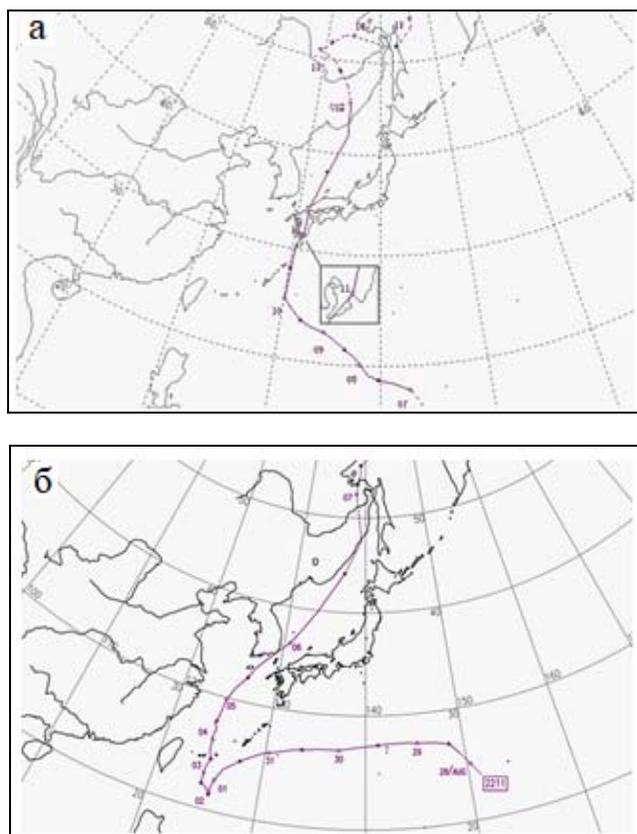


Рис. 4. Траектория тайфуна Орхид, сентябрь 1980 г. (а); тайфуна «Хиннамнор», сентябрь 2022 г. (б) [https://www.jma.go.jp/bosai/weather_map].
Fig. 4. Trajectory of Typhoon Orchid, September 1980 (a); Typhoon Hinnamnor, September 2022 (б) [https://www.jma.go.jp/bosai/weather_map].

В 2022 г. обильные осадки 4–6 сентября, выпавшие на переувлажненную почву, обусловили высокое наводнение, почти достигшее уровня неблагоприятного явления (450 см) в долине р. Партизанская. Переувлажнение являлось следствием выпадения особо опасных дождей в конце июня (56 мм), в августе (56 и 64 мм) и по 24 случая фиксированных на метеостанции Партизанск осадков в июле–августе и высокой увлажненности атмосферного воздуха (средняя за месяц относительная влажность составила 90 % в июле и 86 % в августе). Следует отметить, что в июле в 90 %, а в августе в 74 % метеорологических сроков фиксировалась облачная погода, зачастую с туманами и моросью. 6 сентября 2022 г. с 7 до 19 часов был зафиксирован максимум осадков 134 мм (по метеостанции Партизанск), что составило месячную норму осадков. Вся территория бассейна реки была охвачена зоной интенсивного дождя (рис. 5).

Погодные условия во время прохождения стихийного паводка оценивались по данным наблюдений двух метеорологических станций: Партизанск и Находка. Метеостанция Партизанск по отношению к общему рельефу местности находится в котловине, окружающие горы значительно выше метеоплощадки, высота станции 221 м над уровнем моря [<http://www.primgidromet.ru/>]. В течение двух суток с 4 по 6 сентября метеостанция фиксировала выпадение осадков общей суммой 207 мм (это составило около 160 % по отношению к климатической среднемесячной норме [13]). За 12 часов 4 сентября выпало 50 мм осадков, что относит их к очень сильным [12]. Затем наблюдалась непрерывная умеренная морось, которая перешла в дождь (сумма осадков за 12 часов составила 20 мм). В течение следующих 12 часов наблюдался очень сильный ливневый дождь с количеством осадков 134 мм [<https://rp5.gu/>].

Метеостанция Находка находится на м. Шефнера залива Находка на высоте 32 м над уровнем моря и отражает фоновую картину выпадения осадков в исследуемый период в устьевой части реки Партизанская. Характер выпадения двухсуточных дождей идентичен таковым на метеостанции Партизанск, их сумма составила 184 мм, это на 23 мм меньше, чем в Партизанске, что объясняется особой орографией Партизанска (наветренная сторона по отношению к влагонесущему потоку и большая высота над у. м.).

Выход тропического циклона в район Японского моря, согласно разработкам дальневосточных синоптиков, возможен в тех случаях, когда тайфун не изолирован от высотной полярной ложбины, и ось последней располагается между 110 и 130° в. д. Причем ложбина вовлекает его в свое движение только в тех случаях, когда южная ее часть проходит не далее 15° широты к северу от центра тайфуна [15]. Структура высотного поля, представленная на рис. 6б, указывает на глубокое проникновение полярной ложбины к югу, периферия которой достигала 35° с. ш., в то время как ось самой ложбины располагалась вдоль 115° в. д., а расстояние до центра тайфуна составляло около 8° широты. Таким образом, подобное взаимное расположение тайфуна и ложбины указывало на возможный выход тайфуна в течение суток на акваторию Японского моря.

4 сентября в 12 ч ВСВ тайфун «Хиннамнор» с давлением в центре 945 гПа находился в точке с координатами 27,7° с. ш. и 124,5° в. д. (замкнутая циркуляция достигала поверхности АТ₃₀₀), над бассейном Амура (правобережье р. Аргунь и хр. Большой Хинган) располагался высокий циклон (замкнутый центр прослеживался на АТ₃₀₀) с минимальным давлением в центре 996 гПа, еще один небольшой частный циклон с давлением 1004 гПа находился над юго-западным побережьем Японского моря. Все три циклонических вихря были объединены общей изобарой 1006 гПа (рис. 6а).

Через сутки (5 сентября в 12 ч ВСВ) тайфун (давление в центре 950 гПа) сместился на крайний юго-запад Японского моря, в его систему

вошел фронтальный раздел; частный циклон с давлением 1010 гПа продолжал смещаться на северо-восток, континентальный же циклон распался на два центра, оставаясь малоподвижным.

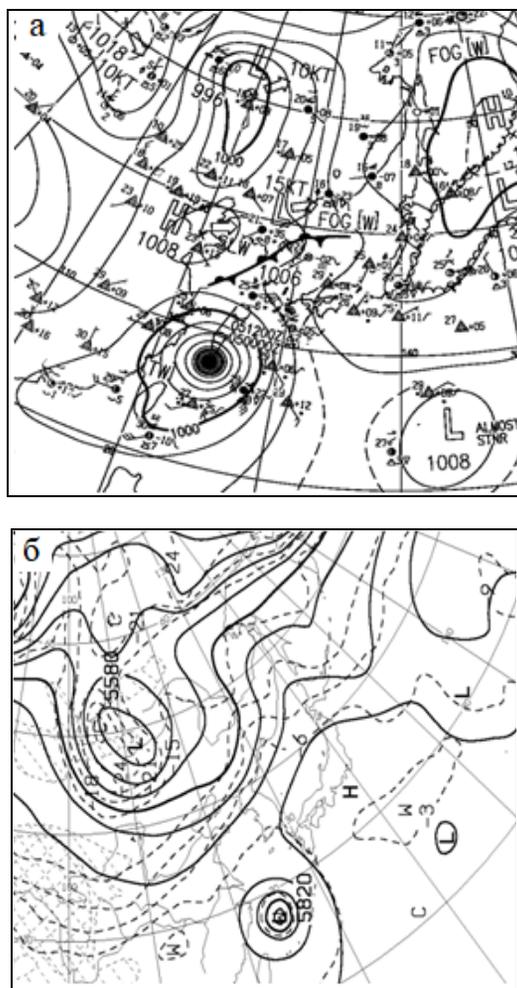


Рис. 6. Фрагмент приземной карты (а) и карты AT_{500} (б) за 12 ч ВСВ 4 сентября 2022 г. [https://www.jma.go.jp/bosai/weather_map].

Fig. 6. Fragment of the surface map (a) and the AT_{500} map (b) for 12 UTC on September 4, 2022. [https://www.jma.go.jp/bosai/weather_map].

Существенные изменения в циркуляционной системе воздушных вихрей произошли 6 сентября в 12 ч ВСВ: тайфун трансформировался во внетропический циклон с давлением 980 гПа, объединившись изобарой 992 гПа с континентальным циклоном, который интенсивно углубился до 988 гПа. Бывший тайфун находился под дельтой высотной фронтальной

зоны интенсивностью около 30 дкм/1000 км, в передней части располагался термический гребень (с температурой около 0 °С на АТ₅₀₀), а в тыловой интенсивный очаг холода (-23 °С на АТ₅₀₀). Таким образом, динамические и термические условия способствовали поддержанию циклонической циркуляции, восходящих вертикальных движений, способствующих развитию глубокой конвекции.

По материалам аэрологического зондирования атмосферы на станции Садгород (пригород Владивостока, расстояние по прямой до Партизанска составляет около 100 км) состояние атмосферы в период выпадения очень сильных осадков характеризовалось как неустойчивое (доступная конвективная энергия составила 93, CAPE около 107 единиц), атмосфера была влагонасыщена (относительная влажность превышала 90 %, что указывает на наличие облачности) в слоях от 0 до 7,5 км. Общее содержание влаги во всей толще зондируемой атмосферы за три аэрологических срока составило около 102 мм.

Проведенный анализ гидрометеорологических условий развития выдающегося наводнения в сентябре 2022 г. и сравнительная характеристика со сходными условиями наводнения 1980 г. обозначили задачу выяснения причин повышенного уровня нынешнего наводнения. Возможно, причина кроется в антропогенном изменении территории бассейна реки Партизанская. С этих позиций нами были рассмотрены изменения площадей лесов и пахоты с 2000 по 2022 год.

Для проведения оценки изменения растительного покрова в районе водосборного бассейна реки Партизанская была подобрана пара ретроспективных спутниковых снимков ИСЗ серии «Landsat» с минимальной облачностью: были отобраны сцены за 13 июля 2000 г. и за 2 июля 2022 г. с пространственным разрешением 30 м, для которых была проведена процедура атмосферной коррекции и первичной обработки. Для получения более детального изображения, синтезированного в цветах, позволяющих наиболее контрастно выделить те участки земной поверхности, которые подвергаются каким-либо изменениям с учетом растительного покрова, при помощи процедуры «pan-sharpening» разрешение изображений было увеличено до 15 м. С точки зрения спектральных характеристик спутниковых данных процедура «pan-sharpening» существенно изменяет их свойства, поэтому указанная процедура применялась только для цветосинтезированных изображений. Также было проведено маскирование облачности, попавшей в исследуемую область.

В ходе визуальной оценки было выявлено, что в 2022 г. площадь земель, занятых какой-либо деятельностью (распаханные поля, вырубка деревьев, урбанизация) занимает гораздо меньшую площадь, чем в 2000 г. К 2022 г. произошло зарастание территорий, которые в 2000 году были свободны от растительности. Кроме того, к 2022 г. произошло зарастание окрестностей населенных пунктов, расположенных вблизи реки Партизанская и ее бассейна.

Кроме этого, на основе отобранных спутниковых сцен был рассчитан вегетационный индекс NDVI и построены индексные изображения для бассейна реки Партизанская (рис. 7).

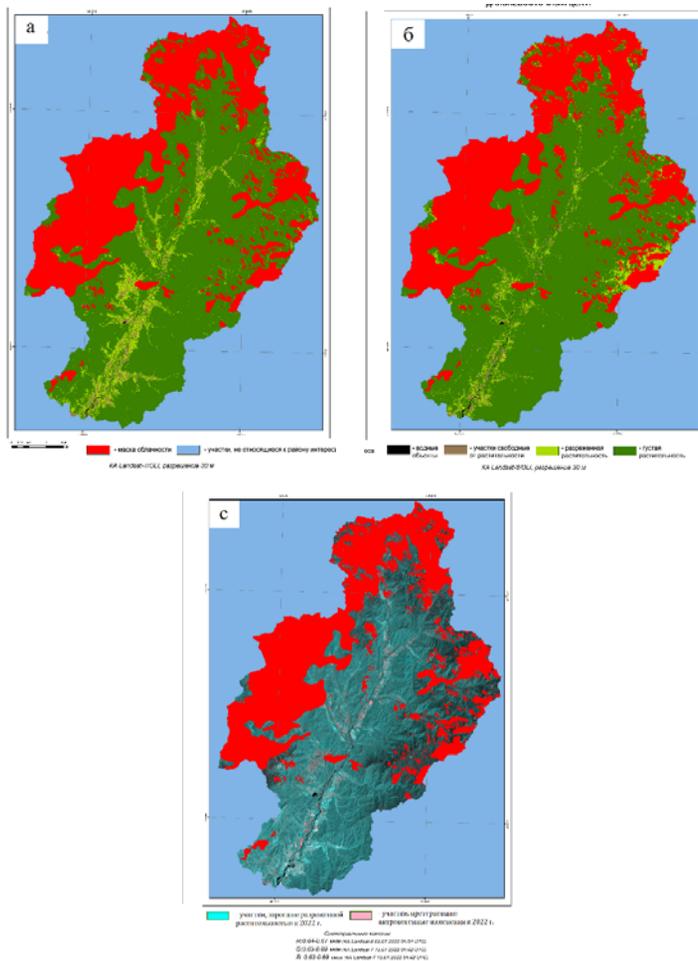


Рис. 7. Карта вегетационного индекса NDVI за 13.07.2000 г. (а) и 02.07.2022 г. (б) и разновременного синтеза бассейна р. Партизанская (с).

Fig. 7. Map of the vegetation index NDVI for July 13, 2000 (a) and July 2, 2022 (б) and multi-temporal synthesis of the Partizanskaya River basin (c).

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный относительный индекс растительности – простой количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом). Индекс NDVI является самым распространенным для задач количественной оценки растительного покрова, он вычисляется по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})},$$

где ρ_{NIR} – коэффициент отражения в ближнем инфракрасном диапазоне (0.76–0.90 мкм); ρ_{RED} – коэффициент отражения в красной области спектра (0.63–0.69 мкм) [19].

Рассчитанные величины NDVI принимают значения от -1 до 1. Отрицательные значения указывают на наличие водных объектов, облачности, искусственных материалов (асфальтовые дороги, бетонные сооружения и т. п.) или снежного покрова. Поверхность, свободная от растительности, обычно принимает значения 0,025, значения в диапазоне от 0,025 до 0,5 указывают на разреженную растительность, густая растительность принимает значения от 0,7 и выше.

Численные оценки, проведенные на основе анализа карт вегетационного индекса указанной территории, представлены в табл. 2. Анализ результатов также показывает увеличение площади заросших земель, которые в 2000 г. были свободны от растительности (табл. 2)

Таблица 2. Численные оценки изменения характера территории за 2000–2022 г.

Table 2. Numerical estimates of changes in the nature of the territory for 2000–2022

Год	Площадь поверхности, свободной от растительности, км ²	Площадь поверхности, занятой разреженной растительностью, км ²	Площадь поверхности, занятой густой растительностью, км ²
2000	68,04	206,50	2334,76
2022	40,85	156,40	2409,39

Анализ изображения с разновременным синтезом (рис. 7с) подтверждает выводы, полученные в ходе визуальной оценки. На изображении голубым цветом выделяются те участки земной поверхности, которые к 2022 г. заросли разреженной растительностью, а также заброшенные участки населенных пунктов, которые со временем также заросли. Розовым цветом выделяются появившиеся к 2022 г. участки земной поверхности, которые претерпели изменения (постройка ряда объектов инфраструктуры, ведение сельскохозяйственной деятельности, возможно, вырубка лесов и т. п.).

По рис. 7 косвенно можно судить о количестве воды в русловой сети: в июле 1980 г. (рис. 7а) водный объект визуализируется только в устьевой зоне, а в 2022 г. практически прослеживается до верхнего течения (рис. 7с). Это указывает на повышенную водность реки в данный временной отрезок, что дополнительно свидетельствует о переувлажненности бассейна в период, предшествующий наводнению.

Несмотря на увеличение в последние 22 года площади густой растительности в долине реки Партизанская, в то же время увеличились и площади, претерпевшие хозяйственные изменения. Мероприятия, выполняемые в бассейне, влекут за собой увеличение жидкого и твердого склонового стока на водосборе. Чем больше интенсивность дождя, тем больше «выбивается» частиц почвы. Кроме того, при наличии некоторого смачивания или слоя воды происходит интенсивный выброс частиц почвы, который в свою очередь поверхностным стоком переносится в русло реки [7]. Такая ситуация была обусловлена выпавшими 4 сентября значительными осадками непосредственно перед выходом тайфуна на территорию юго-восточного Приморья. На пропускную способность реки и ее притоков повлияло также наличие препятствий в русле (поваленные деревья, валежник, осередки и т. п.), включая низководные мосты и переходы трубопроводов в средней и нижней частях бассейна. Это в свою очередь стало одним из факторов увеличения объема разливов.

Подобного выдающегося наводнения как отклика на выход тропического циклона в бассейне реки Партизанская не было с 1972 г. В сентябре 2022 г. оно произошло на фоне изменяющегося климата, увеличения интенсивности ливневых осадков и антропогенного влияния.

По оценкам ансамблевых моделей СМIP6, увеличение количества средних летних осадков для юга Приморского края в период 2041–2060 гг. составит 10–20 % по отношению к периоду 1995–2014 гг. [11, 16].

Заключение

Изменчивость развития опасных гидрометеорологических процессов является существенной причиной возникновения рисков от наводнений. В силу природных особенностей функционирования гидроклиматической системы и вероятностного характера опасных гидрологических событий предсказать сценарий развития наводнений является одной из сложнейших задач.

Проведенный сравнительный анализ «реакции» речной системы на «однотипную» траекторию перемещения тропического циклона за 1980 и 2022 гг. показал, что интенсивность выпадения осадков за сентябрьский паводок 2022 г. (134 мм за 12 часов) значительно превосходило таковую в 1980 г. (166 мм за три дня); предшествующее паводку увлажнение водосбора продолжалось в течение двух летних месяцев. Согласно значениям вегетационного индекса за 2000 и 2022 гг., произошло увеличение площади густой растительности на водосборе при одновременном усилении антропогенного воздействия на элементы речной системы. Синтезированные снимки высокого разрешения позволяют оценить предшествующую увлажненность бассейна и уточнить краткосрочные гидрологические прогнозы распространения паводочной волны.

Полученные в настоящей работе результаты подчеркивают растущий риск наводнений, вызванных ливнями, в условиях потепления и важность выявления механизмов, вызывающих эти наводнения.

Список литературы

1. Атлас Приморского края. Владивосток: Дальпресс, 2008. 48 с.
2. Болгов М.В., Алексеевский Н.И., Гарцман Б.И., Георгиевский В.Ю., Дугина И.О., Ким В.И., Махинов А.Н., Шалыгин А.Л. Экстремальное наводнение в бассейне Амура в 2013 году: анализ формирования, оценки и рекомендации // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 17-26.
3. Бортин Н.Н., Милаев В.М., Горчаков А.М. Влияние природных и антропогенных факторов на пропускную способность русла реки Амур у города Хабаровска при прохождении паводков // Водное хозяйство России. 2020. № 2. С. 66-82.
4. Бортин Н.Н., Милаев В.М. Исследование многолетней динамики и схема сверхдолгосрочного прогноза наводнений на реке Амур // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. № 4. С. 45-59.
5. Гарцман Б.И., Шамов В.В. Натурные исследования стокоформирования в Дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 6, С. 589-599.
6. Горбатенко Л.В. Оценка максимального стока рек прибрежной территории Приморского края в связи с опасностью наводнений // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 3. С. 6-15.
7. Дербенцева А.М., Нестерова О.В., Степанова А.И., Ткаченко В.И., Ознобихин В.И., Евсеев А.Б., Пилипушка В.Н. Источники и особенности седиментогенеза дальневосточного побережья Японского моря: Учебное пособие. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 2007. 104 с.
8. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Бассейны Уссури и рек Японского моря / отв. ред. Л.Н. Прохоренко. Владивосток, 1972-1986. Т. 1, вып. 21.
9. Ивашильников Ю.К. Физическая география и природные ресурсы Дальнего Востока России. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 2010. 338 с.
10. Как тайфуны-варвары терроризировали Приморье за последние 65 лет. PrimaMedia. <https://primamedia.ru/news/457726>
11. Катцов В.М., Павлова Т.В., Говоркова В.А., Мелешко В.П., Спорышев П.В., Хлебникова Е.И., Школьник И.М. Сценарные прогнозы изменений климата на территории России в XXI веке на основе ансамблевых расчетов с моделями СМIP6 // Труды ГГО. 2022. № 604. С. 5-54.
12. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. РД 52.27.724–2019. М.: Гидрометцентр России, 2019. 66 с.
13. Научно-прикладной справочник по климату. Серия 3, части 1–6, вып. 26. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 414 с.
14. Ресурсы поверхностных вод СССР. Приморье. Т. 18, вып. 3 / под ред. А.П. Муранова. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 452 с.
15. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Дальний Восток. Ч. II, вып. 5. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 176 с.
16. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. СПб.: Научное издание, 2022. 676 с.
17. Шамов В.В., Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Макагонова М.А. Исследования гидрологических последствий современных изменений климата в Дальневосточном регионе России // Вестник ДВО РАН. 2014. № 2. С. 15-23.

18. Motovilov Yu.G., Bugaets A.N., Gartsman B.I., Gonchukov L.V., Kalugin A.S., Moreido V.M., Suchilina Z.A., Fingert E.A. Assessing the Sensitivity of a Model of Runoff Formation in the Ussuri River Basin // *Water Resources*. 2018. No. 45. P. 128-134 [in Russ.].

19. Rouse J.W. and et al. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351, Washington DC. 1973. P. 309-317.

References

1. Atlas Primorskogo kraya [Atlas of Primorsky Krai]. Vladivostok: Dal'press publ., 2008, 48 p. [in Russ.].

2. Bolgov M.V., Alekseevskiy N.I., Gartsman B.I., Georgievskiy V.Yu., Dugina I.O., Kim V.I., Mahinov A.N., Shalygin A.L. The 2013 extreme flood within the Amur basin: analysis of flood formation, assessments and recommendations. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources], 2015, no. 3, pp. 17-26 [in Russ.].

3. Bortin N.N., Milayev V.M., Gorchakov A.M. Natural and Anthropogenic Factors Impact on the Amur river Bed Passage Ability near Khabarovsk during Flood Passing. *Vodnoe hozyaystvo Rossii* [Water Sector of Russia], 2020, no. 2, pp. 66-82. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-2-5 [in Russ.].

4. Bortin N.N., Milayev V.M. Examination of the Long-term Dynamics and the Scheme of Super-longterm Forecast for Inundation on the Amur River. *Vodnoe hozyaystvo Rossii* [Water Sector of Russia], 2014, no. 4, pp. 45-59. DOI: 10.35567/1999-4508-2014-4-4 [in Russ.].

5. Gartsman B.I., Shamov V.V. Field Studies of Runoff Formation in the Far East Region Based on Modern Observational Instruments. *Water Resources*, 2015, vol. 42, no. 6, pp. 766-775. DOI: 10.1134/S0097807815060044.

6. Gorbatenko L.V. Assessment of the rivers' maximum runoff in the coastal territory of Primorsky Region in the view of floods hazard. *Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Transbaikal State University Journal], 2021, vol. 27, no. 3, pp. 6-15. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-3-6-15 [in Russ.].

7. Derbenceva A.M., Nesterova O.V., Stepanova A.I., Tkachenko V.I., Oznobihin V.I., Evseev A.B., Pilipushka V.N. Istochniki i osobennosti sedimentogeneza dal'nevostochnogo poberezh'ya Yaponskogo morya. Uchebnoe posobie. Vladivostok: DVGU publ., 2007, 104 p. [in Russ.].

8. Ezhegodnye dannye o rezhime i resursah poverhnostnyh vod sushy. Basseyny Ussuri i rek Yaponskogo morya. otv. red. L.N. Prohorenko. Vladivostok, 1972-1986, vol. 1, no. 21 [in Russ.].

9. Ivashinnikov Yu.K. Fizicheskaya geografiya i prirodnye resursy Dal'nego Vostoka Rossii. Vladivostok, Izdatel'stvo Dal'nevostochnogo universiteta, 2010, 338 p. [in Russ.].

10. Kak tayfuny-varvary terrorizirovali Primor'e za poslednie 65 let. PrimaMedia. Available at: <https://primamedia.ru/news/457726>

11. Kattsov V.M., Pavlova T.V., Govorkova V.A., Meleshko V.P., Sporyshev P.V., Khlebnikova E.I., Shkolnik I.M. Climate change projections over the territory of Russia through the XXI century based on ensembles of CMIP6 models. *Trudy GGO* [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory], 2022, vol. 604, pp. 5-54 [in Russ.].

12. Nastavleniya po kratkosrochnym prognozam pogody obshchego naznacheniya / Rukovodyashchiy document. RD 52.27.724–2019. Moscow, Gidrometcentr Rossii, 2019, 66 p. [in Russ.].

13. Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu. Seriya 3, chasti 1-6, vyp. 26. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1988, 414 p. [in Russ.].
14. Resursy poverhnostnyh vod SSSR. Primor'e. T. 18, vyp.3. pod red. A.P. Muranova. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1972, 452 p. [in Russ.].
15. Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody. Dal'niy Vostok. CH. II, vyp. 5. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1988, 176 p. [in Russ.].
16. Tretiy ocenochnyy doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossiyskoy Federacii / pod red. V. M. Katcova. Rosgidromet, Sankt-Peterburg: Naukoemkie tekhnologii, 2022, 676 p. [in Russ.].
17. *Shamov V.V., Gartsman B.I., Gubareva T.S., Makagonova M.A.* Issledovaniya gidrologicheskikh posledstviy sovremennyh izmeneniy klimata v Dal'nevostochnom regione Rossii. *Vestnik DVO RAN [Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences]*, 2014, no. 2, pp. 15-23 [in Russ.].
18. *Motovilov Yu G., Bugaets A.N., Gartsman B.I., Gonchukov L.V., Kalugin A.S., Moreido V.M., Suchilina Z.A., Fingert E.A.* Assessing the Sensitivity of a Model of Runoff Formation in the Ussuri River Basin. *Water Resources*, 2018, no. 45, pp. 128-134.
19. *Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351, Washington DC. 1973, pp. 309-317.

*Поступила 27.12.2022; одобрена после рецензирования 16.03.2023;
принята в печать 31.03.2023.
Submitted 27.12.2022; approved after reviewing 16.03.2023;
accepted for publication 31.03.2023.*