Russian Journal of Earth Sciences ISSN: 1681-1208

Наводнения и изменения климата на западном побережье Японского моря в позднем голоцене: реконструкции по геохимическим критериям, роль в коллапсе государства Бохай

А. С. Астахов[1,*], А. В. Дарьин[2], К. И. Аксентов[1], А. В. Алаторцев[1] и И. А. Калугин[2]

[1]Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Российская Федерация
[2]Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация
***Адрес для корреспонденции:** Анатолий Сергеевич Астахов, astakhov@poi.dvo.ru

Аннотация: В последние десятилетия на западном побережье Японского моря, включая территории северо-восточного Китая, юго-востока России, севера Кореи, участились случаи катастрофических наводнений на реках. В качестве возможных причин этого рассматриваются изменения климата и антропогенное вмешательство в русловые процессы. Целью работы стала оценка роли климатических изменений с использованием реконструкции частоты и интенсивности наводнений за последние тысячелетия в бассейне одной из рек, впадающей в Японское море. По данным субмиллиметрового сканирования шельфовых отложений Амурского залива на установке рентгенофлюоресцентного анализа, использующей синхротронное излучение, реконструированы частота и интенсивность наводнений в позднем голоцене. В качестве основной причины возникновения наводнений на реках побережья подтверждена преобладающая роль тайфунов (тропических ураганов), возможность проникновения которых в регион увеличивается в теплые периоды. Благодаря этому в вариациях частоты и интенсивности наводнений в последние тысячелетия проявляется зависимость от изменений температуры воздуха и солнечной инсоляции в летнее время. Установлен многолетний тренд уменьшения интенсивности наводнений в позднем голоцене, отчетливое снижение их частоты во время холодного Малого ледникового периода и рост частоты и интенсивности при повышении температуры воздуха в XX–XXI веках н.э. Последнее было зарегистрировано гидрометеорологическими наблюдениями и послужило основой для пессимистических прогнозов на будущее. На примере средневекового государства Бохай X века н.э. показано влияние изменений климата, наводнений и других природных катастроф на хозяйственную деятельность человека в условиях, близких современным.

Ключевые слова: наводнения, палеоклиматология, Приморский край, Амурский залив, донные осадки, геохимия, бром, Бохай, вулкан Байтоушан (Пектусан)

Цитирование: Астахов А. С., Дарьин А. В., Аксентов К. И., Алаторцев А. В., и Калугин И. А. Наводнения и изменения климата на западном побережье Японского моря в позднем голоцене: реконструкции по геохимическим критериям, роль в коллапсе государства Бохай // Russian Journal of Earth Sciences. — 2026. — Т. 26. — ES3020. — DOI: 10.2205/2026es001105 — EDN: DKHXIW

Research Article

https://elibrary.ru/DKHXIW

Получено: 6 июня 2025 г.
Принято: 27 февраля 2026 г.
Опубликовано: 29 сентября 2026 г.

© 2026. Коллектив авторов.

1. Введение

В последние годы отмечается увеличение числа наводнений, в том числе катастрофических, на юго-востоке России, северо-востоке Китая и севере Кореи [*Махинов и Ким*, 2020; *Махинов и др.*, 2023; *Федоровский и др.*, 2019; *Qi et al.*, 2021; *Wu et al.*, 2023]. Анализ изменчивости гидрологических условий за период наблюдений показал,

что в дальнейшем риск наводнений в регионе будет возрастать как в среднесрочной (2051–2075 гг.), так и в долгосрочной (2076–2100 гг.) перспективе [*Wu et al.*, 2023]. По данным И. А. Лисиной с соавторами [*Лисина и др.*, 2023], количество летних осадков на юге Приморского края увеличится в 2041–2060 гг. на 10–20 % относительно 1995–2014 годов. В качестве причин возникновения наводнений указываются тропические ураганы (тайфуны) и летние муссонные дожди, усиливающиеся при прохождении тайфунов или внетропических циклонов [*Федоровский и др.*, 2019; *Razjigaeva et al.*, 2025]. Основной причиной наводнений в регионе считаются тайфуны [*Лисина и др.*, 2023; *Katsuki et al.*, 2016; *Liu et al.*, 2001]. Выход их на побережье Приморья возможен раз в 3–4 года, а с осадками тайфунного происхождения здесь связаны более 60 % наводнений [*Федоровский и др.*, 2019].

При прохождении внетропических циклонов ливневые осадки, приводящие к наводнениям в долинах рек, возникают при аномальных изменениях динамики воздушных масс над юго-востоком России: увеличении амплитуды волн Россби, меандрировании зоны западного переноса, возникновении блокирующего антициклона над западом Тихого океана и др. [*Махинов и др.*, 2023; *Huo et al.*, 2023]. Часто это приводит к смещению на север полярного фронта, влекущего за собой насыщенные влагой воздушные массы, сформированные над Жёлтым и Восточно-Китайским морями и обычно разгружающиеся в зоне Мейю (Meiyu) [*Gong et al.*, 2002; *Huo et al.*, 2023; *Li et al.*, 2020]. Показано, что такая ситуация наиболее вероятна при больших отрицательных значениях Арктической осцилляции [*Huo et al.*, 2023; *Li et al.*, 2020].

Целью данной работы явилась реконструкция частоты наводнений на побережье Японского моря в позднем голоцене, определение периодичности и причин изменчивости, а также взаимосвязи с вариациями климатических условий. В качестве основы для реконструкции использовалось выявленное ранее присутствие в шельфовых отложениях центральной части залива слоёв осадков, обеднённых бромом и накопившихся в периоды пониженной солёности вод [*Kalugin et al.*, 2015]. От вмещающих отложений они отличаются по химическому составу и, иногда, более грубым (алевритовым) гранулометрическим составом, меньшими значениями рентгеновской плотности. В осадках, накопившихся за последнее столетие, эти прослои в большинстве случаев удалось сопоставить с известными эпизодами прохождения тайфунов и наводнений в бассейне реки Раздольной [*Астахов и др.*, 2019; *Kalugin et al.*, 2015]. Наиболее показательным химическим индикатором таких прослоев является бром – типичный биогенный элемент, до 75 % количества которого в земной коре находится в океане [*Шишкина и др.*, 1969]. Различия в содержании брома, а также отношение $Br/C_{орг.}$ часто используются для разделения морских и континентальных отложений или для определения генезиса органического вещества в них [*Malcolm and Price*, 1984; *Mayer et al.*, 2007]. По сравнению с ранее выполненной по колонке LV66-3 реконструкцией наводнений для последних 1800 лет [*Астахов и др.*, 2019], в данной работе на основе новых аналитических данных [*Astakhov et al.*, 2026] и усовершенствованной методики реконструированы наводнения для 4800 лет, а интерпретация условий их возникновения проводилась с учётом новых данных об изменчивости глобального и регионального климата.

2. Материалы и методы

В качестве основного объекта исследований выбрана колонка донных осадков LV66-3 длиной 466 см, полученная гравитационной трубкой в 66-м рейсе НИС «Академик М. А. Лаврентьев» в 2014 г. в Амурском заливе Японского моря (рис. 1а). Она была получена в центральной части залива за пределами зоны смешения морских и речных вод при сезонных паводках (рис. 1а) в районе максимальной гипоксии придонных вод [*Тищенко и др.*, 2011]. Последнее требовалось для обеспечения минимальной биотурбации осадков в условиях угнетения бентосной фауны. По данным сейсмоакустического профилирования в этой точке установлено однородное строение осадочной толщи без видимых перерывов в осадконакоплении и включений осадков иного состава [*Karnaukh et al.*, 2016]. На этой же станции многоколонковым пробоот-

борником был отобран ненарушенный монолит А15-2 для более детального изучения верхнего слоя осадков (рис. 1а). Для обоснования отдельных положений статьи использованы данные по длинным колонкам, также полученным в 2014 году LV66-1 и LV66-2 [*Акуличев и др.*, 2016] и монолитам, полученным многоколонковым пробоотборником на станциях I08-3, 12-3, 12-4, 12-5 [*Kalugin et al.*, 2015].

При первичной обработке колонки LV66-3 были определены физические свойства осадков [*Акуличев и др.*, 2015; *Karnaukh et al.*, 2016] и отобраны пробы с интервалом 10 мм для различных видов дискретного анализа. По всей длине колонки были отобраны монолиты длиной 170 мм, перекрывающиеся на 15 мм. Из них были приготовлены твёрдые препараты и выполнено высокоразрешающее (с шагом 0,5–0,8 мм) сканирование химического состава осадков с использованием рентгенофлюоресцентной установки на синхротронном излучении (РФА СИ) [*Astakhov et al.*, 2026]. Для верхних 208 см колонки по этим данным ранее были реконструированы наводнения для последних 1800 лет [*Астахов и др.*, 2019].

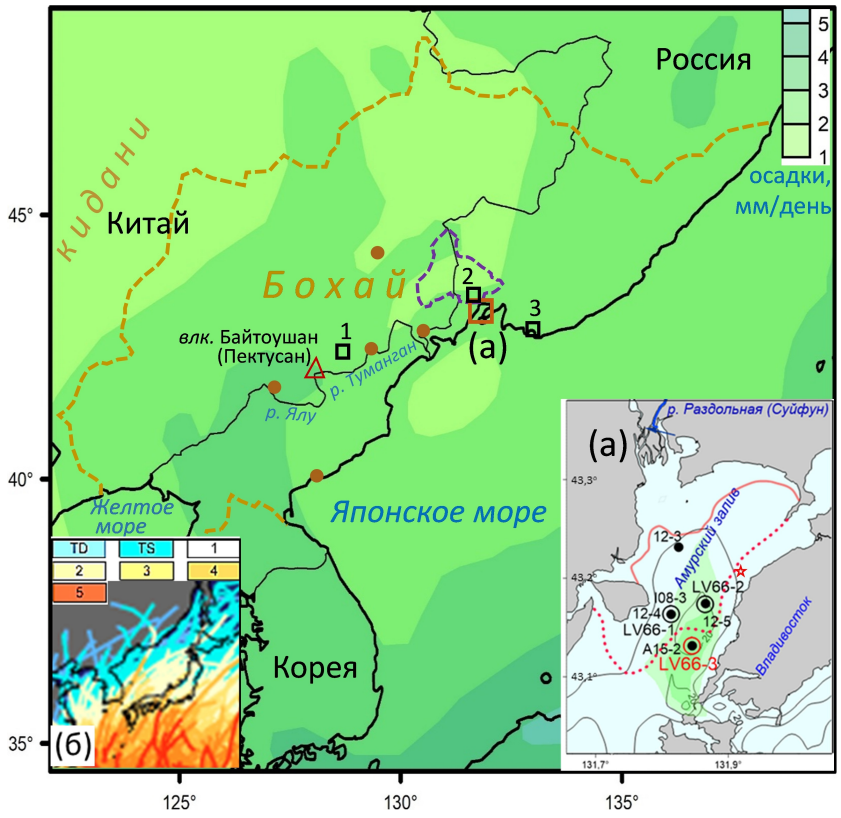


Рис. 1. Среднегодовые атмосферные осадки (мм/день) в Япономорском регионе [*Shu et al.*, 2025], район исследований (а), границы государства Бохай (коричневая штриховая линия) и его столицы (коричневые точки). Фиолетовой штриховой линией показан водосборный бассейн реки Раздольной, квадратами – объекты палеоклиматических реконструкций, использованных в работе: 1 – озеро Сихайлунван [*Stebich et al.*, 2015], торфяники Хани [*Hong et al.*, 2005] и Цзиньчуань [*Hong et al.*, 2001]; 2 – озеро Утиное [*Разжигаева и др.*, 2023а]; 3 – озеро Гнилое [*Лящевская и др.*, 2023]. (а) места отбора изученных колонок и положение зоны гипоксии (зелёная заливка) в Амурском заливе Японского моря [*Тищенко и др.*, 2011]; красные сплошная и штриховая линии – границы области максимального смешения морских и речных вод (солёность менее 20 ‰) для летней межени и летнего паводка соответственно [*Аникиев и др.*, 2000], красной звёздочкой показано положение гидрохимической станции [*Шулькин и др.*, 2013]; (б) траектории движения и интенсивность тайфунов в северо-западной части Тихого океана, TD – тропическая депрессия, TS – тропический шторм, 1–5 – интенсивность ураганов по шкале Саффира – Симпсона.

Контрольный химический анализ осадков выполнялся по дискретным образцам с шагом 1–4 см рентгенофлуоресцентным методом на энергодисперсионном спектрометре ARL Quant'X (Thermo Fisher) с использованием стандартов SGH5, MAN, JH-1 [*Astakhov et al.*, 2026]. Гранулометрический состав отложений, содержание ртути и органического углерода определялись стандартными методами [*Астахов и др.*, 2019; *Kalugin et al.*, 2015].

Возрастная модель колонки была обоснована AMS ^{14}C датировками раковин моллюсков, распределением ^{210}Pb и ^{137}Cs, палеомагнитными, тефростратиграфическими и литостратиграфическими данными [*Акуличев и др.*, 2016; *Астахов и др.*, 2019]. Позднее была построена модель возраст – глубина на основе байесовского моделирования в пакете `R Bacon` (рис. 2).

3. Результаты и обсуждение

3.1. Условия осадконакопления и особенности вещественного состава осадков

Условия осадконакопления в северной части Амурского залива определяются преимущественно влиянием реки Раздольной (рис. 1), суммарный твёрдый сток которой изменяется от 2 до 32 кг/с [*Михайлик и др.*, 2011; *Шулькин и др.*, 2013]. Зона смешения морских и речных вод и шлейф замутнённых смешанных вод во время паводков (рис. 1а), распространяясь преимущественно вдоль западного берега залива [*Дубина и др.*, 2018], достигает центральной и восточной частей залива [*Аникиев и др.*, 2000; *Шулькин и др.*, 2013]. В связи с этим в северной части залива отмечены очень высокие скорости осадконакопления, особенно на ближайших к устью реки станциях. На станциях 12-3, 12-5 (рис. 1а) она достигает 3–7 мм/год в последние столетия [*Kalugin et al.*, 2015]. В позднеголоценовых отложениях в целом она составляет 1–2 мм/год на станции LV66-3 (рис. 2) и 2–3 мм/год на станции LV66-1 [*Акуличев и др.*, 2016].

Осадки колонки LV66-3 при относительно высокой и стабильной скорости осадконакопления имеют однородный вещественный состав (рис. 2). Это монотонные чёрные или темно-серые алевриты и глинистые алевриты с существенной примесью (10–20 %) песка, без видимой слоистости и с мало изменяющимися плотностью и влажностью [*Акуличев и др.*, 2015; *Karnaukh et al.*, 2016]. Изменчивость состава осадков определяется присутствием раковин моллюсков или их обломков, выделяющихся, например, по низким значениям Rb/Sr (рис. 2), а также наличием прослоев пирокластики. Осадки, обогащённые тефрой нескольких стадий извержения В-ТМ вулкана Байтоушан/Пектусан в X веке нашей эры, хорошо выделяются по содержанию Zr (рис. 1), Nb, Y [*Акуличев и др.*, 2016]. Помимо пика содержаний этих элементов в период извержений, они обогащают также вышележащие осадки за счёт сноса реками пирокластики, выпавшей на сушу, что хорошо демонстрируется распределением циркония (рис. 2).

Характерной особенностью осадконакопления в Амурском заливе является сезонная гипоксия придонных вод, возникающая в летние сезоны с аномально высокой биопродуктивностью фитопланктона [*Тищенко и др.*, 2011]. В процессе окисления осевшей на дно биомассы диатомей гетеротрофными организмами потребляется кислород придонных вод, не возобновляемый из-за ограниченного перемешивания вод летом. Возникающие в придонных водах и в поверхностном слое осадков аноксидные условия определяют накопление в них редокс-чувствительных элементов. В качестве примера приведены вариации молибденового модуля Mo/Mn (рис. 2), часто используемого для индексации аноксидных и эвксинных обстановок [*Калугин и др.*, 2019; *Холодов и Недумов*, 2005]. Отмеченное по колонке уменьшение величины Mo/Mn и, соответственно, аноксидности в позднем голоцене хорошо согласуется с вариациями биопродуктивности (численности) диатомей [*Прушковская и Цой*, 2019].

3.2. Сигналы наводнений

По данным субмиллиметрового РФА СИ сканирования в пелит-алевритовых осадках колонок, отобранных в зоне гипоксии, в том числе в колонке LV66-3 (рис. 1), установлено наличие прослоев, накопившихся в периоды катастрофических наводнений

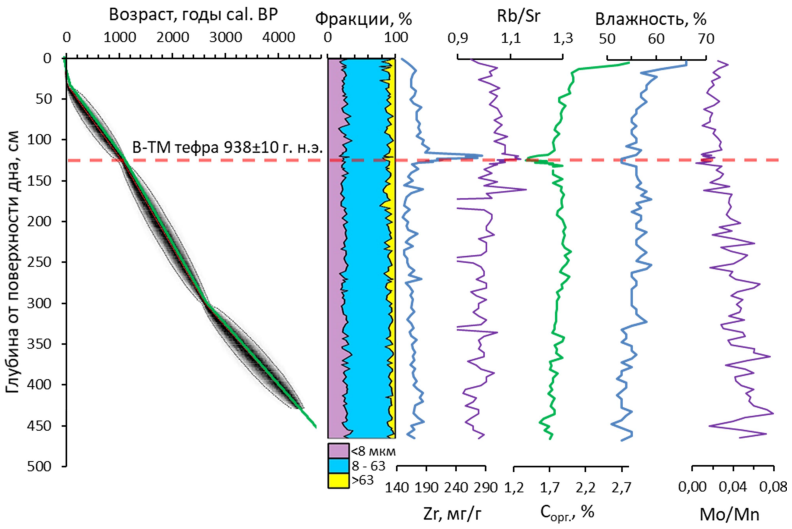


Рис. 2. Возрастная модель колонки LV66-3 [по *Astakhov et al.*, 2026] и особенности вещественного состава осадков по данным дискретного (с шагом 1–4 см) анализа.

в бассейне реки Раздольной [*Астахов и др.*, 2019; *Kalugin et al.*, 2015] и обеднённых бромом, обычно поставляемым в осадки с морским планктогенным органическим веществом [*Malcolm and Price*, 1984; *Mayer et al.*, 2007]. Они имеют толщину до нескольких миллиметров (рис. 3а), а низкие содержания брома в них связаны с формированием биомассы фитопланктона в условиях распреснения центральной части залива паводковыми и дождевыми водами (рис. 1а). Это распреснение начинается еще до наводнения, так как многим из них предшествует период ливневых дождей [*Федоровский и др.*, 2019], и может продолжаться достаточно долго после (рис. 3, врезка). В осадках станции 12-3 вблизи зоны постоянного распреснения (рис. 1а) содержания брома низкие и, соответственно, такие слои не проявлены [*Kalugin et al.*, 2015]; на станции LV66-1, находящейся ближе к устью р. Раздольной, чем станция LV66-3, они прослеживаются только до глубины 80 см [*Астахов и др.*, 2019].

В некоторых слоях с низким содержанием брома выделяются более тонкие (0,5–1,5 мм) слойки с низким содержанием рубидия (рис. 3а) – элемента, характерного для глинистых минералов (гидрослюды) и тонкозернистых фракций осадка [*Астахов*, 2001]. Количество слоёв с низким содержанием брома, включающих также обеднённые рубидием прослои, в целом по колонке составляет 25 %. В ее нижней части, накопившейся 2,5–4,8 тыс. лет назад, они составляют 40–45 %. Эта величина сопоставима с относительным количеством (39,5 %) наводнений, вызванных прохождением внетропических циклонов по данным гидрометеорологических наблюдений в Приморье за последнее столетие [*Федоровский и др.*, 2019]. Учитывая более грубый состав таких слоёв, можно предположить, что формирование их происходило вследствие осаждения наиболее крупной взвеси (алеврит) из шлейфа замутнённых речных вод в случае его распространения до места отбора колонки LV66-3 в центральной части залива (рис. 1а) в сезоны наиболее интенсивного стока реки Раздольной. Такие условия, по мнению некоторых авторов, возникают в периоды проникновения в регион глубоких внетропических полярно-фронтовых циклонов, часто при дополнительной подпитке с юга затухающими тайфунами [*Бережная*, 1975; *Федоровский и др.*, 2019]. В отличие от прохождения одиночных тайфунов, ливневые дожди, связанные с циклогенезом на полярных фронтах, проявляются более длительный период и распространяются на обширные территории [*Федоровский и др.*, 2019], концентрируя, в нашем случае, осадки со всего водосборного бассейна реки Раздольной. В некоторой степени это подтверждается отсутствием минимума содержаний рубидия в слое, накопившемся при прохождении тайфуна Эмма в 1954 г. (рис. 3) – единственном тайфуне четвёртой категории, достигшем побережья Приморского края за период наблюдений. Хотя он вышел на побережье значительно севернее (рис. 1б), влияние его на осадконакопление

в Амурском заливе сказалось в формировании слоя осадков с отчётливым сигналом наводнения по ΔRb/Br (рис. 3д).

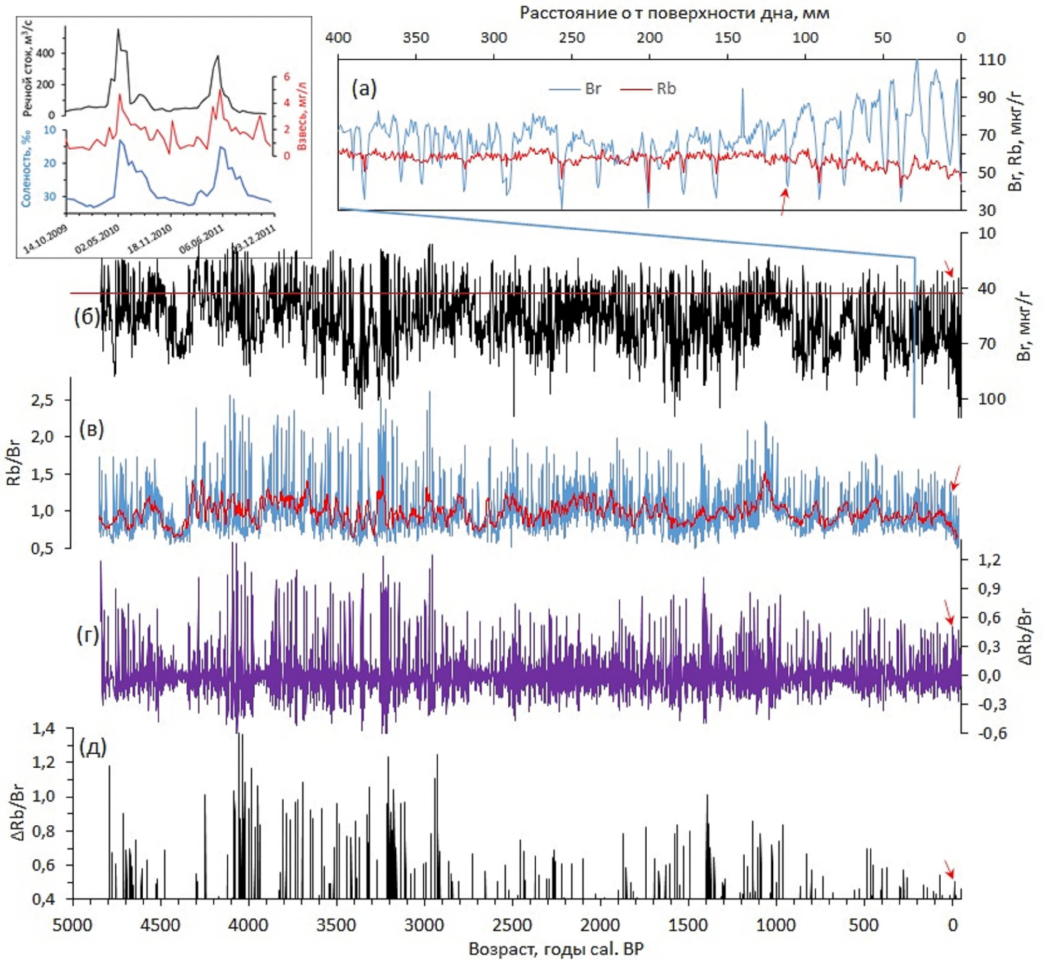


Рис. 3. Схема преобразования распределений брома и рубидия по данным РФА СИ сканирования колонки LV66-3 в сигналы наводнений Br_{min} и ΔRb/Br [по *Астахов и др.*, 2019, с дополнениями]. (а) – вариации содержаний брома и рубидия на линейной шкале на примере верхних 40 см колонки; (б) – распределение брома, красной линией показана граничная величина 45 мкг/г, принятая для выделения сигналов наводнений по Br_{min}; (в) – вариации Rb/Br, красная линия – тренд линейной фильтрации по 29 точкам; (г) – вариации ΔRb/Br – отклонения от тренда значений Rb/Br; (д) – сигналы наводнений по положительным пикам $\Delta Rb/Br > 0,4$. Красные стрелки указывают на пик, соответствующий тайфуну Эмма 1954 г. четвёртой категории по шкале Саффира – Симпсона. На врезке: изменение содержания взвеси и солёности вод в 2009–2011 годах на гидрохимической станции в Амурском заливе (рис. 1а) при сезонных паводках на реке Раздольной [по *Шулькин и др.*, 2013].

Учитывая частичную корреляцию брома и рубидия, оценка количества наводнений выполнялась с использованием двух подходов. Ранее использовался метод, основанный на подсчёте числа и амплитуды положительных пиков Rb/Br, нормированных относительно тренда этой величины [*Астахов и др.*, 2019]. В нашем случае использовался тренд по 29 точкам (рис. 3в), а в качестве сигналов наводнений принимались пики ΔRb/Br больше 0,2 и 0,4 (рис. 3д). При втором подходе за сигналы наводнений были приняты отрицательные пики содержаний брома менее 45 мкг/г (рис. 3б). Для каждого столетия подсчитывалось число сигналов наводнений (рис. 4в) и определялось минимальное содержание брома (Br_{min}) как показатель интенсивности наводнений (рис. 4е).

3.3. Изменчивость частоты и интенсивности наводнений в позднем голоцене

На рис. 4 представлены вариации изменчивости частоты сигналов наводнений (рис. 4в) и их максимальной амплитуды (рис. 4е) по столетиям, полученные двумя методами. Вариации амплитуды наводнений, определённой по абсолютной величине отрицательных пиков брома (рис. 3б) и положительных пиков ΔRb/Br (рис. 3д), хорошо согласуются между собой и с общими вариациями температуры воздуха, реконструированными для региона (рис. 4г) [*Лящевская и др.*, 2023; *Разжигаева и др.*, 2023а; *Stebich et al.*, 2015], что подтверждает имеющуюся точку зрения о смещении траекторий движения тайфунов на юг в холодные периоды [*Астахов и др.*, 2019; *Katsuki et al.*, 2016; *Liu et al.*, 2001]. Общая тенденция уменьшения интенсивности наводнений в позднем голоцене (рис. 4е) совпадает с уменьшением летней солнечной инсоляции на этой широте (рис. 4д). Холодные периоды позднего голоцена, реконструированные по спорово-пыльцевым данным для озер Утиное и Гнилое, ближайших к Амурскому заливу [*Лящевская и др.*, 2023; *Разжигаева и др.*, 2023а], очень хорошо согласуются с минимумами повторяемости наводнений (рис. 4в) и их амплитуды (рис. 4е). В то же время эти периоды совпадают с максимумами атмосферных осадков, проявленных в реконструкциях непосредственно по Амурскому заливу (рис. 4а) и в горных районах к западу от него по изотопному составу углерода и биомаркерам торфяников Цзиньчуань (рис. 4б) и Хани [*Hong et al.*, 2005, 2001; *Zheng et al.*, 2018]. Прослеживается также определённая корреляция наших данных по повторяемости и интенсивности наводнений (рис. 3д) с данными по побережью Западного Сахалина, проявленная в том числе в интенсификации наводнений в период 3,0–4,5 тыс. лет назад [*Razjigaeva et al.*, 2025].

Таким образом, наши результаты указывают на парадокс несоответствия между количеством атмосферных осадков и частотой и интенсивностью наводнений. Наибольшая интенсивность наводнений характерна для тёплых периодов позднего голоцена, тогда как количество атмосферных осадков увеличивается в холодные периоды. Такой тип климата с чередованием тёплых-сухих и холодных-влажных периодов с общим трендом на похолодание и увеличение количества атмосферных осадков ("warm-dry and cold-wet") установлен для северо-восточного Китая и континентальных районов Евразии, находящихся в зоне (42°–49° с.ш.) преобладающего влияния на летние атмосферные процессы западных ветров умеренного пояса (westerlies) [*Ding et al.*, 2022; *Zheng et al.*, 2018]. Причиной парадокса является преобладающая роль тропических ураганов (тайфунов) в формировании наводнений на реках западного побережья Японского моря. Считается, что отклонение их траектории на север происходит при повышении температуры поверхности моря северо-западной части Тихого океана [*Park et al.*, 2017], что, в свою очередь, связано с повышенной температурой воздуха на побережье. В более северных материковых районах (север Сихотэ-Алиня, бассейн р. Амур) наряду с холодными-влажными отмечаются холодные-сухие периоды [*Razjigaeva et al.*, 2023], а частота наводнений на реках в большей мере зависит от количества атмосферных осадков в водосборных бассейнах [*Махинов и Ким*, 2020; *Махинов и др.*, 2023]. Из-за редкого проникновения тайфунов в эти районы в качестве основных причин возникновения катастрофических наводнений часто указываются внетропические циклоны [*Махинов и Ким*, 2020; *Махинов и др.*, 2023; *Разжигаева и др.*, 2023а]. Повышенная влажность во время холодного Малого ледникового периода (МЛП), не типичная для муссонного климата (рис. 4а, б), отмечается также в других прибрежных районах Восточной Азии [*Разжигаева и др.*, 2023а; *Park et al.*, 2017; *Zheng et al.*, 2006]. Многие исследователи рассматривают это явление как связанное с процессами в тропической зоне Тихого океана, в частности, с активизацией Ла-Нинья около 630 лет назад [*Разжигаева и др.*, 2023а; *Park et al.*, 2017].

В конце МЛП и после него при всех вариантах реконструкции количество наводнений начинает возрастать (рис. 4в), что соответствует информации о наводнениях в регионе [*Махинов и Ким*, 2020; *Wu et al.*, 2023; *Ye et al.*, 2012] и данным гидрометеорологических наблюдений, на основе которых сделаны прогнозы дальнейшего увеличения числа наводнений [*Лисина и др.*, 2023; *Wu et al.*, 2023]. Подобное увеличение числа наводнений, согласно нашим реконструкциям (рис. 4в, е), имело место в IX–X веках н.э. (рис. 4д) при смене холодных условий Климатического миниму-

ма раннего средневековья (V–IX века н.э.) тёплыми Средневекового климатического оптимума (X–XIII века н.э.). Примечательно, что максимум наводнений совпал с периодом упадка и исчезновения средневекового государства Бохай (рис. 4), что требует специального рассмотрения.

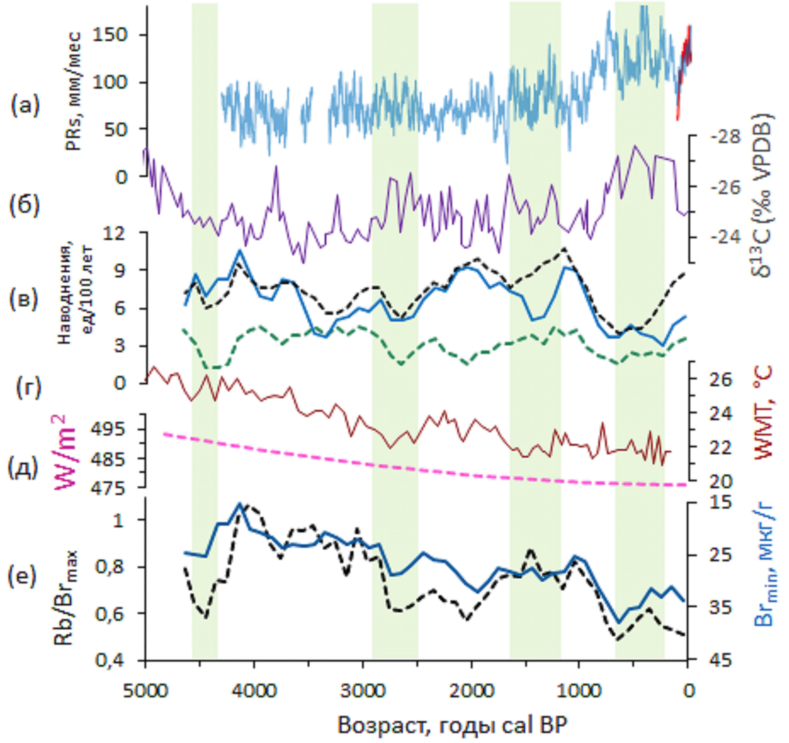


Рис. 4. Реконструкция частоты (в) и интенсивности (е) наводнений в водосборном бассейне Амурского залива Японского моря по данным колонки LV66-3. Зелёной заливкой показаны периоды похолодания в бассейне Амурского залива, выделенные по спорово-пыльцевым комплексам [*Разжигаева и др.*, 2023а], косой поперечной штриховкой – период существования государства Бохай. (а) – среднемесячные летние осадки, реконструированные по геохимическим прокси колонки LV66-3 [*Astakhov et al.*, 2026], красной линией показаны данные инструментальных измерений; (б) – вариации атмосферных осадков по изотопным данным торфяника Цзиньчуань [*Hong et al.*, 2001]; (в) – количество наводнений по сигналам ΔRb/Br более 0,2 и более 0,4 (чёрная и зелёная штриховые линии соответственно) и по сигналам Br_{min} менее 45 мкг/г (синяя линия); (г) – реконструкция летней (июль) температуры по спорово-пыльцевым комплексам озера Сихайлунван [*Stebich et al.*, 2015]; (д) – солнечная инсоляция на 45° с.ш. [*Laskar et al.*, 2004]; (е) – интенсивность наводнений по максимуму пика ΔRb/Br (чёрная штриховая линия) и минимуму пика Br_{min} (синяя линия), сглаженные по трём точкам методом скользящей средней.

3.4. Климат и наводнения в период существования государства Бохай

На рис. 5 приведены некоторые данные по изменениям природной среды региона в период существования государства Бохай, реконструированные по вещественному составу донных осадков Амурского залива, находящегося вблизи центральной, наиболее урбанизированной части этого государства в непосредственной близости к его столицам (рис. 1). Это средневековое государство, просуществовавшее с 698 по 926 годы н.э., было относительно развитым для своего времени, численность населения в период расцвета могла достигать 10 млн человек [*Болдин и Ивлиев*, 1997; *Пискарева и др.*, 2019].

Причиной упадка и исчезновения государства Бохай считается очень быстрое завоевание его территории западными соседями – киданями – в 926 г. н.э., после чего

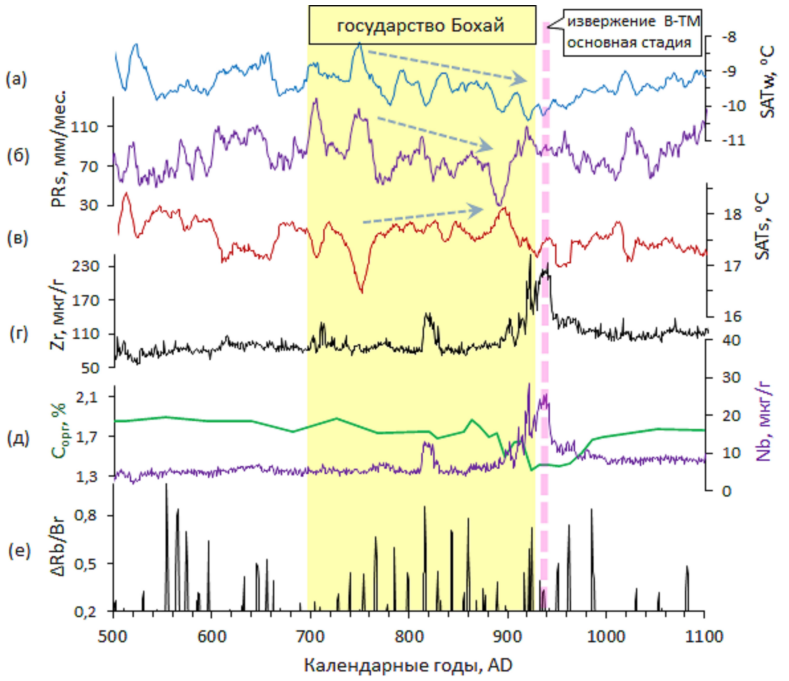


Рис. 5. Изменчивость климата и вулканизма в период существования государства Бохай по данным седиментационных записей в Амурском заливе. (а–в) – вариации отдельных климатических параметров, реконструированных в колонке LV66-3 [*Astakhov et al.*, 2026]: (а) – среднемесячная зимняя (декабрь–март) температура воздуха, (б) – среднемесячное количество атмосферных осадков летом, (в) – среднемесячная летняя (июнь–сентябрь) температура воздуха; (г, д) – содержание элементов-индикаторов дистальной тефры извержения B-TM вулкана Байтоушан: (г) – Zr, (д) – Nb и содержание органического углерода в осадках; (е) – эпизоды наводнений, вызванных прохождением тайфунов.

значительная часть населения была депортирована на западные границы государства киданей, а столицы пришли в запустение. В бассейне реки Раздольной в конце X – начале XI веков н.э. продолжали существовать отдельные поселения и даже возникло рисосеяние [*Мезенцев*, 2014; *Разжигаева и др.*, 2023b]. Считается, что завоеванию киданями предшествовало ослабление государственной системы, экономической и военной мощи государства. Рассматриваются как внутриполитические, так и природные причины этого, в том числе влияние природных катастроф и вулканизма [*Ивлиев и Болдин*, 2006; *Machida*, 1992; *Yasuda et al.*, 2013]. Наиболее популярной была гипотеза о влиянии извержения B-TM вулкана Байтоушан (Пектусан) тысячу лет назад, считающегося одним из сильнейших в истории человечества [*Machida*, 1992]. Позднее, при детальном датировании его тефры во льдах Гренландии, было установлено, что основная стадия извержения имела место уже после падения государства Бохай [*Sun et al.*, 2014].

Распределение циркония и ниобия в осадках Амурского залива (рис. 5г, д), тем не менее, указывает на то, что первая стадия извержения B-TM, выделяемая в проксимальной зоне [*Sun et al.*, 2014; *Zhang et al.*, 2022] и, реже, в прослоях дистальной тефры [*Разжигаева и др.*, 2020], имела место до 926 г. н.э. и, соответственно, могла оказать влияние на хозяйственную деятельность в государстве Бохай, прежде всего на сельскохозяйственное производство. В Амурском заливе, например, выпадение дистальной тефры сказалось на уменьшении содержания органического вещества и, соответственно, на уменьшении продуктивности фитопланктона в период извержения и несколько десятилетий после него, когда в залив смывалась тефра, выпавшая на суше (рис. 5д).

В последние годы существования государства Бохай проявились несколько сильных наводнений (рис. 5е), которые также могли повлиять на хозяйственную деятельность. По данным археологических раскопок, многие бохайские городища несут признаки затопления [*Бессонова и др.*, 2013; *Мезенцев*, 2014]. Интересен факт проявления

сильных дождей и наводнений в первую стадию извержения B-TM (рис. 5е), так как имеется мнение, что метеорные воды, попадая в очаг извержения, могут изменить характер и интенсивность последующего извержения [*Farquharson and Amelung*, 2020; *Uchida*, 2024; *Yamasato et al.*, 1998].

Общие изменения климата в период существования Бохай могут быть проиллюстрированы результатами реконструкции сезонных параметров климата, выполненной по колонке LV66-3 [*Astakhov et al.*, 2026]. Они указывают на то, что в период существования государства Бохай происходило стабильное уменьшение зимней температуры (рис. 5а) при увеличении летней температуры и уменьшении количества осадков в летние месяцы (рис. 5б, в). Последние два фактора указывают на формирование засушливого климата, что в сочетании с более холодными зимами (рис. 5а) делало территорию менее благоприятной для земледелия, особенно в западной части страны [*Razjigaeva et al.*, 2023; *Zhang et al.*, 2020]. В то же время эти процессы в меньшей степени могли повлиять на основанную на скотоводстве экономику государства киданей, но могли стать одной из причин их экспансии на восток, в более влажные прибрежные районы. Таким образом, имелись достаточно веские предпосылки ослабления экономики и военной мощи государства Бохай в начале X века н.э., обусловленные проявлением природных катастроф на фоне неблагоприятных изменений климата.

4. Заключение

Применение высокоразрешающего субмиллиметрового сканирования осадочных разрезов на установке РФА СИ позволило выявить в прибрежно-шельфовых отложениях Японского моря осадочные слои, накопившиеся при пониженной солёности морских вод во время и после наводнений в водосборном бассейне реки Раздольной, а также осадки, содержащие дистальную тефру извержений вулкана Пектусан. В качестве сигналов наводнений использовались отрицательные пики содержаний брома и, иногда, рубидия, а также положительные пики отношения Rb/Br. Характер сигналов в верхнеголоценовых отложениях позволяет предполагать, что основная часть их сформировалась при наводнениях, вызванных выходом на побережье тайфунов. Меньшая часть связана, возможно, с ливневыми дождями при прохождении внетропических циклонов на полярном и арктическом фронтах. Вариации интенсивности наводнений, определяемой по абсолютной величине этих сигналов, проявили видимую корреляцию с изменениями летней температуры воздуха в позднем голоцене, что соответствует существующему мнению о смещении путей распространения тайфунов к северу в тёплые периоды голоцена. Частота наводнений проявляет связь с вариациями летней температуры воздуха в меньшей степени, что, возможно, определяется влиянием других процессов в атмосфере, таких как периодичность изменений арктической осцилляции и широтное смещение зоны западного переноса.

Минимальная интенсивность наводнений в холодный Малый ледниковый период сменилась по его окончании быстрым увеличением частоты наводнений в ходе последующего потепления, обусловленного природными вариациями климата. Это увеличение зафиксировано гидрометеорологическими наблюдениями, на основе которых сделаны прогнозы увеличения числа и интенсивности наводнений. Наши результаты указывают на то, что для более корректных прогнозов необходимо учитывать будущие изменения температуры воздуха, обусловленные как природными, так и антропогенными процессами.

Увеличение числа и интенсивности наводнений, подобное отмеченному после окончания Малого ледникового периода, имело место и в IX–X веках н.э. при потеплении после окончания Климатического минимума раннего средневековья. Так как это событие совпало с периодом упадка и исчезновения государства Бохай, на его примере было рассмотрено возможное влияние климатических изменений, наводнений и других природных катастроф в регионе на хозяйственную деятельность человека. Показано, что в конце существования государства Бохай постепенно накопились неблагоприятные для сельского хозяйства климатические изменения: лето стало более засушли-

вым, а зима более холодной. Последнее же десятилетие существования государства Бохай характеризовалось серией природных катастроф – первой стадией извержения вулкана Байтоушан, сопровождавшейся выпадением дистальной тефры на востоке государства, а также серией наводнений, связанных с прохождением тайфунов. Таким образом, помимо иных причин, в последние годы существования государства Бохай проявилась серия природных катастроф, которые в сочетании с изменениями климата могли неблагоприятно сказаться на экономике и военной мощи государства.

Интересен факт проявления наводнений и ливневых дождей во время первой стадии извержения B-TM вулкана Байтоушан. Предполагается, что это усилило эруптивную активность во время второй, основной, стадии извержения, явившимся одним из наиболее интенсивных за последние тысячелетия.

Благодарности. Авторы посвящают эту работу памяти нашего коллеги доктора геолого-минералогических наук Ивана Александровича Калугина, ушедшего из жизни 2 июля 2025 г. Авторы признательны двум анонимным рецензентам за конструктивные советы.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант No. 25-27-20098).

Список литературы

Акуличев В. А., Астахов А. С., Карнаух В. Н. и др. Геоакустические признаки миграции метана субаквальных угленосных толщ в голоценовый осадочный чехол (Амурский залив Японского моря) // Доклады Академии наук. — 2015. — Т. 460, № 5. — С. 589—594. — https://doi.org/10.7868/s0869565215050187

Акуличев В. А., Астахов А. С., Малахов М. И. и др. Первая находка криптотефры катастрофических извержений вулкана Байтоушань X в. н.э. в шельфовых отложениях Японского моря // Доклады Академии наук. — 2016. — Т. 469, № 6. — С. 734—738. — https://doi.org/10.7868/s0869565216240166

Аникиев В. В., Косенкова С. Т., Савельева Н. И. и др. Статистическое районирование пространственного распределения микроэлементов в донных осадках залива Петра Великого (Японское море) // Геохимия. — 2000. — Т. 38, № 6. — С. 664—675.

Астахов А. С. Литохимия осадков материковой окраины Востока Азии. — Владивосток : Дальнаука, 2001. — 240 с.

Астахов А. С., Дарьин А. В. и Калугин И. А. Реконструкция частоты катастрофических наводнений на западном побережье Японского моря по шельфовым седиментационным записям // Метеорология и гидрология. — 2019. — № 1. — С. 91—102. — Пер. по изд.: Astakhov A. S., Darin A. V., Kalugin I. A., et al. Reconstructing the Frequency of Catastrophic Floods on the Western Coast of the Sea of Japan Based on Sedimentary Proxy // Russian Meteorology and Hydrology. — 2019. — Vol. 44, no. 1. — P. 62–70. — https://doi.org/10.3103/s1068373919010072

Бережная С. П. Синоптические условия выпадения обильных осадков на юге Дальнего Востока // Метеорология и гидрология. — 1975. — Т. 11. — С. 41—47.

Бессонова Е. А., Гельман Е. И. и Николаева Н. А. Применение каппаметрии поверхности почвы для картирования археологических объектов, погребенных в паводковых наносах // Вестник ДВО РАН. — 2013. — № 4. — С. 70—77.

Болдин В. И. и Ивлиев А. Л. Столичные города Бохая // Россия и АТР. — 1997. — № 3. — С. 77—98.

Дубина В. А., Шамов В. В. и Плотников В. В. Катастрофическое наводнение в Приморье // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2018. — Т. 15, № 5. — С. 253—256. — https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-253-256

Ивлиев А. Л. и Болдин В. И. Исследования Краскинского городища и археологическое изучение Бохая в Приморье // Россия и АТР. — 2006. — 3(53). — С. 5—18.

Калугин И. А., Дарьин А. В., Бабич В. В. и др. Показатели оксидных и аноксидных обстановок в системе современного осадконакопления в соленом озере Шира (Хакасия) по данным высокоразрешающего РФА СИ замороженных in situ образцов донных осадков // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2019. — Т. 83, № 2. — С. 247—252. — https://doi.org/10.1134/s0367676519020169

Лисина И. А., Василевская Л. Н., Василевский Д. Н. и др. Анализ причин наводнения на реке Партизанская (Приморский край) в сентябре 2022 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. — 2023. — Т. 1. — С. 102—119. — https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-1-102-119

Лящевская М. С., Базарова В. Б. и Макарова Т. Р. Развитие природной среды и эволюция озера Гнилое (юго-восточное Приморье) за последние 3300 лет // Геоморфология и палеогеография. — 2023. — Т. 54, № 3. — С. 108—123. — https://doi.org/10.31857/s2949178923030064

Махинов А. Н. и Ким В. И. Влияние изменений климата на гидрологический режим реки Амур // Тихоокеанская география. — 2020. — 1(1). — С. 30—39. — https://doi.org/10.35735/7102875.2020.1.1.004

Махинов А. Н., Лю Ш., Ким В. И. и др. Особенности больших наводнений на реке Амур в период высокой водности 2009–2021 гг. // Тихоокеанская география. — 2023. — № 1. — С. 66—74. — https://doi.org/10.35735/26870509_2023_13_6

Мезенцев А. Л. Топографическая классификация средневековых сельских поселений в окрестностях Уссурийска // Традиционная культура востока Азии. Вып. 7. — Благовещенск : АмГУ, 2014. — С. 212—217.

Михайлик Т. А., Тищенко П. Я. и Колтунов А. М. Влияние реки Раздольной на экологическое состояние вод Амурского залива (Японское море) // Водные ресурсы. — 2011. — Т. 38, № 4. — С. 474—484. — Пер. по изд.: Mikhailik T. A., Tishchenko P. Ya., Koltunov A. M., et al. The effect of Razdol'naya River on the environmental state of Amur Bay (the Sea of Japan) // Water Resources. — 2011. — Vol. 38, no. 4. — P. 512–521. — https://doi.org/10.1134/s0097807811020096

Пискарева Я. Е., Сергушева Е. А., Дорофеева Н. А. и др. Хозяйство раннесредневекового населения Приморья (по материалам мохэской археологической культуры) // Вестник археологии, антропологии и этнографии. — 2019. — 1(44). — С. 25—36. — https://doi.org/10.20874/2071-0437-2019-44-1-025-036

Прушковская И. А. и Цой И. Б. Диатомовые водоросли в осадках Амурского залива (Японское море) и влияние тайфунов на их аккумуляцию за последние 2000 лет // Вопросы современной альгологии. — 2019. — 2(20). — С. 252—256. — https://doi.org/10.33624/2311-0147-2019-2(20)-252-256

Разжигаева Н. Г., Ганзей Л. А., Гребенникова Т. А. и др. Пепел B-Tm катастрофического извержения вулкана Байтоушань в континентальных отложениях Приморья как временной маркер малого оптимума голоцена // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2020. — Т. 494, № 2. — С. 29—37. — https://doi.org/10.31857/s268673972010014x

Разжигаева Н. Г., Ганзей Л. А., Гребенникова Т. А. и др. Проявление глобальных похолоданий позднего голоцена на морском побережье юга Дальнего Востока России // Геоморфология и палеогеография. — 2023a. — Т. 54, № 1. — С. 112—130. — https://doi.org/10.31857/s2949178923010115

Разжигаева Н. Г., Ганзей Л. А., Гребенникова Т. А. и др. Свидетельства культивирования риса в Приморье в средние века // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2023b. — Т. 513, № 2. — С. 289—298. — https://doi.org/10.31857/s2686739723601795

Тищенко П. П., Тищенко П. Я., Звалинский В. И. и др. Карбонатная система Амурского залива (Японское море) в условиях гипоксии // Океанология. — 2011. — Т. 51, № 2. — С. 246—257. — Пер. по изд.: Tishchenko P. P., Tishchenko P. Ya., Zvalinskii V. I., et al. The carbonate system of Amur Bay (sea of Japan) under conditions of hypoxia // Oceanology. — 2011. — Vol. 51, no. 2. — P. 235–246. — https://doi.org/10.1134/s0001437011020172

Федоровский А. С., Бортин Н. Н., Горчаков А. М. и др. Ливневые дожди как фактор наводнений в Приморском крае // Водное хозяйство России. — 2019. — № 4. — С. 144—168. — https://doi.org/10.35567/1999-4508-2019-4-7

Холодов В. Н. и Недумов Р. И. О применении молибденового модуля к реконструкции газового состава вод меловой Атлантики // Доклады Академии наук. — 2005. — Т. 400, № 2. — С. 250—253.

Шишкина О. В., Павлова Г. А. и Быкова Б. С. Геохимия галогенов в морских и океанских осадках и иловых водах. — Москва : Наука, 1969.

Шулькин В. М., Орлова Т. Ю., Шевченко О. Г. и др. Влияние речного стока и продукции фитопланктона на сезонную изменчивость химического состава прибрежных вод Амурского залива Японского моря // Биология моря. — 2013. — Т. 39, № 3. — С. 202—212. — Пер. по изд.: Shulkin V. M., Orlova T. Yu., Shevchenko O. G., et al. The effect of river runoff and phytoplankton production on the seasonal variation of the chemical composition of coastal waters of the Amursky Bay, Sea of Japan // Russian Journal of Marine Biology. — 2013. — Vol. 39, no. 3. — P. 197–207. — https://doi.org/10.1134/s1063074013030115

Astakhov A. S., Babich V. V., Darin A. V., et al. Westerlies Influenced Monsoonal Climate: Reconstructions of Summer/Winter Temperature and Precipitation Based on Japan Sea Shelf Late Holocene Sediments Geochemistry // Paleoceanography and Paleoclimatology. — 2026. — Vol. 41, no. 4. — https://doi.org/10.1029/2025pa005147

Ding X., Hu B., Li J., et al. Late Holocene Orbital Forcing and Solar Activity on the Kuroshio Current of Subtropical North Pacific at Different Timescales // Frontiers in Earth Science. — 2022. — Vol. 10. — https://doi.org/10.3389/feart.2022.845228

Farquharson J. I. and Amelung F. Extreme rainfall triggered the 2018 rift eruption at Kīlauea Volcano // Nature. — 2020. — Vol. 580, no. 7804. — P. 491–495. — https://doi.org/10.1038/s41586-020-2172-5

Gong D., Zhu J. and Wang S. Significant relationship between spring AO and the summer rainfall along the Yangtze River // Chinese Science Bulletin. — 2002. — Vol. 47, no. 11. — P. 948–952. — https://doi.org/10.1360/02tb9212

Hong Y. T., Hong B., Lin Q. A., et al. Inverse phase oscillations between the East Asian and Indian Ocean summer monsoons during the last 12000 years and paleo-El Niño // Earth and Planetary Science Letters. — 2005. — Vol. 231, no. 3/4. — P. 337–346. — https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.12.025

Hong Y. T., Wang Z. G., Jiang H. B., et al. A 6000-year record of changes in drought and precipitation in northeastern China based on a ḥ13C time series from peat cellulose // Earth and Planetary Science Letters. — 2001. — Vol. 185, no. 1/2. — P. 111–119. — https://doi.org/10.1016/s0012-821x(00)00367-8

Huo L., Guan Z., Zhang M., et al. An unusual Northwest-Southeast oriented Meiyu rain belt in 2021 // Frontiers in Earth Science. — 2023. — Vol. 10. — https://doi.org/10.3389/feart.2022.1063372

Kalugin I. A., Astakhov A. S., Darin A. V., et al. Anomalies of bromine in the estuarine sediments as a signal of floods associated with typhoons // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. — 2015. — Vol. 33, no. 6. — P. 1489–1495. — https://doi.org/10.1007/s00343-015-4370-9

Karnaukh V. N., Astakhov A. S., Vereshchagina O. F., et al. Formation of subsurface shallow gas accumulations in Amurskiy Bay (Peter the Great Bay, Sea of Japan) as a result of postglacial sea-level change, paleoceanographic conditions and hydrological activity // Marine Geology. — 2016. — Vol. 372. — P. 31–52. — https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.12.004

Katsuki K., Yang D.-Y., Seto K., et al. Factors controlling typhoons and storm rain on the Korean Peninsula during the Little Ice Age // Journal of Paleolimnology. — 2016. — Vol. 55, no. 1. — P. 35–48. — https://doi.org/10.1007/s10933-015-9861-3

Laskar J., Robutel P., Joutel F., et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth // Astronomy & Astrophysics. — 2004. — Vol. 428, no. 1. — P. 261–285. — https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041335

Li H., He S., Gao Y., et al. North Atlantic Modulation of Interdecadal Variations in Hot Drought Events over Northeastern China // Journal of Climate. — 2020. — Vol. 33, no. 10. — P. 4315–4332. — https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0440.1

Liu K.-B., Shen C. and Louie K.-S. A 1,000-Year History of Typhoon Landfalls in Guangdong, Southern China, Reconstructed from Chinese Historical Documentary Records // Annals of the Association of American Geographers. — 2001. — Vol. 91, no. 3. — P. 453–464. — https://doi.org/10.1111/0004-5608.00253

Machida H. Volcanic eruptions and the fall of Bohai Kingdom // Mysterious Kingdom: Bo-hai / ed. by S. Nakanishi and Y. Yasuda. — Tokyo : Kadokawa Publishers, 1992. — P. 14–29.

Malcolm S. J. and Price N. B. The behaviour of iodine and bromine in estuarine surface sediments // Marine Chemistry. — 1984. — Vol. 15, no. 3. — P. 263–271. — https://doi.org/10.1016/0304-4203(84)90022-7

Mayer L. M., Schick L. L., Allison M. A., et al. Marine vs. terrigenous organic matter in Louisiana coastal sediments: The uses of bromine:organic carbon ratios // Marine Chemistry. — 2007. — Vol. 107, no. 2. — P. 244–254. — https://doi.org/10.1016/j.marchem.2007.07.007

Park J., Han J., Jin Q., et al. The Link between ENSO-like Forcing and Hydroclimate Variability of Coastal East Asia during the Last Millennium // Scientific Reports. — 2017. — Vol. 7, no. 1. — https://doi.org/10.1038/s41598-017-08538-1

Qi W., Feng L., Yang H., et al. Spring and summer potential flood risk in Northeast China // Journal of Hydrology: Regional Studies. — 2021. — Vol. 38. — P. 100951. — https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100951

Razjigaeva N., Ganzey L., Grebennikova T., et al. "Cold-Dry" and "Cold-Wet" Events in the Late Holocene, Southern Russian Far East // Climate. — 2023. — Vol. 11, no. 4. — P. 91. — https://doi.org/10.3390/cli11040091

Razjigaeva N. G., Ganzey L. A., Grebennikova T. A., et al. Extreme flood events on Western Sakhalin and their linkage to cyclogenesis activity in the western North Pacific in middle-late Holocene // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. — 2025. — Vol. 669. — P. 112933. — https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2025.112933

Shu P., Zhou W., Putnam A. E., et al. Intensified monsoonal rainstorm events over westerly-dominated Asian interior during the warm mid-Holocene // Communications Earth & Environment. — 2025. — Vol. 6, no. 1. — https://doi.org/10.1038/s43247-025-02005-w

Stebich M., Rehfeld K., Schlütz F., et al. Holocene vegetation and climate dynamics of NE China based on the pollen record from Sihailongwan Maar Lake // Quaternary Science Reviews. — 2015. — Vol. 124. — P. 275–289. — https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.07.021

Sun C., You H., Liu J., et al. Distribution, geochemistry and age of the Millennium eruptives of Changbaishan volcano, Northeast China – A review // Frontiers of Earth Science. — 2014. — https://doi.org/10.1007/s11707-014-0149-x

Uchida N. Effects of extreme rainfall on phreatic eruptions: A case study of Mt. Ontake in Japan // AIMS Geosciences. — 2024. — Vol. 10, no. 2. — P. 208–227. — https://doi.org/10.3934/geosci.2024012

Wu Y., Ju H., Qi P., et al. Increasing flood risk under climate change and social development in the Second Songhua River basin in Northeast China // Journal of Hydrology: Regional Studies. — 2023. — Vol. 48. — P. 101459. — https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101459

Yamasato H., Kitagawa S. and Komiya M. Effect of rainfall on dacitic lava dome collapse at Unzen volcano, Japan // Papers in Meteorology and Geophysics. — 1998. — Vol. 48. — P. 73–78. — https://doi.org/10.2467/mripapers.48.73

Yasuda Y., Nasu H., Fujiki T., et al. Climate Deterioration and Angkor's Demise // Water Civilization. — Springer Japan, 2013. — P. 331–362. — https://doi.org/10.1007/978-4-431-54111-0_10

Ye Y., Fang Xiuqi and Aftab U Khan M. Migration and reclamation in Northeast China in response to climatic disasters in North China over the past 300 years // Regional Environmental Change. — 2012. — Vol. 12, no. 1. — P. 193–206. — https://doi.org/10.1007/s10113-011-0245-6

Zhang J., Zhou X., Jiang S., et al. Monsoon Precipitation, Economy and Wars in Ancient China // Frontiers in Earth Science. — 2020. — Vol. 8. — https://doi.org/10.3389/feart.2020.00317

Zhang M., Smol J. P. and Bu Z. Late Holocene tephrostratigraphic sequence of the Changbaishan volcanic field, China/North Korea // Gondwana Research. — 2022. — Vol. 106. — P. 34–50. — https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.01.001

Zheng J., Wang W., Ge Q., et al. Precipitation Variability and Extreme Events in Eastern China during the Past 1500 Years // Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences. — 2006. — Vol. 17, no. 3. — P. 579. — https://doi.org/10.3319/tao.2006.17.3.579(a)

Zheng Y., Pancost R. D., Naafs B. D. A., et al. Transition from a warm and dry to a cold and wet climate in NE China across the Holocene // Earth and Planetary Science Letters. — 2018. — Vol. 493. — P. 36–46. — https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.019

Russian Journal of Earth Sciences Online ISSN: 1681-1208

Floods and Climate Changes on the Western Coast of the Japan Sea in the Late Holocene: Reconstructions Based on Geochemical Proxies, Role in the Collapse of the Bohai State

A. S. Astakhov[1,], A. V. Darin[2], K. I. Aksentov[1], A. V. Alatorcev[1], and I. A. Kalugin[2]**

[1]V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation
[2]Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
****Correspondence to:** Anatoly Astakhov, astakhov@poi.dvo.ru

Abstract: In recent decades, catastrophic river floods have become more frequent on the western coast of the Japan Sea, including the territories of northeastern China, southeastern Russia, and northern Korea. Climate change and anthropogenic interference to riverbed processes Climate change and anthropogenic interference to riverbed processes are considered as possible causes of this. The aim of the work was to assess the role of climate change using reconstructions of the frequency and intensity of floods over the past millennia in the basin of one of the rivers flowing into the Japan Sea. According to the submillimeter scanning of shelf sediments of the Amur Bay by X-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation, the frequency and intensity of floods in the late Holocene were reconstructed. The predominant role of typhoons (tropical hurricanes), the possibility of penetration of which into the region increases during warm periods, is substantiated as the main cause of floods on the coastal rivers. Due to this, the dependence on changes in air temperature and solar insolation in summer has been shown in variations in the frequency and intensity of floods in recent millennia. Accordingly, a long-term trend of their decrease has been established, but after the end of the cold Little Ice Age, with an increase in air temperature, the frequency and intensity of floods in the 20th–21st centuries AD began to increase. This was recorded by hydrometeorological observations and served as the basis for pessimistic forecasts for the future. The example of the medieval Bohai State in the 10th century AD shows the influence of rapid climatic changes, floods and other natural disasters on human economic activity in climatic conditions similar to modern ones.

Keywords: floods, paleoclimatology, Primorsky Krai, Amur Bay, bottom sediments, geochemistry, bromine, Bohai, Baitoushan-Pektusan volcano

Research Article

Received: June 6, 2025
Accepted: February 27, 2026
Published: September 29, 2026

Citation: Astakhov A. S., Darin A. V., Aksentov K. I., Alatorcev A. V., and Kalugin I. A. (2026), Floods and Climate Changes on the Western Coast of the Japan Sea in the Late Holocene: Reconstructions Based on Geochemical Proxies, Role in the Collapse of the Bohai State, *Russian Journal of Earth Sciences*, 26, ES3020, https://doi.org/10.2205/2026ES001105, EDN: DKHXIW

Funding. The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (Grant No. 25-27-20098).

© 2026. The Authors.

References

Akulichev V. A., Astakhov A. S., Karnaukh V. N., et al. Geoacoustic evidence of methane migration from submarine coaliferous formations to Holocene sediments (Amur Bay, Sea of Japan) // Doklady Earth Sciences. — 2015. — Vol. 460, no. 2. — P. 163–167. — https://doi.org/10.1134/s1028334x15020087

Akulichev V. A., Astakhov A. S., Malakhov M. I., et al. The first discovery of cryptotephra of the catastrophic eruptions of the Baitoushan volcano in the tenth century A.D. in the shelf deposits of the Sea of Japan // Doklady Earth Sciences. — 2016. — Vol. 469, no. 2. — P. 887–891. — https://doi.org/10.1134/s1028334x16080201

Anikiev V. V., Kosenkova S. T., Savel'eva N. I., et al. Statistical zoning of the spatial distribution of trace elements in the bottom sediments of the Peter the Great Gulf, the Sea of Japan // Geochemistry International. — 2000. — Vol. 38, no. 6. — P. 603–614. — (In Russian).

Astakhov A. S. Lithochemistry of bottom sediments East Asian marginal seas. — Vladivostok : Dal'nauka, 2001. — 240 p. — (In Russian).

Astakhov A. S., Babich V. V., Darin A. V., et al. Westerlies Influenced Monsoonal Climate: Reconstructions of Summer/Winter Temperature and Precipitation Based on Japan Sea Shelf Late Holocene Sediments Geochemistry // Paleoceanography and Paleoclimatology. — 2026. — Vol. 41, no. 4. — https://doi.org/10.1029/2025pa005147

Astakhov A. S., Darin A. V., Kalugin I. A., et al. Reconstructing the Frequency of Catastrophic Floods on the Western Coast of the Sea of Japan Based on Sedimentary Proxy // Russian Meteorology and Hydrology. — 2019. — Vol. 44, no. 1. — P. 62–70. — https://doi.org/10.3103/s1068373919010072

Berezhnaya S. P. Synoptic conditions for heavy precipitation in the south of the Far East // Meteorologiya i gidrologiya. — 1975. — Vol. 11. — P. 41–47. — (In Russian).

Bessonova E. A., Gel'man E. I. and Nikolaeva N. A. The use of magnetic susceptibility measurements of soil surface for the mapping of the buried objects in flood sediments // Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences. — 2013. — No. 4. — P. 70–77. — (In Russian).

Boldin V. I. and Ivliev A. L. Capital cities of Bohai // Russia and the Pacific. — 1997. — No. 3. — P. 77–98. — (In Russian).

Ding X., Hu B., Li J., et al. Late Holocene Orbital Forcing and Solar Activity on the Kuroshio Current of Subtropical North Pacific at Different Timescales // Frontiers in Earth Science. — 2022. — Vol. 10. — https://doi.org/10.3389/feart.2022.845228

Dubina V. A., Shamov V. V. and Plotnikov V. V. Disastrous flood in August 2018 in Primorye (south Pacific Russia) // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. — 2018. — Vol. 15, no. 5. — P. 253–256. — https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-253-256 — (In Russian).

Farquharson J. I. and Amelung F. Extreme rainfall triggered the 2018 rift eruption at Kīlauea Volcano // Nature. — 2020. — Vol. 580, no. 7804. — P. 491–495. — https://doi.org/10.1038/s41586-020-2172-5

Fedorovskiy A. S., Bortin N. N., Gorchakov A. M., et al. Rain storms as a flood factor in maritime region // Water Sector of Russia. — 2019. — No. 4. — P. 144–168. — https://doi.org/10.35567/1999-4508-2019-4-7 — (In Russian).

Gong D., Zhu J. and Wang S. Significant relationship between spring AO and the summer rainfall along the Yangtze River // Chinese Science Bulletin. — 2002. — Vol. 47, no. 11. — P. 948–952. — https://doi.org/10.1360/02tb9212

Hong Y. T., Hong B., Lin Q. A., et al. Inverse phase oscillations between the East Asian and Indian Ocean summer monsoons during the last 12000 years and paleo-El Niño // Earth and Planetary Science Letters. — 2005. — Vol. 231, no. 3/4. — P. 337–346. — https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.12.025

Hong Y. T., Wang Z. G., Jiang H. B., et al. A 6000-year record of changes in drought and precipitation in northeastern China based on a ḍ13C time series from peat cellulose // Earth and Planetary Science Letters. — 2001. — Vol. 185, no. 1/2. — P. 111–119. — https://doi.org/10.1016/s0012-821x(00)00367-8

Huo L., Guan Z., Zhang M., et al. An unusual Northwest-Southeast oriented Meiyu rain belt in 2021 // Frontiers in Earth Science. — 2023. — Vol. 10. — https://doi.org/10.3389/feart.2022.1063372

Ivliev A. L. and Boldin V. I. Research of the Kraskino fortified settlement and archaeological study of Bohai in Primorye // Russia and the Pacific. — 2006. — 3(53). — P. 5–18. — (In Russian).

Kalugin I. A., Astakhov A. S., Darin A. V., et al. Anomalies of bromine in the estuarine sediments as a signal of floods associated with typhoons // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. — 2015. — Vol. 33, no. 6. — P. 1489–1495. — https://doi.org/10.1007/s00343-015-4370-9

Kalugin I. A., Darin A. V., Babich V. V., et al. Indicators of Oxic and Anoxic Conditions in the System of the Current Sedimentation of Saline Lake Shira (Khakassia), According to High-Resolution SR XRF Data on Bottom Sediments Frozen In Situ // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2019. — Vol. 83, no. 2. — P. 198–203. — https://doi.org/10.3103/S1062873819020163

Karnaukh V. N., Astakhov A. S., Vereshchagina O. F., et al. Formation of subsurface shallow gas accumulations in Amurskiy Bay (Peter the Great Bay, Sea of Japan) as a result of postglacial sea-level change, paleoceanographic conditions and hydrological activity // Marine Geology. — 2016. — Vol. 372. — P. 31–52. — https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.12.004

Katsuki K., Yang D.-Y., Seto K., et al. Factors controlling typhoons and storm rain on the Korean Peninsula during the Little Ice Age // Journal of Paleolimnology. — 2016. — Vol. 55, no. 1. — P. 35–48. — https://doi.org/10.1007/s10933-015-9861-3

Kholodov V. N. and Nedumov R. I. Application of the molybdenum module for reconstruction of the gas composition of water in the Cretaceous Atlantic // Doklady Earth Sciences. — 2005. — Vol. 400, no. 1. — P. 116–118. — (In Russian).

Laskar J., Robutel P., Joutel F., et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth // Astronomy & Astrophysics. — 2004. — Vol. 428, no. 1. — P. 261–285. — https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041335

Li H., He S., Gao Y., et al. North Atlantic Modulation of Interdecadal Variations in Hot Drought Events over Northeastern China // Journal of Climate. — 2020. — Vol. 33, no. 10. — P. 4315–4332. — https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0440.1

Lisina I. A., Vasilevskaya L. N., Vasilevsky D. N., et al. Analysis of the causes of flooding on the Partizanskaya River (Primorsky Krai) in September 2022 // Hydrometeorological research and forecasting. — 2023. — Vol. 1. — P. 102–119. — https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-1-102-119 — (In Russian).

Liu K.-B., Shen C. and Louie K.-S. A 1,000-Year History of Typhoon Landfalls in Guangdong, Southern China, Reconstructed from Chinese Historical Documentary Records // Annals of the Association of American Geographers. — 2001. — Vol. 91, no. 3. — P. 453–464. — https://doi.org/10.1111/0004-5608.00253

Lyashchevskaya M. S., Bazarova V. B. and Makarova T. R. Environment development and the evolution of Gniloe lake (South-Eastern Primorye) during the last 3300 years // Geomorfologiya i Paleogeografiya. — 2023. — Vol. 54, no. 3. — P. 108–123. — https://doi.org/10.31857/s2949178923030064 — (In Russian).

Machida H. Volcanic eruptions and the fall of Bohai Kingdom // Mysterious Kingdom: Bo-hai / ed. by S. Nakanishi and Y. Yasuda. — Tokyo : Kadokawa Publishers, 1992. — P. 14–29.

Makhinov A. N. and Kim V. I. Effect of climate changes on the hydrological regime of the Amur river // Tihookeanskaia geografiia. — 2020. — 1(1). — P. 30–39. — https://doi.org/10.35735/7102875.2020.1.1.004 — (In Russian).

Makhinov A. N., Liu Sh., Kim V. I., et al. Great floods on the Amur River during the high water period in 2013-2021 // Tihookeanskaia geografiia. — 2023. — No. 1. — P. 66–74. — https://doi.org/10.35735/26870509_2023_13_6 — (In Russian).

Malcolm S. J. and Price N. B. The behaviour of iodine and bromine in estuarine surface sediments // Marine Chemistry. — 1984. — Vol. 15, no. 3. — P. 263–271. — https://doi.org/10.1016/0304-4203(84)90022-7

Mayer L. M., Schick L. L., Allison M. A., et al. Marine vs. terrigenous organic matter in Louisiana coastal sediments: The uses of bromine:organic carbon ratios // Marine Chemistry. — 2007. — Vol. 107, no. 2. — P. 244–254. — https://doi.org/10.1016/j.marchem.2007.07.007

Mezentsev A. L. Topographic classification of medieval rural settlements in the vicinity of Ussuriysk // Traditional culture of East Asia. Issue 7. — Blagoveshchensk : AmGU, 2014. — P. 212–217. — (In Russian).

Mikhailik T. A., Tishchenko P. Ya., Koltunov A. M., et al. The effect of Razdol'naya River on the environmental state of Amur Bay (the Sea of Japan) // Water Resources. — 2011. — Vol. 38, no. 4. — P. 512–521. — https://doi.org/10.1134/s0097807811020096

Park J., Han J., Jin Q., et al. The Link between ENSO-like Forcing and Hydroclimate Variability of Coastal East Asia during the Last Millennium // Scientific Reports. — 2017. — Vol. 7, no. 1. — https://doi.org/10.1038/s41598-017-08538-1

Piskareva Ya. E., Sergusheva E. A., Dorofeeva N. A., et al. Economy of the early mediaeval population of Primorye (based on archaeological evidence for the Mohe culture) // Vestnik Arheologii, Antropologii i Etnografii. — 2019. — 1(44). — P. 25–36. — https://doi.org/10.20874/2071-0437-2019-44-1-025-036 — (In Russian).

Prushkovskaya I. A. and Tsoy I. B. Diatoms in the Amur Bay sediments (Sea of Japan) and the impact of typhoons on their accumulation over the last 2000 years // Issues of modern algology. — 2019. — 2(20). — P. 252–256. — https://doi.org/10.33624/2311-0147-2019-2(20)-252-256 — (In Russian).

Qi W., Feng L., Yang H., et al. Spring and summer potential flood risk in Northeast China // Journal of Hydrology: Regional Studies. — 2021. — Vol. 38. — P. 100951. — https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100951

Razjigaeva N., Ganzey L., Grebennikova T., et al. "Cold-Dry" and "Cold-Wet" Events in the Late Holocene, Southern Russian Far East // Climate. — 2023a. — Vol. 11, no. 4. — P. 91. — https://doi.org/10.3390/cli11040091

Razjigaeva N. G., Ganzey L. A., Grebennikova T. A., et al. B-Tm Ash of a Catastrophic Eruption of Baitoushan Volcano in Terrestrial Deposits of Primorye as an Age Marker of the Medieval Warm Period in the Holocene // Doklady Earth Sciences. — 2020. — Vol. 494, no. 2. — P. 779–786. — https://doi.org/10.1134/s1028334x20100116

Razjigaeva N. G., Ganzey L. A., Grebennikova T. A., et al. Global cooling events of the Late Holocene preserved in the coastal sediments in the southern Far East of Russia // Geomorfologiya i Paleogeografiya. — 2023b. — Vol. 54, no. 1. — P. 112–130. — https://doi.org/10.31857/s2949178923010115 — (In Russian).

Razjigaeva N. G., Ganzey L. A., Grebennikova T. A., et al. Extreme flood events on Western Sakhalin and their linkage to cyclogenesis activity in the western North Pacific in middle-late Holocene // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. — 2025. — Vol. 669. — P. 112933. — https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2025.112933

Razzhigaeva N. G., Ganzey L. A., Grebennikova T. A., et al. Evidence of Rice Cultivation in Primorye in the Middle Ages // Doklady Earth Sciences. — 2023c. — Vol. 513, no. 2. — P. 1394–1402. — https://doi.org/10.1134/s1028334x2360202x

Shishkina O. V., Pavlova G. A. and Bykova B. S. Geochemistry of halogens in marine and oceanic sediments and pore waters. — Moscow : Nauka, 1969. — (In Russian).

Shu P., Zhou W., Putnam A. E., et al. Intensified monsoonal rainstorm events over westerly-dominated Asian interior during the warm mid-Holocene // Communications Earth & Environment. — 2025. — Vol. 6, no. 1. — https://doi.org/10.1038/s43247-025-02005-w

Shulkin V. M., Orlova T. Yu., Shevchenko O. G., et al. The effect of river runoff and phytoplankton production on the seasonal variation of the chemical composition of coastal waters of the Amursky Bay, Sea of Japan // Russian Journal of Marine Biology. — 2013. — Vol. 39, no. 3. — P. 197–207. — https://doi.org/10.1134/s1063074013030115

Stebich M., Rehfeld K., Schlütz F., et al. Holocene vegetation and climate dynamics of NE China based on the pollen record from Sihailongwan Maar Lake // Quaternary Science Reviews. — 2015. — Vol. 124. — P. 275–289. — https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.07.021

Sun C., You H., Liu J., et al. Distribution, geochemistry and age of the Millennium eruptives of Changbaishan volcano, Northeast China – A review // Frontiers of Earth Science. — 2014. — https://doi.org/10.1007/s11707-014-0149-x

Tishchenko P. P., Tishchenko P. Ya., Zvalinskii V. I., et al. The carbonate system of Amur Bay (sea of Japan) under conditions of hypoxia // Oceanology. — 2011. — Vol. 51, no. 2. — P. 235–246. — https://doi.org/10.1134/s0001437011020172

Uchida N. Effects of extreme rainfall on phreatic eruptions: A case study of Mt. Ontake in Japan // AIMS Geosciences. — 2024. — Vol. 10, no. 2. — P. 208–227. — https://doi.org/10.3934/geosci.2024012

Wu Y., Ju H., Qi P., et al. Increasing flood risk under climate change and social development in the Second Songhua River basin in Northeast China // Journal of Hydrology: Regional Studies. — 2023. — Vol. 48. — P. 101459. — https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101459

Yamasato H., Kitagawa S. and Komiya M. Effect of rainfall on dacitic lava dome collapse at Unzen volcano, Japan // Papers in Meteorology and Geophysics. — 1998. — Vol. 48. — P. 73–78. — https://doi.org/10.2467/mripapers.48.73

Yasuda Y., Nasu H., Fujiki T., et al. Climate Deterioration and Angkor's Demise // Water Civilization. — Springer Japan, 2013. — P. 331–362. — https://doi.org/10.1007/978-4-431-54111-0_10

Ye Y., Fang Xiuqi and Aftab U Khan M. Migration and reclamation in Northeast China in response to climatic disasters in North China over the past 300 years // Regional Environmental Change. — 2012. — Vol. 12, no. 1. — P. 193–206. — https://doi.org/10.1007/s10113-011-0245-6

Zhang J., Zhou X., Jiang S., et al. Monsoon Precipitation, Economy and Wars in Ancient China // Frontiers in Earth Science. — 2020. — Vol. 8. — https://doi.org/10.3389/feart.2020.00317

Zhang M., Smol J. P. and Bu Z. Late Holocene tephrostratigraphic sequence of the Changbaishan volcanic field, China/North Korea // Gondwana Research. — 2022. — Vol. 106. — P. 34–50. — https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.01.001

Zheng J., Wang W., Ge Q., et al. Precipitation Variability and Extreme Events in Eastern China during the Past 1500 Years // Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences. — 2006. — Vol. 17, no. 3. — P. 579. — https://doi.org/10.3319/tao.2006.17.3.579(a)

Zheng Y., Pancost R. D., Naafs B. D. A., et al. Transition from a warm and dry to a cold and wet climate in NE China across the Holocene // Earth and Planetary Science Letters. — 2018. — Vol. 493. — P. 36–46. — https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.019