

ЯПОНСКИЕ РЫБАКИ И ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ: НЕОЧЕВИДНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Шамов В.В.,

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

Аннотация. Анализируются некоторые гидрологические последствия регистрируемых изменений регионального температурного фона и атмосферного увлажнения в бассейне р. Амур в конце XX в. Известно, что подвижные формы соединений железа играют ключевую роль в усвоении биогенных элементов в пищевых сетях морских экосистем и, как следствие, определяют их продуктивность. Снижение объёмов добычи биоресурсов в Охотском море японскими промысловиками в начале XXI века учёные этой страны связали с сокращением выноса терригенного мобильного железа со стоком р. Амур. Вполне практическая проблема снижения рыбопродуктивности послужила основой масштабного 5-летнего японско-российско-китайского научно-исследовательского проекта. В итоге исследований нами была сформулирована гипотеза о том, что на фоне быстрого роста приземных температур воздуха и почв при относительно высоком атмосферном увлажнении во второй половине 1980-х гг. из тающих очагов многолетнемерзлых горных пород и почв в бассейне Амура высвободилось беспрецедентно большое количество растворённых железо-гумусных соединений, которые мигрировали с водными потоками в реки и, в конечном счёте, в Охотское море. Пространственно согласованное понижение и дальнейшее 4-летнее увеличение температур воздуха в 1980-е гг. обусловлено, на наш взгляд, сильным климатическим сигналом вследствие вулканических извержений в начале 1980 гг. В последнее время получен ряд независимых подтверждений «криогенной» гипотезы выноса железа со стоком Амура, в частности выявлено достоверное климатически обусловленное увеличение его зимне-весеннего стока.

Ключевые слова: *Амур, растворённое железо, сток, климат, мерзлота, Охотское море*

JAPANESE FISHERMEN VS VOLCANO EXPLOSIONS: NON-OBVIOUS CONSEQUENCES OF THE CLIMATE IMPACT

Shamov V.V.,

Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract. I analyze some hydrological consequences of the recorded changes in the regional atmospheric temperature and moistening in the Amur River basin at the end of the 20th century. It is known that mobile iron forms in water play a key role in the absorption of biogenic elements in the marine ecosystems' food chains, as a result, determine productivity of the ecosystems. In the early 21st century, Japanese scientists associated the decline in the extraction of biological resources in the Sea of Okhotsk with a decrease in the mobile terrigenous iron export through the Amur River. The practical problem of declining fish productivity made the basis for a large-scale 5-year Japanese-Russian-Chinese research project. As a result of our research, we hypothesized that, in the second half of the 1980s, as air and soil temperatures rapidly increased and precipitation remained relatively high, an unprecedented amount of dissolved iron-humus compounds was released from the melting permafrost in the Amur basin, which migrated with water flows into the rivers and eventually into the Sea of Okhotsk. In our opinion, the spatially consistent decrease and subsequent 4-year increase in air temperatures in the 1980s are due to a strong climatic signal caused by volcanic eruptions in the early 1980s. Recently, several independent confirmations of the "cryogenic" hypothesis of iron export with the Amur R. water have been obtained, including a significant climatically driven increase in the Amur low-water flow.

Key words: *Amur / Heilongjiang, dissolved iron, flow, climate, permafrost, Okhotsk Sea*

Введение. Систематическое поступление растворённых и взвешенных веществ с терригенным стоком существенно контролирует продуктивность экосистемы Охотского моря и северо-западной Пацифики. Это обусловлено тем, что соединения растворённого железа (РЖ) – активные агенты биогеохимических процессов, а его общее содержание лимитирует усвоение морским планктоном биогенных элементов, особенно фосфора [13].

Во второй половине 1990-х гг. биопродуктивность Охотского моря и связанная с нею добыча биоресурсов японскими промысловиками резко возросла, но в начале 2000-х гг. объёмы добычи заметно снизились. Согласно гипотезе японских учёных, такое снижение было связано, в первую очередь, с сокращением выноса терригенного мобильного железа в Охотское море после 1998 г. Задача выяснения причин такого поведения железа легла в основу 5-летнего международного научно-исследовательского проекта (Амуро-Охотский проект: www.chikyu.ac.jp/AMORE/), в фокусе которого оказалось именно РЖ и подвижные формы иных следовых металлов, а также ряд компонентов макросостава вод реки Амур – основного поставщика терригенного материала в экосистему Охотского моря.

Материалы и методы. В рамках проекта были привлечены данные стандартных наблюдений за стоком и химическим составом воды на постах Дальневосточного УГМС. При этом пробоподготовка и методы лабораторных анализов соответствовали требованиям руководящих документов, принятых в системе Росгидромета [9].

В 2006–2009 гг. были проведены российско-японские полустационарные и экспедиционные исследования поведения подвижных форм железа и других элементов в горных и равнинных ландшафтах российской части бассейна Амура. Ежегодно выполнялись гидрохимические разрезы и измерения расходов воды на участке Амура от г. Хабаровска до г. Николаевска-на-Амуре с учётом впадения крупных притоков, влияния городов и чередования долинных расширений и сужений. Регулярные измерения стока и отборы проб воды с последующим их лабораторным анализом на базе ИВЭП ДВО РАН проводились в границах Среднеамурской равнины – на реках, впадающих в оз. Гасси (2006–2007 гг.), и на р. Кия, правого притока р. Усури (2008–2009 гг.).

В 2023–2024 гг. международным коллективом при участии автора настоящего доклада было выполнено исследование гидрологических последствий климатических изменений в трансграничном бассейне Амура на основе статистического анализа многолетних ежедневных метеорологических (температура, осадки, испарение) данных, полученных из глобальных моделей реанализа ERA5 и GLEAM, а также общедоступных гидрологических данных с водомерных постов Хабаровск, Комсомольск-на-Амуре и Богородское за период с 1950 по 2022 гг. [11]. Недостающие данные о суточном стоке были восстановлены с помощью методов (моделей) машинного обучения. Анализ значимости трендов в рядах данных был выполнен с помощью непараметрического теста Манна-Кендалла. Метод анализа главных компонент был использован для оценки значимости климатических факторов в изменении стока р. Амур.

Результаты и их обсуждение. В рамках Амур-Охотского проекта было выявлено, что при относительно низкой водности транзитных рек слабодренлируемые равнинные ландшафты, приуроченные к переувлажненным днищам речных долин и долинным расширениям Нижнего Амура, обеспечивают поступление в эти реки от сотен грамм до нескольких килограммов РЖ в сутки с 1 км² площади водосбора. Горные реки в долинных сужениях р. Амур обеспечивают на порядок меньшую величину удельного стока РЖ. В условиях сезонного переобводнения обширных мелкозалежных торфяных болот и высоких половодий и дождевых паводков на реках данное различие стирается, так как прослеживается некоторое разбавление железистых болотных вод ультрапресными атмосферными водами. Особый случай представляют собой летне-осенние паводки, во время которых горные реки благодаря высоким значениям удельного стока выносят РЖ от десятков до сотен г/с, тогда как реки, преимущественно дренирующие болота, обеспечивают объёмы выноса РЖ не более 10 г/с.

Значимую долю стока рек системы р. Амур составляют подземные воды, разгрузка которых в русловую сеть приурочена в основном к горным верховьям этих рек. Сток горных рек повсеместно в среднем на порядки превышает сток с торфяных болот благодаря существенно бóльшим площадям водосбора и мощной системе водоносных горизонтов, дренируемой густой речной сетью. Учитывая этот факт, преобладающим источником подвижного железа в крупных транзитных реках (в частности, в Амуре и его крупных притоках) следует считать грубогумусные почвы и подстилающие породы горных ландшафтов. Торфяные болота амурских равнин поставляют двухвалентное железо, связанное с органическими кислотами, преимущественно в нижележащие грунтовые и напорно-грунтовые воды [1], разгрузка которых в Амур в его нижнем течении и его крупные притоки осуществляется, по нашим оценкам [10], лишь в весьма незначительном объёме – около 1 % руслового стока.

Сведения о сельскохозяйственном освоении болот и заболоченных земель, сопровождающемся потерями естественного гумуса и запасов подвижных форм железа в почве [12; 5], а также данные об активном использовании железистых подземных вод для ирригации рисовых полей в провинции Хейлунцзян (КНР) в 1990-х гг. [10] не объясняют причины всплеска концентрации и выноса железа в горно-таёжных ландшафтах российской части бассейна Амура. Также остаётся не объяснённым, почему при сохранявшемся увеличении числа оросительных скважин в сельскохозяйственных кооперативах провинции Хейлунцзян и, очевидно, наращивании объёмов откачек подземных вод в 1998–1999 гг. наблюдалось весьма резкое снижение содержания РЖ в водах Амура ниже впадения рек Сунгари и Уссури, на водосборах которых сосредоточены основные площади поливных земель [2].

Примечательно, что по данным ранее выполненных исследований [6] Зейское водохранилище несколько снижает или стабилизирует содержание РЖ в водах Зеи и Амура. В 1995–1998 гг. резкое увеличение содержания железа отмечен лишь в пунктах, расположенных в низовьях Зеи, существенно ниже створа Зейской ГЭС.

По итогам 5-летнего Амур-Охотского проекта нами [10] сформулирована гипотеза о том, что многократный (2–6 раз) резкий рост концентрации растворённого железа в Амуре и его северных и восточных притоках в 1994–1998 гг. был преимущественно обусловлен интенсивной деградацией многолетней мерзлоты близ южной границы её распространения. Это следует рассматривать как следствие повышения зимних и среднегодовых температур воздуха и почвы в Забайкалье и российском Приамурье в 1987–1990 гг., рост температур при этом сопровождался увеличением годовых сумм атмосферных осадков [7]. Снижение содержания РЖ в реках региона после 1998 года, вероятно, связано с существенным снижением атмосферного увлажнения в бассейне Амура, что могло стать причиной сокращения темпов выщелачивания РЖ в почвах и миграции его в реки.

Как известно, термический режим мёрзлых пород достаточно чувствителен к тепловому воздействию на их верхнюю поверхность: по оценкам Э.Д. Ершова [3], при скорости климатического нагрева $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ скорость таяния оценивается в мёрзлом торфе как $6\text{ см}/\text{год}$, в мёрзлых илистых грунтах – $13\text{ см}/\text{год}$, а в мёрзлом песке – $20\text{ см}/\text{год}$. Кроме того, развитие больших объёмов талых надмерзлотных (выше кровли ММП) и межмерзлотных вод на границе между талыми и мёрзлыми породами приводит к увеличению скорости водообмена в системе водоносных горизонтов и, следовательно, к усилению связей между поверхностными и подземными водами.

Северная часть бассейна р. Амур – более 1/3 общей площади – покрыта многолетнемерзлыми горными породами (ММП) различной степени сплошности и мощности. В горах северной части бассейна мощность слоя ММП может достигать $100\text{--}300\text{ м}$. Согласно палеорекострукциям в Забайкальской криолитозоне, эта мощность в основном определяется климатическими условиями. Ранее отмечено [8] резкое уменьшение мощности ММП в южной

части Забайкальского региона (верховья Амура) в течение последнего десятилетия XX в., при этом приводятся данные о смещении границы ММП на север на десятки–сотни километров в конце XX в.

Согласно П.В. Новороцкому [7], среднегодовая температура воздуха в бассейне р. Амур, полученная на основе пространственно усреднённых стандартных данных с 14-и российских и 6-и китайских метеостанций, демонстрирует устойчивое повышение в конце 1980-х годов после длительного периода относительной стабильности и их понижения в 1984–1985 гг. В 1988 году ряд отклонений среднегодовой температуры совершает своего рода положительный скачок и каждый последующий год до 1991 года остаётся выше нуля. Это означает, что после 1988 г. в бассейне р. Амур отмечалось чрезвычайно поступление большого количества атмосферного тепла к подстилающей поверхности. 1990 год стал самым тёплым в амурском регионе, превышение средней температуры относительно базового уровня (за период 1890–2010 гг.) составило 1,7–2,0 °С. При этом в 2007–2011 гг. она превысила базовый уровень в среднем на 1,42 °С.

Между тем, согласно данным стандартных метеонаблюдений, по меньшей мере два случая значительного увеличения усреднённой годовой суммы осадков были отмечены в 1980-х и 1990-х годах, а с середины 1990-х годов, в бассейне Амура было отмечено относительно резкое снижение пространственно-усреднённых годовых сумм осадков [7].

Крупные вулканические события, как известно [4], приводят к существенным многолетним возмущениям в климатической системе Земли и обычно сопровождаются снижением температурного фона в приземном слое атмосферы в первые годы за счёт выброса в атмосферу большого количества пепла, аэрозолей и снижения её прозрачности, а затем – более длительным и весьма интенсивным повышением температуры воздуха благодаря высокому содержанию в атмосфере вулканогенных летучих соединений (водяной пар, двуокись углерода, диоксид серы, метан и др.), оказывающих «парниковый эффект». В данном ключе примечательны три крупных вулканических извержения в северном полушарии, которые произошли в рассматриваемый период: в апреле 1980 г. (Сент-Хеленс, США), в марте–апреле 1982 г. (Эль-Чичон, Мексика) и в июне 1991 г. (Пинатубо, Филиппины). Климатические сигналы этих извержений были зарегистрированы практически одновременно на многочисленных метеостанциях северного полушария.

Поскольку температура приземного воздуха подвержена сильным флуктуациям, нами были проанализированы ряды данных измерений температуры почвы на 10-и метеостанциях, расположенных в российской части бассейна Амура – от Читы на западе региона до Свиягино (Приморский край) на востоке. На стандартной глубине 3,2 м температура почвы испытывала плавные изменения в силу большой инерционности результирующей величины теплообменных процессов (рис. 1).

Вулканические события начала 1980-х гг. отразились в рядах данных о температуре почв на всех 10-и метеостанциях. Явное уменьшение поступления тепла в почву в середине 1980-х гг., а затем его относительно резкое увеличение в 1986–1990 гг. на фоне относительно обильного атмосферного увлажнения в северной и восточной частях бассейна Амура могло послужить триггером таяния ММП и, в конечном итоге, к выщелачиванию подвижных форм железа из таёжных гумусовых / торфяных почв в подземные водоносные горизонты, а затем и в реки.

В 1990 г. в некоторых реках северных притоков Амура (Тында, Селемджа, Большая Пера и Буряя) максимумы содержания железа были зарегистрированы на год позже, чем на южных участках Амура и Зеи. Примечательно, что содержание железа в таких реках повысилось не так сильно, как на южных участках. Возможно, ММП вблизи южных и восточных окраин «таяли» в первую очередь и более интенсивно. В реках низовьев Амура (Тунгуска, Нимелен, Амгунь), увеличение содержания РЖ наблюдалось несколько раз в 1995–1996 годах. Однако повышенные концентрации железа в р. Уссури – в 3–5 раз выше среднего

значения – были обнаружены в 1997 и 1998 гг., т.е. в те же годы, что в р. Амур у Хабаровска, что могло быть обусловлено таянием сохранявшихся в 1990-е гг. островов мезлоты на вершинах Сихотэ-Алиня.

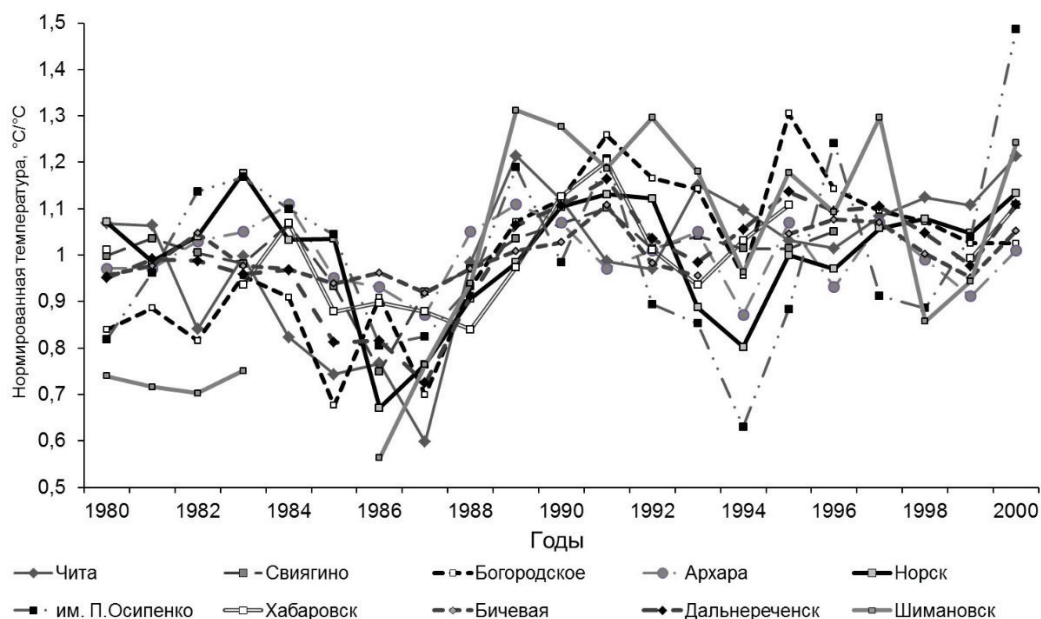


Рис. 1. Колебания температуры почвы на глубине 3,2 м по данным метеостанций в российской части бассейна р. Амур.

В 2025 году вышла обобщающая работа японских исследователей [14], в которой они убедительно показывают криогенно-климатическую обусловленность увеличения выноса мобильного железа из вытаивающих ММП северной части бассейна Амура, при этом всплеск содержания этого элемента в речных водах регистрируется примерно 7 лет спустя после значимого повышения температур в этом регионе.

Анализ тенденций в рядах многолетних метеоданных в бассейне Амура, выявление резких изменений (точек перелома трендов) и регрессионный анализ данных показали в целом значительное потепление и увеличение интенсивности фактической эвапотранспирации в бассейне с 1950 по 2022 год, в то время как годовое количество осадков снижалось в конце XX в., достигнув минимума в 2000-м году, затем резко увеличивалось, эквивалент снежного покрова не проявил существенных изменений [11]. Увеличение температуры воздуха существенно влияет на режим рек бассейна, изменяя характер выпадения осадков и провоцируя интенсивное таяние ММП. Согласно результатам регрессионного анализа увеличение годового количества осадков на 1 мм привело к увеличению годового стока р. Амур у станции Комсомольск-на-Амуре на 0,48 мм, а повышение температуры на 1 °С – к его увеличению на 1,65 мм.

При том, что в годовом стоке значимых долгосрочных трендов не наблюдалось, низкий зимне-весенний сток (суммарный за период с декабря по май) существенно возрастал в течение 1980-х гг., затем, во второй половине 1990-х он испытывал снижение, достигнув локального минимума в 2004-м году (рис. 2).

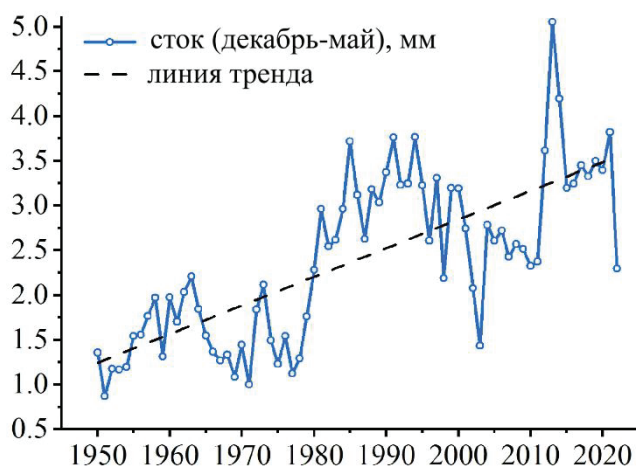


Рис. 2. Многолетняя динамика зимне-весеннего стока р. Амур у г. Комсомольска-на-Амуре за период 1950–2022 гг. [11].

Общее повышение меженного стока за весь 73-летний период (со средней интенсивностью 0,032 мм/год) объясняется, в первую очередь, увеличением подземного питания рек криолитозоны на фоне повышения температуры и количества жидких осадков при снижении толщины снежного покрова.

Выводы

Многолетние тенденции в динамике стока одной из крупнейших рек мира – Амура – и изменение содержания растворённых веществ в её водах следует рассматривать как следствие масштабных преобразований в бассейне, обусловленных не столько прямым воздействием на них хозяйственной деятельности, сколько изменением регионального климатического фона. Климат, очевидно, является одним из главных естественных факторов, определяющих круговорот вещества и энергии в бассейнах крупных рек на южной границе криолитозоны, что приводит к отсроченным как минимум на 7 лет изменениям качества речных вод. Возмущения в климатической системе, вызванные крупными вулканическими событиями, могут служить своеобразными триггерами для процессов, казалось бы, весьма удалённых – и пространственно, и во временном отношении – от растущих потребностей людей. Бесспорна необходимость исследовать гидрологические реакции на тенденции в потоках приземного тепла и влаги, выявленные на основе инструментальных метеорологических наблюдений и результатов моделирования динамики теплового и водного баланса.

Литература

1. Архипов Б.С., Кулаков В.В. Факторы и процессы формирования подземных железистых вод в северо-восточной части Среднеамурского артезианского бассейна // Гидрогеологические исследования в Приамурье. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1979. – С. 94–102.
2. Ганзей С.С. Трансграничные геосистемы юга Дальнего Востока России и северо-востока КНР. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – 231 с.
3. Ершов Э.Д. Общая геокриология. М.: Изд-во МГУ, 2002. 682 с.
4. Логинов В.Ф. Радиационные факторы и доказательная база современных изменений климата. – Минск: Белорусская наука, 2012. – 266 с.
5. Матюшкина Л.А., Левшина С.И., Юрьев Д.Н. О миграции железа в почвах и поверхностных водах Нижнего Приамурья // Биогеохимические и экологические исследования наземных и водных экосистем. Вып. 16. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – С. 185–194.
6. Мордовин А.М., Петров Е.С., Шестеркин В.П. Гидроклиматология и

гидрохимия Зейского водохранилища. – Хабаровск: Дальнаука, 1997. – 137 с.

7. Новороцкий П.В. Климатические изменения в бассейне Амура за последние 115 лет // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 2. – С. 43–53.

8. Обязов В.А. Адаптация к изменениям климата: региональный подход // География и природные ресурсы. – 2010. – № 2. – С. 34–39.

9. Руководящий документ РД 52.24.358-2006. Росгидромет. – Ростов-на-Дону, 2006. – 19 с.

10. Шамов В.В., Ониши Т., Кулаков В.В. Сток растворенного железа в реках бассейна амура в конце XX века // Водные ресурсы. – 2014. Т. 41. – № 2. – С. 206–215.

11. Li J., Wang R., Huang Q., Xia Ju., Wang P., Fang Yu., Shamov V.V., Frolova N.L., She D. Climate warming-induced hydrological regime shifts in cold northeast Asia: insights from the Heilongjiang-Amur River basin // Land. 2025. 14 (5), 980. <https://doi.org/10.3390/land14050980>

12. Liu H., Zhang S. and Lu X. Processes of wetland landscape changes in Naoli River basin since 1980s // J. Natural Resources. – 2002. Vol. 17. – № 6. – Pp. 698–705 (in Chinese).

13. Martin J.H., Fitzwater S.E. Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic // Nature. – 1988. – № 331. – Pp. 341-342. doi:10.1038/331341f0.

14. Tashiro Y., Hiyama T., Kanamori H., Kondo M. Impact of permafrost degradation on the extreme increase of dissolved iron concentration in the Amur river during 1995–1997 // Prog. Earth Planet. Sci. 2024. 11, 17. <https://doi.org/10.1186/s40645-024-00619-w>.