

Астраханский вестник экологического образования. 2024, №5 (83). С. 84-92

Astrakhan Bulletin of Ecological Education. 2024, №5 (83): 84-92

Биологические науки

Обзор

УДК 551+574.2+574.52

DOI 10.36698/2304-5957-2024-5-84-92

СОВРЕМЕННЫЙ СИНТЕЗ КОНЦЕПЦИИ КРИТИЧЕСКОЙ СОЛЕНОСТИ И ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА АРАЛЬСКОМ МОРЕ

Смуров Алексей Олегович, Плотников Игорь Светозарович, Аладин Николай
Васильевич
Зоологический институт РАН (ЗИН РАН), Санкт-Петербург, Россия
igor.plotnikov@zin.ru

Аннотация: Аральское море – большое бессточное соленое озеро в пустынной зоне Средней Азии. Его уровень и соленость определяет объем стока питающих его рек, который зависит в первую очередь от климатического фактора. Помимо этого, на протяжении последних двух тысячелетий на него оказывает влияние и деятельность человека, безвозвратно забирающего воду рек на орошение. Современный Арал образовался в конце плейстоцена, когда в Аральскую котловину направили свои воды реки Сырдарья и Амударья. Его история представляет собой историю его периодических регрессий и трансгрессий. Изучение колонок донных отложений из разных частей Арала, позволило уточнить возраст современного Арала – 17,5 тыс. лет, а также дало возможность проследить и датировать изменения уровня и солености Арала, отражающие значительные и продолжительные изменения его уровня, обусловленные изменениями климата в Центральной Азии. По микроскульптуре створок раковин некоторых Ostracoda возможно достаточно точное определение солености Аральского моря, при которой обитали эти рачки. Она основана на том, что форма ситовидных поровых каналов зависит от солености. Чем больше округлых поровых каналов, тем ниже соленость среды обитания и наоборот. Ключевые слова: Аральское море, палеолимнология, донные отложения, регрессии и трансгрессии, соленость

Для цитирования: Смуров А.О., Плотников И.С., Аладин Н.В. Современный синтез концепции критической солености и палеолимнологических данных на Аральском море // Астраханский вестник экологического образования. 2024, №5 (83). С. 84-92 DOI 10.36698/2304-5957-2024-5-84-92

Biological Sciences

Review

MODERN SYNTHESIS OF THE CRITICAL SALINITY CONCEPT AND PALEOLIMNOLOGICAL DATA IN THE ARAL SEA

Smurov Alexey Olegovich, Plotnikov Igor Svetozarovich, Aladin Nikolay Vasilievich
Zoological Institute RAS (ZIN RAS), St. Petersburg, Russia

Abstract: The Aral Sea is a large endorheic salt lake in the desert zone of Central Asia. Its level and salinity determine the volume of the riverine water feeding it, which depends primarily on the climatic factor. In addition, over the past two millennia, it has been influenced by human activity, irreversibly taking river water for irrigation. The modern Aral was formed at the end of the Pleistocene, when the Syr Darya and Amu Darya rivers directed their waters into the Aral hollow. Its history is the history of its periodic regressions and transgressions. The study of bottom sediment columns from different parts of the Aral Sea made it possible to clarify the age of the modern Aral Sea – 17,5 thousand years. It also made it possible to track and date changes in the level and salinity of the Aral Sea, reflecting significant and long-term changes in its level due to climate change in Central Asia. Based on the microsculpture of the valves of the shells of some Ostracoda, it is possible to quite accurately determine the salinity

of the Aral Sea at which these crustaceans lived. It is based on the fact that the shape of the sieve pore channels depends on the salinity. The more rounded pore channels, the lower the salinity of the habitat and vice versa.

Key words: *Aral Sea, paleolimnology, bottom sediments, regressions and transgressions, salinity.*

For citation: Smurov A.O, Plotnikov I.S., Aladin N.V. Modern synthesis of the critical salinity concept and paleolimnological data in the Aral Sea // Astrakhan Bulletin of Ecological Education. 2024, №5 (83): 84-92 DOI 10.36698/2304-5957-2024-5-84-92

Расположенное в пустынной зоне Средней Азии на территории Казахстана и Узбекистана Аральское море представляет собой большое бессточное соленое озеро, терминальный водоем рек Сырдарьи и Амударьи, имеющих снеглоедниковое питание. Весь их сток, основной источник воды для Арала, формируется в горах Тянь-Шаня и Памира. Объем достигающего Аральского моря речного стока определяют запасы льда и снега в горах к началу снеготаяния и потери на протяженном равнинном участке. Количество атмосферных осадков, выпадающих на поверхность Арала невелико по сравнению с испарением с поверхности. Таким образом, объем воды в Арале и, как следствие, ее соленость определяются почти исключительно соотношением объемов речного стока, атмосферных осадков и испарения с поверхности [8].

Уровень и соленость Аральского моря как бессточного водоема аридной зоны нестабильны. Природа многолетних циклов изменения уровня Арала связана с изменением естественной водности питающих его рек, зависящей от климатического фактора. Помимо этого, на объем поступающей в Арал речной воды влияет и деятельность человека. В бассейнах Амударьи и Сырдарьи с древности развито орошаемое земледелие, из-за чего часть стока этих рек изымается безвозвратно [8]¹.

Аральское море состоит из двух основных частей: меньшая северная – Малый Арал, и большая южная – Большой Арал. Их разделял остров Кокарал, а соединяли их пролив Аузы-Кокарал и пролив Берга. Обе эти части включают ряд впадин разного размера и глубины. Большой Арал подразделяется на глубоководный западный бассейн, обширный восточный бассейн и залив Тщebas. В Малом Арале выделяются его основная часть, заливы Шевченко, Бутакова и Большой Сарычеганак. Вследствие такой морфологической структуры Аральской впадины [8], при снижении уровня Арал превращается в группу остаточных водоемов.

Вода Аральского моря как континентального водоема сильно метаморфизирована. В ней, по сравнению с океанической водой, доля двухвалентных ионов (гидрокарбонаты, кальций, магний и сульфаты) существенно повышена относительно одновалентных ионов (натрий и хлор). Это связано с солевым составом слабо минерализованных вод (порядка 1–1,5‰) впадающих в него рек, в которых повышена доля двухвалентных ионов. Соленость вод Арала определяется главным образом соотношением объемов речного стока, атмосферных осадков и испарения. Аральское море на протяжении длительного времени после окончания его средневековой регрессии оставалось условно стабильным. До 1961 г. Арал был солоноватоводным, его средняя соленость составляла 10,3‰, а уровень колебался около отметки +53 м [8].

Солевой баланс Арала складывается из приходной и расходной составляющих. Основной составляющей приходной части является ионный сток рек [8]. В свое время Л.С. Берг [7] заметил, что рассчитанное по годовому ионному стоку рек время, необходимое для накопления всей солевой массы, многократно меньше возраста Аральского моря, но, несмотря на это, его воды сохраняют свою относительно невысокую соленость. Из этого следует, что, наряду с поступлением солей, происходит компенсирующее его изъятие. В прошлом, во время регрессий происходило осаждение солей, которые перекрывались

1 См.: Миклин Ф., Аладин Н.В., Плотников И.С., Смуров А.О., Жакова Л.В., Гонтарь В.И., Ермаханов З. Возможное будущее Аральского моря и его фауны // Астраханский вестник экологического образования. 2016. № 2 (36). С. 16-37. EDN: WAGGWN Аладин Н.В. Плотина жизни или плотина длиною в жизнь. Часть первая. «Пролог» или Первая Пятилетка (1988-1992 гг.). Астраханский вестник экологического образования, 2012., 3(21): 206-216. EDN: PUQLWF

терригенными и осадочными материалами, что предотвращало обратное растворение солей при последующем повышении уровня моря [8].

История Аральского моря

В истории Аральского моря следует выделить два периода. Первый период – это его очень продолжительная предыстория, связанная с регрессиями и трансгрессиями Каспийского моря в позднем плиоцене и в плейстоцене. Второй начался конце плейстоцена и продолжился в голоцене – период возникновения и существования современного Аральского моря.

В плиоцене, около 3,3 млн. лет назад, в результате увлажнения климата увеличился речной сток в гипергалинный Балаханский водоем, образовавшийся в результате регрессии Каспия в условиях крайне засушливого климата и занимавший его южную часть. Ранее, в аридных условиях на месте Арала шли субаэральные процессы денудации. К востоку от Устюрта из-за дефляции возникла группа бессточных впадин. Самая большая из них, состоявшая из нескольких котловин, образовалась на месте современного Арала [10, 13]. При наступившей трансгрессии Каспия образовался Акчагыльский водоем, воды которого заполнили Аральскую котловину. Этот залив Акчагыльского моря просуществовал до начавшейся около 1,85 млн. лет назад очередной регрессии Каспия. Регрессия не была продолжительной, и в плейстоцене, примерно 1,7 млн. лет назад, наступила трансгрессия Каспия, и образовался солоноватоводный (5–12‰) Апшеронский водоем, и его воды вновь заполнили Аральскую котловину. Эта трансгрессия сменилась около 1 млн. лет назад очередной регрессией Каспия, и водоем на месте Арала высох. В дальнейшем воды Каспия при его трансгрессиях больше никогда не достигали Аральской котловины.

Непродолжительный по сравнению с предысторией период возникновения и существования современного Аральского моря начался конце плейстоцена и продолжился в голоцене. Согласно исследованиям второй половины XX – начала XXI века, после апшеронской трансгрессии, в среднем плейстоцене Аральского моря не существовало. Длительное время в регионе преобладали процессы ветровой эрозии, и аральская котловина оставалась осушенной [13]. Таким образом, современный Арал не является преемником, возникавших на его месте в плиоцене и плейстоцене заливов Каспия. История современного Аральского моря представляет собой историю его регрессий и трансгрессий.

Изучение колонок донных отложений, взятых в разных частях Аральского моря, позволило целому ряду исследователей прийти к выводу, что современный Арал образовался не ранее, чем в позднем плейстоцене, или даже несколько позже, в голоцене [16]. Это произошло только когда в Аральскую котловину направились воды реки Сырдарья и Амударья.

Последнее такое исследование [16] позволило уточнить время возникновения современного Аральского моря. Колонки донных отложений были взяты в 2009 г. в нескольких точках на обсохшем дне Большого Арала. Наибольшую длину – 11 м имела колонка, взятая к югу от бывшего острова Барсакельмес. В ходе исследования собранного материала выполнялся седиментологический анализ, изучалась микрофауна (фораминиферы и остракоды), проводилось радиоуглеродное датирование панцирей остракод и раковин моллюсков. Датировка горизонтов основывалась не только на радиоуглеродном анализе, но и на модели скорости накопления донных осадков.

Самая нижняя часть 11-метрового керна состояла из глины континентальных субаэральных отложений возрастом 17,5 тыс. лет и более. Следующие слои были образованы песчанистыми озерными отложениями, остатки микрофауны в которых появляются около 17,3 тыс. лет назад. Населяющие соленые континентальные водоемы брюхоногие моллюски *Ecrobia grimmeri* (= *Caspihydrobia* sp.) были встречены начиная со слоя возрастом около 16,3 тыс. лет. Их раковины присутствуют до слоя, датированного около 14,3 тыс. лет. При этом увеличивается доля аутогенной и уменьшается доля терригенной составляющих донных отложений. Лежащие выше слои возрастом 14,3–11 тыс. лет представлены песчанистыми

отложениями преимущественно терригенного происхождения, в которых микрофауна отсутствует, но встречаются остатки растений. Это свидетельствует о том, что на это время приходится регрессия Аральского моря. В вышележащих слоях возрастом 11–8,5 тыс. лет, образованных илистыми осадками, вновь появляются раковины *Ecrobia grimmeri*, что свидетельствует об окончании этой регрессии. Начиная со слоя, датированного возрастом около 6,5 тыс. лет, появляются раковины до этого отсутствовавшего в Арале двустворчатого моллюска *Cerastoderma* [16]. В начале голоцена эти моллюски отсутствовали также и в Каспии. Они появились там только в середине голоцена, проникнув из Черного моря 7000–5000 лет назад. В свою очередь *Cerastoderma* вселилась в Арал из Каспия в результате инвазии [6].

Изучение колонок донных отложений дает и возможность проследить изменения солености Арала, отражающие значительные и продолжительные изменения его уровня, обусловленные изменениями климата в Центральной Азии.

Исследование состава комплексов динофлагеллят в донных отложениях Арала дало возможность проследить изменение его солености за последние 2000 лет [20]. Преобладание *Impagidinium caspiense* указывает на солоноватоводные условия (до 10–15‰) и, соответственно, высокий уровень воды в Арале. В свою очередь, доминирование эвригалинного *Lingulodinium machaerophorum* свидетельствует о низком уровне и высокой солености, т.к. этот вид динофлагеллят выдерживает соленость до 40–50‰. Датировка по радиоуглероду показала понижение уровня и увеличение солености Арала до 425 г., затем в 920–1230 гг. и в период 1500–1650 гг. После 1650 г. соленость слегка колебалась около более низких значений, что предполагает более высокий уровень Арала, сохранявшийся до начала современной регрессии.

Об изменениях уровня и солености Аральского моря также свидетельствует и изменение относительного содержания кальция в виде гипса в донных осадках [17]. Гипс выпадает в осадок, когда соленость превышает определенный уровень, и его наличие может служить индикатором прогрессирующего осолонения, сопровождающего снижение уровня соленого водоема.

Анализ пыльцы из колонок донных отложений Аральского моря (залив Чернышева) позволил реконструировать и датировать значительные изменения условий увлажнения в Центральной Азии за последние 2000 лет по изменениям состава флоры региона [21]. Холодные и засушливые условия преобладали в периоды около 0–400 гг., 900–1150 гг. н. э. и 1500–1650 гг. Тогда в регионе была распространена засухоустойчивая растительность с преобладанием степных элементов. Для этих периодов были характерны низкие средние зимние и летние температуры и небольшое среднегодовое количество осадков. И наоборот, наиболее благоприятные климатические условия наблюдались около 400–900 гг. и в 1150–1450 гг., когда степная растительность обогащалась растениями, требующими более влажных условий, и появились деревья. Эти результаты палинологического анализа хорошо согласуются данными по солености [21], полученными по динофлагеллятам. Датировка периодов высокой солености также согласуются с результатами, полученными по остракодам [15]. Кроме этого, есть согласование и с ранее выявленными периодами низкого уровня Арала, датированными примерно 350–450 и 1550–1650 гг. [21].

Существуют геоморфологические свидетельства прошлых регрессий и трансгрессий Аральского моря. О них свидетельствуют морские береговые террасы, отражающие периоды стабильного уровня Арала в разное время.

Современные исследования [18] ставят под сомнение, что терраса 72–73 м действительно имеет отношение к современному Аралу, т.к. при столь высоком его уровне, выше 64–65 м, начался бы перелив воды в направлении Каспия. Самая низкая терраса 31 м, как считается [9], образовалась в паскевичевский период (поздний плейстоцен и ранний голоцен), завершившийся ~9000 лет назад. В то время климат был холодным и засушливым. Террасы 43,7–44,5, 40–41 и 35,5–36 м отражают периоды устойчивости, следовавшие за увеличением уровня Арала при потеплении и увеличении увлажненности климата.

Важным подтверждением глубокой средневековой регрессии Аральского моря стали данные археологии. Благодаря очень значительному падению уровня Большого Арала при его современной регрессии, на его обнажившемся дне на значительном расстоянии от прежней береговой линии были обнаружены в 2002 г. остатки затопленных древних поселений и некрополей, которые до 1960 г. находились на глубине 20 м. Археологи отнесли эти объекты к XIV веку. Определение возраста найденных там костей человека, домашних животных и фрагментов древесины, показало, что большинство их соответствует датировке археологов. При этом два образца костных остатков имели значительно больший возраст – 1400–1800 лет. Они сохранились со времени произошедшей еще в первых веках нашей эры глубокой регрессии Арала [12].

Помимо этого, на обсохшем дне прослеживаются остатки русел древней дельты Сырдарьи, которая в те времена впадала в Большой Арал, а не в Малый немного севернее пролива Берга, как в настоящее время. Западная оконечность этой дельты находился недалеко от противоположного склона дна у полуострова Куланды, что указывает на то, что во время этой регрессии произошло падение уровня Большого Арала до отметки 29–29,5 м [11, 12].

Причиной этой средневековой регрессии Аральского моря был не только природный фактор. К изменению климата, обусловившего снижение объемов стока рек, добавился и антропогенный фактор. В 1221–1222 гг., во время нашествия армии Чингисхана, в нижнем течении Амударьи был разрушен город Ургенч, река прорвала дамбу, и значительную часть ее стока направила в Сарыкамыш и далее по Узбою, ее древнему руслу в Каспийское море. Это привело к быстрому падению уровня Арала. Об этом упоминает историк Хафиз Абду, написавший в 1417 г., что Арал исчез, и Амударья течет в Каспий. Река, по свидетельству хивинского хана Абулгази, вновь полностью потекла в Аральское море только около 1573 г. Арал восстановился в конце XVI – начале XVII века [12].

Фактор солености

Соленость водной среды – один из важнейших абиотических факторов, воздействующих на гидробионтов. Оценка роли соленостного фактора базируется на основных положениях концепции относительности и множественности зон барьерных соленостей, которая была сформулирована в рамках школы В.В. Хлебовича² [2]. Она основывается на двух основных положениях: 1) зоны барьерных соленостей, с одной стороны, относительно степени совершенства осморегуляторных способностей гидробионтов, а с другой – химическому составу вод; 2) зон барьерных соленостей несколько, и по своей значимости они неравноценны. Положение и размах интервалов барьерных соленостей зависят не только от физико-химических свойств водной среды. Они могут изменяться, следуя эволюции соленостных адаптаций и осморегуляторных способностей гидробионтов.

Для океанических вод был установлен критический характер биологического действия солености 5–8‰. Она представляет собой универсальный барьер, при переходе через который меняется ряд существенных биологических свойств на разных уровнях биологической интеграции, и она является верхней границей распространения пресноводной фауны и нижней границей распространения морской фауны. Она также является ядром солоноватых вод. Этот соленостный интервал получил название «критическая соленость», и он также известен как «alter minimum», «хорогалиникум» и «критическая соленость» [14]. Кроме этой барьерной солености, или α -хорогалиникума, существует еще несколько неравнозначных [5].

В Аральском море α -хорогалиникума смещен и расширен с 5–8‰ до 8–13‰. Это связано с тем, что в воде этого континентального водоема концентрация двухвалентных

² Смирнов А.В., Смуров А.О., Аладин Н.В. Владислав Вильгельмович Хлебович. //Астраханский вестник экологического образования. 2012. № 1 (19). С. 205-206.

ионов повышена относительно одновалентных ионов. Если сопоставить верхние границы α -хорогалиникума для вод с различным ионным составом по содержанию одновалентных ионов, в частности по хлорности, то они оказываются эквивалентными [1]. Второй барьерной соленостью или β -хорогалиникумом является соленость воды от 23–25‰ и до около 32‰. В этот диапазон соленостей укладывается вторая барьерная соленость, или β -хорогалиникум.

Так как основу фауны Аральского моря составляют пресноводные и солоноватоводные виды гидробионтов, то с ростом солености при переходе через барьерные солености происходит достаточно быстрое и резкое сокращение биоразнообразия, как это имеет место в процессе современной антропогенной регрессии.

Остракоды как индикаторы солености Аральского моря

По микроскульптуре створок раковин некоторых Ostracoda возможно достаточно точное определение солености Аральского моря, при которой обитали эти рачки. Для этого используется методика Розенфельда и Веспера [19]. Она основана на том, что форма ситовидных поровых каналов зависит от солености. Чем больше округлых поровых каналов, тем ниже соленость среды обитания и наоборот. Для Арала, соленость которого на протяжении его истории менялась в широких пределах, в качестве объекта для определения палеосолености больше всего подходит *Cyprideis torosa*. В Арале он представлен очень широко эвригалинной формой, способной к амфиосмотической осморегуляции. Здесь этот рачок является постоянным представителем этой группы ракообразных. При солености ниже критической он гиперосмотик, а при солености выше критической – гипоосмотик, что позволяет ему жить в среде от почти пресной до гипергалинной [4].

В аральской воде у амфиосмотичной формы *C. torosa* по мере увеличения солености от пресной воды до воды 104‰ количество ситовидных поровых каналов округлой формы уменьшается от 100% до 6%. Эти, связанные с соленостью, изменения микроскульптуры створок *C. torosa* можно объяснить осмотическими процессами. Равное количество ситовидных поровых каналов округлой формы и неправильной формы отмечается только при соленостях, отвечающих изосмотичности гемолимфы и окружающей воды, т.е. при переходе от гиперосмотической регуляции к гипоосмотической. Таким образом, при отсутствии значительного осмотического градиента между внутренней средой организма и внешней средой на створках раковин с одинаковой вероятностью появляются ситовидные поровые каналы как округлой, так и неправильной формы. Когда же между гемолимфой и окружающей водой появляется осмотический градиент, то на створках начинают преобладать ситовидные поровые каналы какой-то одной формы. Так, при низких соленостях, когда общая осмотическая концентрация гемолимфы значительно превышает таковую окружающей воды, на створках раковин доминируют каналы округлой формы. Когда же при высоких соленостях общая осмотическая концентрация гемолимфы значительно ниже таковой окружающей воды, на створках доминируют поровые каналы неправильной формы. Осмотические силы воздействуют на форму ситовидных поровых каналов только в период линьки, когда створки раковины еще не пропитаны солями кальция и эластичны. Таким образом, микроскульптура створок, запечатлевает соленостные условия среды именно в момент линьки. При гиперосмии гемолимфы осмотические силы растягивают границы ситовидных поровых каналов, придавая им округлость. При гипоосмии подобного не происходит, и они имеют неправильную форму [4].

Микроскульптура раковин *C. torosa* может достаточно точно отражать соленость в момент линьки. Чем больше округлых поровых каналов, тем ниже солёность среды обитания и наоборот. Это сведения можно использовать для реконструкции палеогалинности [4], когда известен возраст этих раковин.

Заключение

История современного Аральского моря представляет собой историю его неоднократных регрессий и трансгрессий. Изучение колонок донных отложений Аральского моря (седиментологический анализ и анализ остатков различных организмов, а также их датировка по радиоуглероду) показывает, что оно образовалось 17,5 тыс. лет назад, когда Аральскую котловину стали заполнять воды рек Сырдарьи и Амударьи. Анализ этих колонок также дает и возможность проследить происходившие изменения солености Арала, отражающие значительные и продолжительные изменения его уровня, обусловленные как изменениями климата в Центральной Азии, так и деятельностью человека. Подтверждение факта глубокой средневековой регрессии Аральского моря, а также регрессии в первые века нашей эры также дает и археология.

Благодарность. Эту статью авторы посвящают светлой памяти ушедшего из жизни 23 февраля 2024 г. естествоиспытателя, автора концепции критической солености биологических процессов, создателя научной школы, изучающей закономерности соленостных адаптаций и осморегуляции водных организмов, доктора биологических наук, профессора Владислава Вильгельмовича Хлебовича.

Работа выполнена при поддержке ФБГУН Зоологический институт Российской академии наук (ЗИН РАН), тема государственного задания на 2022–2024 гг. 122031100274-7 «Систематизация и изучение динамики биологического разнообразия и функционирования экосистем континентальных водоемов в условиях антропогенного воздействия и изменения климата».

Литература

1. Аладин Н.В. О смещении барьера критической солености в Каспийском и Аральском морях на примере жаброногих и ракушковых ракообразных // Зоологический журнал. – Т. 62. – № 5. – 1983. – С. 689–694.
2. Аладин Н.В. Концепция относительности и множественности зон барьерных соленостей // Журн. общей биологии. – Т. 49. – № 6. – 1988. – С. 825–833.
3. Аладин Н.В. Критический характер биологического действия каспийской воды соленостью 7–11‰ и аральской воды соленостью 8–13‰ // Труды Зоологического института АН СССР. – Т. 196. – 1989. – С. 12–21.
4. Аладин Н.В. Соленостные адаптации Ostracoda и Branchiopoda // Труды Зоологического института РАН. – Т. 265. – 1996. – С. 1–206.
5. Аладин Н.В., Плотников И.С. Концепция относительности и множественности зон барьерных соленостей и формы существования гидросферы // Труды Зоологического института РАН. Приложение №3. – 2013. – С. 7–21.
6. Аладин Н.В., Плотников И.С., Смуров А.О. Моллюски Аральского моря // Зоологический журнал. – Т. 101. – № 2. – 2022. – С. 123–144.
7. Берг Л.С. Аральское море // Известия Туркестанского отд. Русского географического общества. – Т. 5. – Вып. 9. – 1908. – 580 с.
8. Бортник В. И., Чистяева С. П. (ред.) Аральское море. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. – Т. 7. – 1990. – Л.: Гидрометеиздат. 196 с.
9. Вайнбергс И.Г., Стелле В.Я. Позднечетвертичные стадии развития Аральского моря и их связь с изменениями климатических условий этого времени // Колебания увлажненности Арало-Каспийского региона в голоцене. – 1980. – С. 176–180.
10. Кесь А.С. Основные этапы развития Аральского моря // Проблемы Аральского моря. – 1969. – С. 160–172.
11. Кривоногов С.К. Масштабы понижения уровня Аральского моря в средневековье // Доклады Академии наук. – Т. 428. – №. 1. – 2009. – С. 109–114.
12. Кривоногов С.К. Арал умер. Да здравствует Арал! // Природа. – № 8 (1164). – 2012. – С. 46–53.
13. Свиточ А.А. История последнего Аральского моря // Аридные экосистемы. – Т. 15. – № 2 (38). – 2009. – С. 5–17.
14. Хлебович В.В. Критическая соленость биологических процессов. – Л.: Наука. – 1974. – 235 с.
15. Boomer I., Horne D.J., Slipper I.J. The use of ostracods in palaeoenvironmental studies, or what can you do with ostracod shell? // Paleontological Society papers. – V. 9. – 2003. – P. 153–179.
16. Burr G.S., Kuzmin Y.V., Krivonogov S.K., Gusskov S.A., Cruz R.J. A history of the modern Aral Sea (Central Asia) since the Late Pleistocene // Quaternary Science Reviews. – No. 206. – 2019. – P. 141–149.

17. Oberhänsli H., Boroffka N., Sorrel P., Krivonogov S. Climate variability during the past 2,000 years and past economic and irrigation activities in the Aral Sea basin // *Irrigation and Drainage Systems*. – V. 21. – 2007. – P. 167–183.
18. Reinhardt C., Wünnemann B., Krivonogov S.K. Geomorphological evidence for the Late Holocene evolution and the Holocene lake level maximum of the Aral Sea // *Geomorphology*. – V. 93. – No. 3–4. – 2008. – P. 302–315.
19. Rosenfeld A., Vesper B. The variability of the sieve pores in recent and fossil species of *Cyprideis torosa* (Jones, 1850) as an indicator for salinity and palaeosalinity // *Aspects of ecology and zoogeography of recent and fossil Ostracoda*. – The Hague: Pr. W. Junk bv. Publisher. – 1977. – P. 55–67.
20. Sorrel P., Popescu S.-M., Head M.J., Suc J.P., Klotz S., Oberhänsli H. Hydrographic development of the Aral Sea during the last 2000 years based on a quantitative analysis of dinoflagellate cysts. *Palaeogeography, Palaeoclimatology // Palaeoecology*. – V. 234. – No. 2–4. 2006. – P. 304–327.
21. Sorrel P., Popescu S.-M., Klotz S., Suc J.-P., Oberhänsli H. Climate variability in the Aral Sea basin (Central Asia) during the late Holocene based on vegetation changes // *Quaternary Research*. – V. 67. – No. 3. 2007. – P. 357–370.

References

1. Aladin N.V. On displacement of the critical salinity barrier in the Caspian and Aral seas, the Branchiopoda and Ostracoda taken as examples. *Zoologicheskii Zhurnal*. – V. 62. – N. 5. – 1983. – P. 689–694. (in Russian)
2. Aladin N.V. The concept of relativity and plurality of barrier salinity zones. *Zhurnal Obschey Biologii*. – V. 49. – N. 6. – 1988. – P. 825–833. (in Russian)
3. Aladin N.V. Critical character of the biological influence of the Caspian water with the salinity 7–11 ‰ and the aral water with the salinity 8–13 ‰. *Proceedings of the Zoological Institute USSR AS*. – V. 196. – 1989. – P. 12–21. (in Russian)
4. Aladin N.V. Salinity adaptations in Ostracoda and Branchiopoda. *Proceedings of the Zoological Institute RAS*. – V. 265. – P. 1–206. (in Russian)
5. Aladin N., Plotnikov I. The concept of relativity and plurality of barrier salinity zones and forms of existence of the hydrosphere. *Proceedings of Zoological Institute RAS*. – Supplement 3. – 2013. – P. 7–21. (in Russian)
6. Aladin N.V., Plotnikov I.S., Smurov A.O. Mollusks of the Aral Sea. *Zoologicheskii Zhurnal*. – V. 101. – N. 2. – 2022. – P. 123–144. (in Russian)
7. Berg L.S. (1908). Aral'skoe more. *Izvestiya Turkestanskogo otdela Imperatorskogo Russkogo geograficheskogo obshchestva*. – V. 5. – I. 9. – 1908. – 580 p. (in Russian)
8. Bortnik V. I., Chistyeva S.P. (eds.) *Aral'skoye more. Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR*. – V. 7. – 1990. – Gidrometeoizdat, Leningrad. – 196 p. (in Russian)
9. Vaynbergs I.G., Stelle V.YA. Pozdnechetvertichnyye stadii razvitiya Aral'skogo morya i ikh svyaz' s izmeneniyami klimaticheskikh usloviy etogo vremeni. *Kolebaniya uvlazhnennosti Aralo-Kaspiyskogo regiona v golotsene* – 1980. – P. 176–180. (in Russian)
10. Kes' A.S. Osnovnyye etapy razvitiya Aral'skogo morya. *Problemy Aral'skogo morya*. – 1969. – P. 160–172. (in Russian)
11. Krivonogov S.K. Masshtaby ponizheniya urovnya Aral'skogo morya v srednevekov'ye. *Doklady Akademii nauk*. – V. 428. – N. 1. – 2009. – P. 109–114. (in Russian)
12. Krivonogov S.K. Aral umer. Da zdravstvuyet Aral! *Priroda*. – N. 8 (1164). – 2012. – P. 46–53. (in Russian)
13. Svitoch A.A. History of the last Aral Sea. *Aridnyye ekosistemy*. – V. 15. – N. 2 (38). – 2009. – P. 5–17. (in Russian)
14. Khlebovich V.V. The critical salinity of biological processes. – Nueka, Leningrad. – 1974. – 235 p. (in Russian)
15. Boomer I., Horne D.J., Slipper I.J. The use of ostracods in palaeoenvironmental studies, or what can you do with ostracod shell? *Paleontological Society papers*. – V. 9. – 2003. – P. 153–179.
16. Burr G.S., Kuzmin Y.V., Krivonogov S.K., Gusskov S.A., Cruz R.J. A history of the modern Aral Sea (Central Asia) since the Late Pleistocene. *Quaternary Science Reviews*. – No. 206. – 2019. – P. 141–149.
17. Oberhänsli H., Boroffka N., Sorrel P., Krivonogov S. Climate variability during the past 2,000 years and past economic and irrigation activities in the Aral Sea basin. *Irrigation and Drainage Systems*. – V. 21. – 2007. – P. 167–183.
18. Reinhardt C., Wünnemann B., Krivonogov S.K. Geomorphological evidence for the Late Holocene evolution and the Holocene lake level maximum of the Aral Sea. *Geomorphology*. – V. 93. – No. 3–4. – 2008. – P. 302–315.
19. Rosenfeld A., Vesper B. The variability of the sieve pores in recent and fossil species of *Cyprideis torosa* (Jones, 1850) as an indicator for salinity and palaeosalinity. *Aspects of ecology and zoogeography of recent and fossil Ostracoda*. – The Hague: Pr. W. Junk bv. Publisher. – 1977. – P. 55–67.
20. Sorrel P., Popescu S.-M., Head M.J., Suc J.P., Klotz S., Oberhänsli H. Hydrographic development of the Aral Sea during the last 2000 years based on a quantitative analysis of dinoflagellate cysts. *Palaeogeography, Palaeoclimatology. Palaeoecology*. – V. 234. – No. 2–4. 2006. – P. 304–327.

21. Sorrel P., Popescu S.-M., Klotz S., Suc J.-P., Oberhänsli H. Climate variability in the Aral Sea basin (Central Asia) during the late Holocene based on vegetation changes. *Quaternary Research*. – V. 67. – No. 3. 2007. – P. 357–370.