

doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-436-443



ИССЛЕДОВАНИЯ МОРФОЛОГИИ ПЕРЕУГЛУБЛЕННЫХ УЧАСТКОВ РЕКИ АНАДЫРЬ В ПРЕДЕЛАХ КОТЛОВИНЫ ПОДПРУДНОГО ОЗЕРА: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

✉ Школьный Д.И.¹, Бахарева Е.И.¹, Семаков В.А.¹, Головлев П.П.¹, Шухвостов Р.С.^{1,2}

¹ МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

² Институт географии РАН, Москва, Россия

✉ danila.hydro@yandex.ru

В ходе исследований гидрологического режима реки Анадырь, проводимых с 2020 года в ее среднем течении, где река формирует разветвленное русло в древней рифтовой котловине, заполненной песчаными отложениями плейстоценовых и голоценовых подпрудных озер, было установлено существование в русле реки и ее протоках переуглубленных участков – «ям» с глубинами до 45 метров (при наивысших уровнях воды). Анализ космических снимков для данных участков показал, что в створе каждой из ям в борту русла наблюдается характерная выемка правильной дугообразной формы. В полевой сезон 2024 года были выполнены промеры глубин у всех подобных выемок, встречающихся в пределах разветвления, позволившие локализовать 239 ям в пределах участка исследований. На наиболее выделяющихся из них проводились измерения скоростных полей потока в половодье и в межень, отбор проб грунта и гидрохимические исследования, что позволило собрать материал для обсуждения различных гипотез возникновения этих форм донного рельефа. Также были выполнены рекогносцировочные геологические работы, включившие в себя расчистку прибрежного уступа и выхода жильного льда, а также бурение пойменной фации, которые позволяют уточнить имеющиеся скудные данные об условиях осадконакопления на этой территории.

Ключевые слова: Анадырь, русловые ямы, котловина подпрудного озера, водоворотные явления, воронки газового выброса.

Район исследований. Исследуемый участок, в пределах которого были обнаружены ямы с глубинами и формами, нехарактерными для русел рек такого масштаба, расположен в пределах Марковской впадины – участка более крупной Парапольско-Бельской низменности, занимающей прогиб между Колымским, Корякским и Чукотским нагорьями. Большая часть впадины занята крупным разветвлением, образованным основными руслами Анадыря и его крупного притока, Майна, а также большим количеством соединяющих их проток различного размера. Разветвление имеет нехарактерную структуру – пойменный комплекс на 70% своей площади представляет собой термокарстовую поверхность и лишь на 30% – не полностью переработанные термокарстом участки, сохранившие признаки пойменного ложбинно-гривистого рельефа. При этом, значительная часть впадины затапливается в весеннее половодье – затапливаемый участок имеет площадь до 5100 км², а продолжительность затопления из-за конфигурации впадины может превышать месяц (рис. 1). Русла как Анадыря, так и его пойменных проток на участке глубоко врезаются в пойменный массив и имеют очень высокую извилистость – так, длина основного русла Анадыря в пределах разветвления составляет 250 км. Современные скорости размыва берегов минимальны, а пояса смещения проток в рельефе не читаются, в связи с чем можно предположить, что речная сеть была заложена в иных гидроклиматических условиях – как по водности реки и отдельных ее проток, так и по мерзлотным характеристикам поверхности. С морфодинамической точки зрения на участке сформировалось русло раздвоенного типа, в половодье представляющее собой параллельные рукава с близкими по порядку значениями расходов воды. В меженный период водность рукавов уменьшается с севера на юг впадины (т.е., чем раньше рукав отделяется от основного русла, тем меньше его водность) [Школьный и др., 2023].

Согласно данным геологических исследований, территория представляет собой прогиб, заполненный осадками крупнейших пра-рек территории в плейстоценовый и голоценовый период в ходе оледенений и межледниковых периодов. Толщина флювиальных отложений, вскрытых бурением опорной скважины в 1970-е годы, здесь составляет около 390 метров. Детальные исследования, проводившиеся выше по течению Майна, показали существование здесь подпрудных озер, площадь которых регулярно менялась, в результате чего наблюдались несколько циклов седиментации [Новейшие отложения..., 1980; Vasilchuk Y., Vasilchuk A., 2017]. При этом, особенности и датировки процесса накопления отложений и формирования современной русловой сети Анадыря и его междуречья ранее не исследовались.

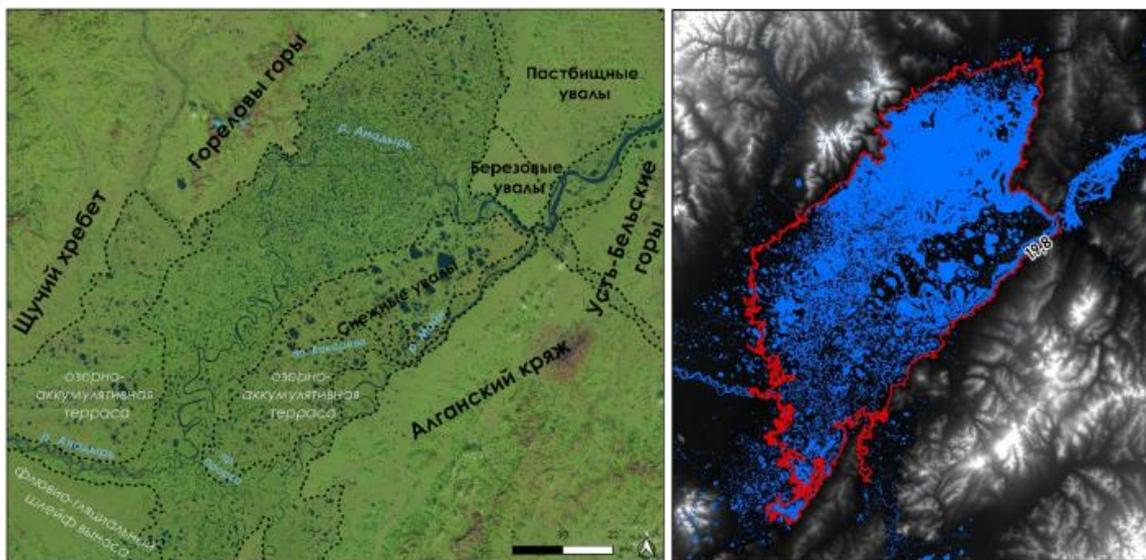


Рис. 1. Спутниковый снимок и основные морфологические элементы Марковской впадины (слева) и маска максимальной площади затопления впадины в 2018 году (справа).

Обзор существующих гипотез. В современной научной литературе единственным исследованным аналогом с похожими русловыми формами является дельта р. Маккензи [Lapointe, 1986; Fassnacht, Conly, 2000; Beltaos, Carter, Prowse, 2011]. В Восточном канале (крайней восточной из проток дельты) обнаружены и исследованы ямы с максимальными глубинами до 37 метров, также имеющие выемки на берегах (в зарубежной терминологии – *scour hole* и *scour bay*, соответственно). Основной специфической особенностью этих ям, подчеркиваемой всеми исследователями, является их стабильность в многолетнем разрезе – глубины в ямах и форма их выемок практически не меняется, это связывается с второстепенностью протоки и, как следствие, сравнительно небольшими объемами проходящих по ней наносов.

Несмотря на детальные исследования, ведущиеся в дельте Маккензи последние десятилетия, однозначной гипотезы, описывающей их происхождение и развитие, до сих пор не имеется. В качестве основного процесса, определяющего параметры ям, большинство исследователей принимают ледовые явления – скопление шуги под ледовым покровом, которое приводит к ограничению площади поперечного сечения и при эпизодических увеличениях расходов воды увеличивает скорость подледного течения, что может приводить к формированию водоворотов и абразивному воздействию массы шуги. Возникновение ям связывается с палеогидрологическими особенностями территории – в первую очередь, с размывом руслом отложений старых термокарстовых озерных котловин, которые могут располагаться под более поздним аллювием, или старых узлов слияний пойменных протоков. Наличие таких стратиграфических слоев на пути современных русел может приводить к пространственной изменчивости эродируемости донных отложений, формированию участков захороненного льда под руслом, разрывным

нарушениям в таликовой зоне и другим проявлениям неустойчивости материала. Быстрый размыв более мелких отложений может приводить к формированию первичной ямы, над которой формируется водоворотная зона, расширяющая ее и поддерживая ее форму.

Помимо этого, в ходе выполнения полевых работ на Анадыре возникла гипотеза о возможности возникновения под руслом воронок метанового взрыва за счет выделения на поверхность скоплений метана из мерзлых пород в результате оттаивания и ослабления их плотности. Были обнаружены отдельные ямы практически правильной округлой формы, борта которых представляют собой практически вертикальные обрывы. Именно таким ямам соответствуют наиболее выраженные выемки в берегах. Два этих морфологических признака могут свидетельствовать об относительно небольшом возрасте этих ям по сравнению с более старыми ямами, у которых к максимальным глубинам примыкает плесовая ложбина, протягивающаяся вниз (реже – вверх) от ямы, а выемки в берегах не так ярко выражены из-за горизонтальных смещений русла.

Принимая наличие выемок в берегах (рис. 2) за качественный признак для дешифрирования, был выполнен поиск подобных таких участков в пределах арктической зоны. Было обнаружено более 250 подобных объектов, приуроченных к криолитозоне в пределах России (рр. Большая Чукочья, Малая Куропаточья, Шандрин, и Хрома, отдельные пойменные протоки Колымы и Индигирки) и Северной Америки (помимо упомянутой дельты Маккензи, это дельты рр. Юкон и Кускоквим). Все эти участки приурочены к низменным участкам течения рек, где происходила ингрессия моря вверх по течению, в результате которой в долинах современных русел распространены толщи лагунных отложений. Подобные условия (заложение речной сети в толщах слоистых мелкодисперсных отложений с высоким содержанием органики) могут определять возможность формирования подобных ям, однако, для этого необходимы доказательства их распространенности и на реках с аналогичными выемками.



Рис. 2. Примеры приуроченных к ямам выемок в берегах на основном русле Анадыря (слева) и протоке Средней (справа).

Методика и результаты полевых работ. Полевые работы на участке в 2024 году были проведены в разные фазы водного режима – на спаде половодья (13-22 июня) и в межень (14-22 августа). Основной целью работ было детальное измерение глубин, выполненное с помощью эхолота Lowrance Elite FS7 на всех ямах в половодье. С помощью акустического доплеровского профилографа течений Sontek M9 измерялись расходы воды и распределение скоростей и направления течения по поперечным сечениям на репрезентативных ямах в обе фазы водного режима. По оси репрезентативных ям и прилегающих к ним участков русла был выполнен отбор проб приповерхностного донного грунта и качественный анализ их механического состава. На входных и

замыкающем створах разветвления были установлены логгеры-самописцы уровня воды Novo U30, также с помощью DGPS-приемников South G1 была выполнена связка уровней воды в половодье и в межень, что позволило определить уклоны водной поверхности и их сезонную изменчивость.

Дополнительно в обе фазы отбирались пробы поверхностной и придонной воды в ямах и в маркерных точках затопленного участка для последующего фильтрования и определения содержания взвешенного вещества с его разделением на органическую и неорганическую составляющие, окрашенное растворенное органическое вещество и хлорофилл, а также производилось измерение потоков метана в водной толще. В межень на прирусловых участках вдоль русла реки было выполнено бурение в 7 точках, позволившее оценить вертикальную структуру и глубину оттаивания пойменного аллювия, а также была выполнена расчистка борта террасы и описание выполненного разреза.

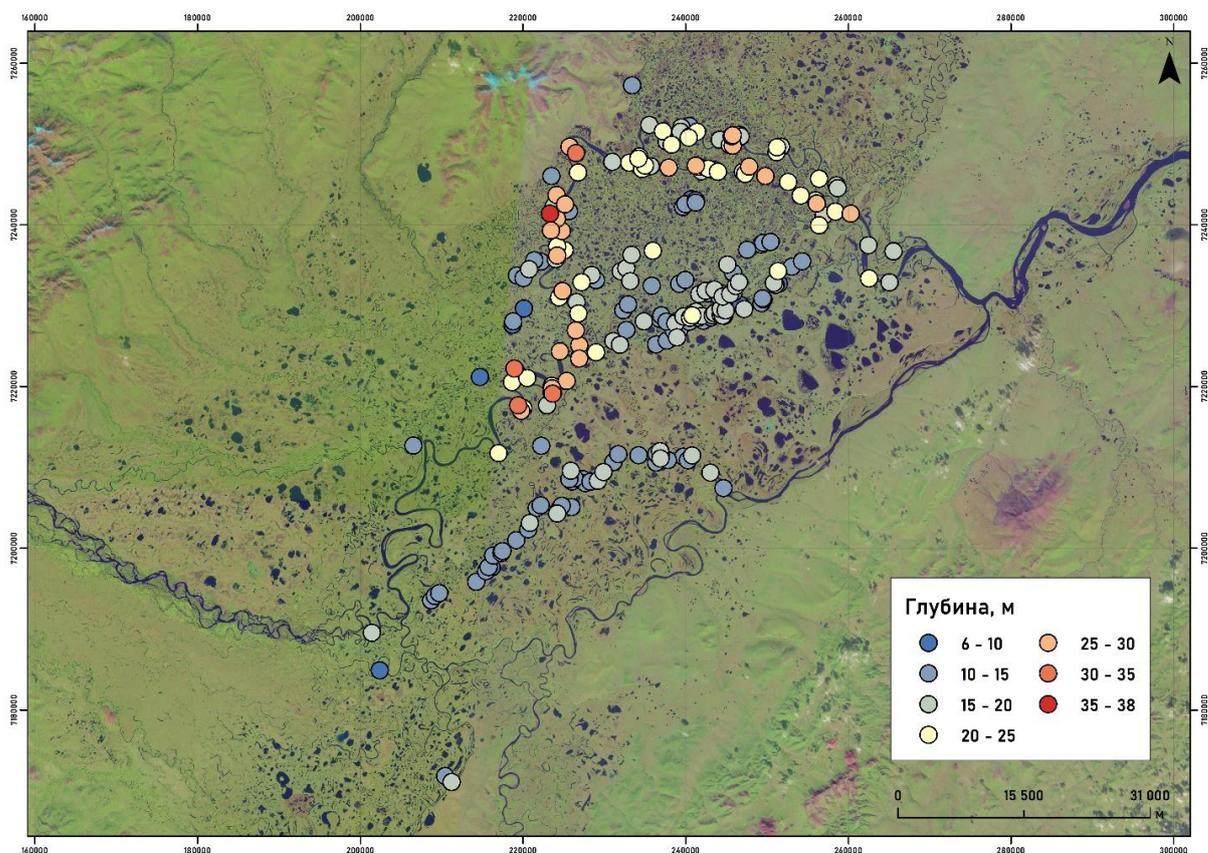


Рис. 3. Распределение глубин ям в пределах разветвления

По результатам измерений глубин (рис. 3) было выявлено, что наличие выемки в берегу является достаточным условием для локализации переуглубленного участка в ее створе. Подавляющее большинство выемок имеет форму правильной дуги окружности различного радиуса, в среднем составляющего 97 м для основного русла Анадыря, 65 м для крупнейшей из пойменных проток, Луковой, и 37-50 м для пойменных проток меньшего размера. Несмотря на кажущуюся связь радиусов выемок и ширины русла, в действительности диапазон параметров выемок является очень разнообразным: на основном русле реки встречаются относительно маленькие выемки, а на руслах небольших проток – превышающие их ширину более чем в два раза. Положение ям относительно русловых форм также различно: более половины из всех ям расположены в вершинах излучин, на небольших протоках таких ям подавляющее большинство. В то же время, часть ям приурочена к прямолинейным участкам или выпуклым берегам (то есть, эти ямы не могут быть обоснованы гидравлически), и для основного русла Анадыря

максимальные глубины характерны именно для таких ям. Из характерных морфометрических признаков можно также отметить смещенное положение ям относительно выемок (рис. 4) – даже при значительном углублении выемки внутрь берега максимальные глубины наблюдаются в пределах основного русла, а на протоках – зачастую смещены к противоположному берегу.

Анализ построенных по результатам промеров карт показал значительную разницу в морфологии ям. Часть из них представляют собой отдельные блюдцеобразные врезы овальной формы, окруженные относительно плоской поверхностью с глубинами в 3-4 раза меньше максимальной глубины ямы, другие ямы представляют собой впадины в пределах протяженных плесовых ложбин. В обоих случаях характерным признаком ямы, отличающим ее от естественной русловой формы, является резкий свал глубин на верхнем по течению склоне ямы, имеющий наибольшую крутизну на отдельно расположенных ямах и более сглаженную форму – на ямах внутри плесов. Как было сказано выше, возможно предположить, что эти различия связаны с возрастом образования ям – более древние формы постепенно разрабатываются потоком, развиваясь вверх и вниз по течению.

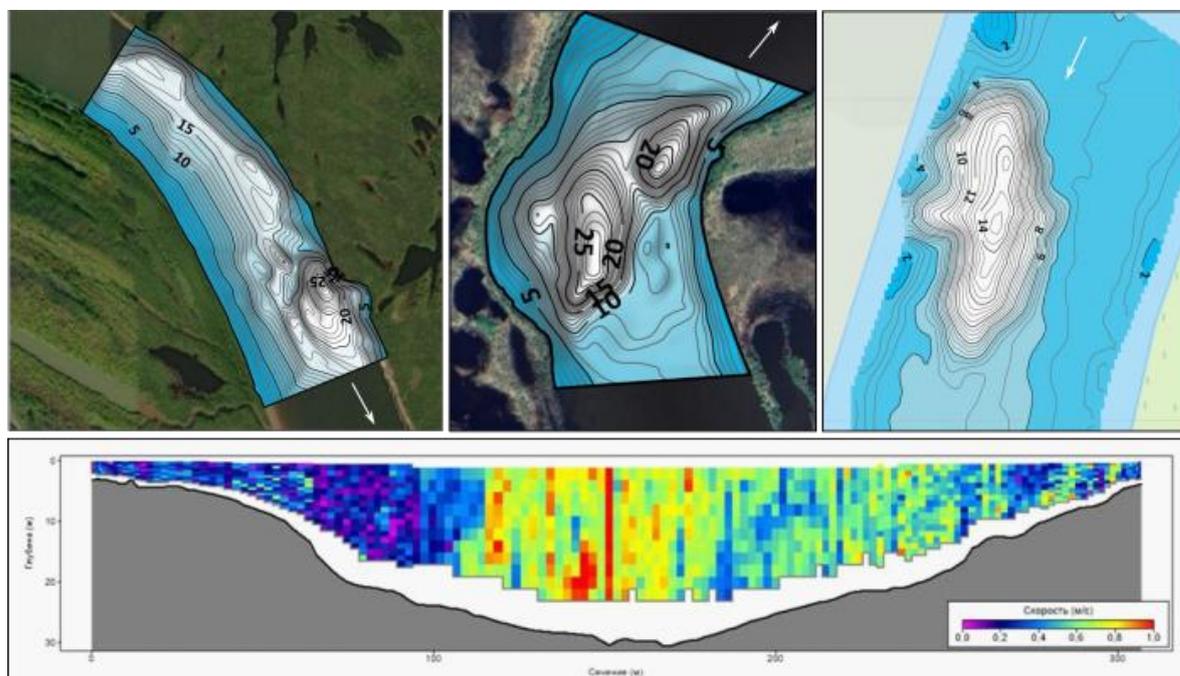


Рис. 4. Батиметрия, предположительно, наиболее молодых из обследованных ям (сверху) и характерное распределение скоростей по поперечному сечению ямы в половодье (снизу)

Измерения скоростей течения показали, что вне зависимости от размеров и положения ям в половодье в них формируются вихревые явления с горизонтальными и вертикальными составляющими скоростей до 1,5 м/с и 0,4 м/с, соответственно. На ямах округлой формы вихри с меньшими скоростями наблюдаются и в меженный период. Формирование таких вихрей приводит к полному перемешиванию воды, о чем свидетельствуют одинаковая электропроводность и температура в придонном и поверхностном слоях воды, а повышенная мутность у дна относительно поверхности является показателем размыва и выноса мелкой фракции, накапливающейся в придонных частях ям. При этом, сопоставление (с приводкой уровней по гидрологическим постам и геодезическим измерениям уклонов) детальных промеров 2024 года, эпизодических измерений 2021-2022 годов и лоцманских карт 1977, 1993 и 2022 годов показало, что максимальные глубины в ямах на одних и тех же точках различаются в пределах 2-5 метров, что говорит о циклическом процессе их занесения и углубления в зависимости от фазы режима и водности отдельных лет.

При отборе проб донного грунта было обнаружено повсеместное наличие на дне русла глинистой корки различной плотности и цвета толщиной в несколько сантиметров, с детритом и следами циклического смерзания, иногда оторфованной. Выше отдельно расположенных ям данный слой слагает русло по всей его ширине. В верхней части участка этой слой не обнаруживается, будучи скрытым под толщей песка, при движении вниз по течению с уменьшением уклонов и удалением от источника наносов глинистая корка начинает встречаться чаще. Внутри ям преобладают суспендированные илистые отложения с различной долей песка, зачастую содержащие в себе небольшие фрагменты глинистой корки, аналогичной по структуре залегающей выше ям. Практически на всех участках грунт вне ям и на мелководных перемычках между ними имеет более плотную структуру, чем внутри ям.

Обсуждение результатов. Русло реки Анадырь и ее проток сформировалось в крайне специфических условиях, в связи с чем однозначно объяснить возникновение переуглубленных участков на данном этапе исследований затруднительно. Несмотря на доказанное наличие таликовой зоны [Некрасов, 1967], разгрузка подземных вод, отличающихся по электропроводности и температуре, на дне ям не обнаружена. Выполненное бурение на пойме показало, что мерзлота даже в августе наблюдается в пойменном грунте практически на межennom урезе воды, что говорит о минимальном отепляющем воздействии водной массы даже при затоплении поймы. Скорость движения грунтовых вод мала из-за незначительных уклонов, в связи с чем на отдельных неглубоких участках могли сформироваться жилы льда. При возникновении зон разрывных нарушений талик может быть проницаем через жилы и трещины, которые теоретически могут быть причинами аномальных глубин в русле при термическом воздействии речных вод.

Анализ рельефа впадины по ЦМР ArcticDEM и результаты расчистки склона террасы позволяют предположить первоначальное формирование выположенной поверхности за счет накопления сначала озерных осадков, а затем – аллювия различных фаций, после чего началось постепенное врезание современных элементов руслового комплекса. Несмотря на повсеместное промерзание грунта в пределах поймы, жильный лед в берегах реки и проток встречается только на отдельных останцах террас. Стенки активного размыва с выходами блоков пойменного ледогрунта также приурочены только к переуглубленным участкам. Неясным остается генезис глинистых прослоек – в расчистке террасы подобные слои обнаружены не были, что может свидетельствовать как об их формировании *in situ*, так и о их более древнем относительно надводной части террасы возрасте и вскрытии руслом при врезании реки.

Помимо основного русла реки и проток, ямы были выявлены и на крупных старицах, где они имеют достаточно большую глубину (17-25 метров). Несмотря на регулярное затопление при подъеме уровней, по-видимому, количества переносимых наносов недостаточно для быстрого заполнения ям как в старицах (где дно сложено органическим илом с большим количеством детрита), так и в русле, что свидетельствует о преимущественно русловом источнике материала, перекладывающегося и заполняющего ямы. По-видимому, основным источником наносов является подвижный песчано-илистый материал, на многих участках вскрывающийся под глинистой коркой.

Опрос местного населения и анализ космических снимков Sentinel показал, что ледовые явления на участке относительно неактивны. Осенью подо льдом при низких уровнях скапливается большое количество шуги, предположительно забивающей ямы и в отдельных местах приводящей к формированию внутриводного льда, лежащего на мелководные участки. При вскрытии заторы практически не наблюдаются, и лед либо тает на месте, либо за 1-2 дня выносится вниз по течению. Тем не менее, водоворотные явления над ямами при первых подвижках и росте расхода могут быть причиной формирования круглых выемок на берегах за счет механического воздействия шуги и обломков льда, вовлекаемых в вихри.

Таким образом, проведенные исследования позволяют со значительной долей уверенности подтвердить гидравлические условия, способствующие развитию и устойчивому состоянию ям, однако не позволяют установить первопричину их формирования. Измеренные концентрации метана как в ямах, так и на фоновых створах относительно невысоки и отражают скорее бассейновый его источник (таяние многолетнемерзлых пород). Тем не менее, некоторые признаки – например, обнаружение двух «свежих» ям правильной формы, отсутствующих на промерах и снимках предыдущих лет, с вертикальными невыполженными берегами на выемках – позволяют предполагать импульсный механизм их возникновения в ходе однократного события, которым вполне может являться выход метана. Способствовать его накоплению и последующему выходу может как большое количество органики в отложениях впадины, так и наличие источника солоноватых вод с преобладающим содержанием Na и Cl (подтверждающееся как данными наблюдений на гидрологических постах, так и анализом ионного состава отобранных в поле проб воды), под воздействием которых в отдельные наиболее низкие меженные периоды ионный состав остается натриево-хлористым даже к замыкающему створу разветвления. С учетом небольшого гипсометрического превышения участка над современной поверхностью моря (так, меженные отметки урезом на замыкающем створе составляют 8 м н.у.м., а дно отдельных ям находится на отметках 20 м ниже у.м.) нельзя исключать, что в определенные периоды впадина могла затапливаться в результате ингрессий морских вод. Это позволяет предполагать возможное наличие криопэггов и метановых гидратов под современной русловой сетью, нарушения которых приводят к выбросам газа. Подобный выброс наблюдался в реке Сеяха на полуострове Ямал, сформировав круглую воронку похожей морфометрии [Bogoyavlensky et al, 2021].

Закключение. Собранный материал представляет собой детальную базу данных по морфометрическим характеристикам уникальных форм русел – переуглубленных ям, в таком количестве описанных только для реки Анадырь. Полевые материалы на настоящем этапе интегрируются в гидродинамическую модель всего обследованного участка и позволят запустить и откалибровать ее. На основании моделирования планируется выполнить проверку гипотез, связанных с гидравлическими и ледовыми условиями формирования ям и выемок, и дать ответ на вопрос о причинах и механизмах их возникновения.

Финансирование. Работа выполняется в рамках проекта РНФ № 24-27-00149 «Морфодинамика русла реки Анадырь в условиях гидроклиматических изменений и мерзлотных процессов».

ЛИТЕРАТУРА

Некрасов И.А. Талики речных долин и закономерности их распространения на примере бассейна р. Анадырь. М.: Наука, 1967. 138 с.

Новейшие отложения и палеогеография плейстоцена Чукотки. М.: Наука, 1980. 285 с.

Школьный Д.И., Цыпленков А.С., Головлев П.П., Бахарева Е.И., Антонюк А.М. Особенности водного руслового режима реки Анадырь по результатам исследований 2020-2022 годов // Эрозионные, русловые и устьевые процессы: сборник статей. – М.: Ваш Формат, 2023. С. 137-143.

Beltaos S., Carter T., Prowse T. Morphology and genesis of deep scour holes in the Mackenzie Delta // Canadian Journal of Civil Engineering. 2011. Vol. 38. № 6. P. 638-649. doi: 10.1139/111-034.

Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Yakushev V., Sevastyanov V. Permanent Gas Emission from the Seyakha Crater of Gas Blowout, Yamal Peninsula, Russian Arctic // Energies. 2021. Vol. 14 (17). 5345. doi:10.3390/en14175345

Fassnacht S.R., Conly F.M. Persistence of a scour hole on the East Channel of the Mackenzie Delta, N.W.T. // Canadian Journal of Civil Engineering. 2000. Vol. 27. № 4. P. 798-804. doi: 10.1139/100-022

Lapointe M.F. Deep Scour Holes on the Bed of Mackenzie Delta Channels, NWT. Environment Canada, National Hydrology Research Institute, 1986.

Vasil'chuk Y.K., Vasil'chuk A.C. Ice wedges in the Mayn river valley and winter air paleotemperatures in the Southern Chukchi Peninsula at 38-12 Kyr BP // Earth's Cryosphere. 2017. Vol. 21. № 5. P. 24–35. doi: 10.21782/ec1560-7496-2017-5(24-35)

INVESTIGATIONS OF THE MORPHOLOGY OF DEEP SCOUR HOLES IN THE ANADYR RIVER WITHIN THE DEPRESSION OF THE GLACIER-DAMMED LAKE: FIRST FIELD RESULTS

Shkolnyi D.I.¹, Bakhareva E.I.¹, Semakov V.A.¹, Golovlev P.P.¹, Shukhvostov R.S.^{1,2}

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

In the course of studies of the hydrological regime of the Anadyr River (conducted since 2020 in its middle reaches, where the river forms a branched channel in the ancient rift basin, filled with sandy sediments of Pleistocene and Holocene glacier-dammed lakes), the existence of overdeepened areas – scour holes with depths up to 45 meters (at the highest water levels) was established in the river channel and its branches. Analysis of satellite imagery showed that at the site of each of the holes a characteristic niche of a regular arc-shaped form is observed on the channel banks. During the 2024 field season, depth were measured near all such niches within the branching channel, resulting in the localization of 239 scour holes within the study area. At the most prominent holes were conducted velocity measurements (during flooding and low flow periods), bottom deposits sampling and hydrochemical investigations to provide material for discussion of the various hypotheses for the origin of these riverbed forms. Reconnaissance geological work was also carried out, including terrace slope and ice wedge excavation, and drilling of the floodplain facies, which will clarify the scarce data available on sedimentation conditions in the area.

Keywords: *Anadyr, river scour hole, glacier-dammed lake depression, vortex zone, gas blowout crater*

REFERENCES:

Nekrasov I.A. Taliks in river valleys and patterns of their distribution (an example of Anadyr river basin). Moscow: Nauka, 1967. 138 p.

Shkolnyi D.I., Tsyplenkov A.S., Golovlev P.P., Bakhareva E.I., Antoniuk A.M. Features of the water channel regime of the Anadyr River (results of 2020-2022 researches) // Erosion, channel and estuarine processes: a collection of articles. Moscow: Your Format, 2023. Pp. 137-143.

The Recent Deposits and Paleogeography of the Pleistocene in the Chukotka Peninsula. Moscow: Nauka, 1980. 285 p.

Beltaos S., Carter T., Prowse T. Morphology and genesis of deep scour holes in the Mackenzie Delta // Canadian Journal of Civil Engineering. 2011. Vol. 38. № 6. P. 638-649. doi: 10.1139/111-034.

Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Yakushev V., Sevastyanov V. Permanent Gas Emission from the Seyakha Crater of Gas Blowout, Yamal Peninsula, Russian Arctic // Energies. 2021. Vol. 14 (17). 5345. doi:10.3390/en14175345

Fassnacht S.R., Conly F.M. Persistence of a scour hole on the East Channel of the Mackenzie Delta, N.W.T. // Canadian Journal of Civil Engineering. 2000. Vol. 27. № 4. P. 798-804. doi: 10.1139/100-022.

Lapointe M.F. Deep Scour Holes on the Bed of Mackenzie Delta Channels, NWT. Environment Canada, National Hydrology Research Institute, 1986.

Vasil'chuk Y.K., Vasil'chuk A.C. Ice wedges in the Mayn river valley and winter air paleotemperatures in the Southern Chukchi Peninsula at 38-12 Kyr BP // Earth's Cryosphere. 2017. Vol. 21. № 5. P. 24–35. doi: 10.21782/ec1560-7496-2017-5(24-35)