

Исследования морфологии и генетики веслоногих раков (Copepoda) в зонах теплового загрязнения рек Республики Коми

Е. Б. ФЕФИЛОВА, Е. Е. РАСОВА, И. О. ВЕЛЕГЖАНИНОВ

Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28
E-mail: fefilova@ib.komisc.ru

Статья поступила 27.04.2021

После доработки 14.05.2021

Принята к печати 17.05.2021

АННОТАЦИЯ

В 2018–2020 гг. в реках Вычегда и Сысола регистрировали новые для Республики Коми и всего Европейского Севера виды веслоногих раков: *Elaphoidella bidens* (Schmeil), *Phyllognathopus viguieri* (Maupas), *Paracyclops imminutus* Kiefer. Все эти виды были найдены исключительно в зонах слива сточных вод лесоперерабатывающего предприятия или городских стоков Сыктывкара. Анализ найденных особей показал их морфологическое сходство с типовыми описаниями, только у *P. viguieri* из р. Сысола обнаружены особенности в строении фурки, которые отличали его от типовой формы. В результате молекулярно-генетических исследований определено, что нативный для Вычегдского бассейна рачок *Attheyella crassa* (Sars G. O.) идентичен по структуре мтДНК-COI особям этого вида из Московской области, тогда как вычегдская *E. bidens* из зоны влияния очищенных сточных вод целлюлозно-бумажного производства отличалась от представителей вида из Московской области на 14 % и была близка *E. bidens* из Новой Зеландии. Такая особенность генетической характеристики вычегдской популяции *E. bidens* косвенно подтверждает, что механизм вселения вида в новое местообитание связан со сточными водами. Обнаруженные новые для Республики Коми виды веслоногих раков представляют в регионе исследований факультативно синантропную фауну, способную к развитию лишь на урбанизированных территориях.

Ключевые слова: Naupacticoida, Cyclopoida, мтДНК-COI, морфология, донная фауна, река Вычегда, сточные воды.

Урбанизация и промышленная деятельность могут способствовать расселению и быстрому распространению мелких водных беспозвоночных, стиранию биогеографических барьеров и изменению регионального биоразнообразия гидроекосистем [Rahel, 2007; Жирков, 2017]. Среди веслоногих раков отрядов Naupacticoida и Cyclopoida более 90 видов обнаружено в водопроводных трубах,

фильтрах, различных контейнерах для воды, искусственных дренажах и прочих техногенных местообитаниях [Reid, 2001]. Эти виды не специфичны для искусственных биотопов, но обычны для природных интерстициальных, полуназемных экосистем, рек и озер, где встречаются в пределах своих исторических ареалов [Боруцкий, 1952; Алексеев, 2010]. Очевидно, что, преодолев большие рас-

стояния посредством антропогенного переноса, они способны выживать и образовывать устойчивые популяции в месте вселения лишь при определенных условиях новой среды обитания [Hewitt, 2004]. В 2018 г. в р. Вычегда был впервые для Республики Коми зарегистрирован [Фефилова, 2020] вид гарпактикоиды *Elaphoidella bidens* (Schmeil). Одна особь найдена в зоне сброса условно чистых сточных вод АО “Монди СЛПК”, т. е. за пределами его основного ареала – тропики, субтропики, а также умеренная область, где он встречается только в глубоких озерах. Повторные исследования состава зообентоса на этом участке р. Вычегда [Батурина и др., 2021] показали, что находка здесь *E. bidens* была следствием не одновременного случайного заноса: в 2020 г. вид был обнаружен в большем количестве. Совместно с ним в пробах присутствовали довольно редкие бентические веслоногие раки вида *Paracyclops imminutus* Kiefer (Cyclozoidea). В р. Сысола в черте города и под сливной трубой также впервые для Вычегодского бассейна, Республики Коми и всего Европейского Севера найдена гарпактикоида *Phyllognatopus viguieri* (Maupas). Все новые для региона исследований виды копепоид были найдены в зонах теплового загрязнения рек [Елсаков, Щанов, 2016].

Известно, что многие широко распространенные таксоны на самом деле представляют комплексы географически ограниченных форм, некоторые из них найдены в особых местообитаниях, к которым адаптированы [Чернов, 1991]. Поэтому существует необходи-

мость внимательного морфологического анализа и молекулярно-генетических исследований новых для регионов видов, оценка уровня их изменчивости.

Цель настоящей работы – изучение особенностей морфологии и молекулярно-генетический анализ новых для Республики Коми видов ракообразных, сравнение их по внешнему строению и генетическому маркеру с представителями популяций из других регионов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для исследований послужили особи четырех видов веслоногих раков (Harpacticoida и Cyclozoidea) из проб зообентоса и фаунистических сборов из рек Вычегда, Сысола (Республика Коми), оз. Глубокое (Московская обл.) и оз. Пааярви (Финляндия) (таблица). На р. Вычегда материал был собран в одном пункте, расположенном в месте сброса очищенных сточных вод АО “Монди СЛПК” (п. I на карте-схеме в [Патова, Кондратёнок, 2021]). На р. Сысола пробы собрали под трубой, сбрасывающей бытовые стоки г. Сыктывкара. Из озер пробы получены в результате сборов на литорали.

Все исследованные водные объекты расположены в таежной зоне, в умеренном поясе, по крайней мере, большая часть их поверхности зимой покрыта льдом. Физико-химические условия, при которых собирали материал из р. Вычегда в летние периоды, описаны в [Патова, Кондратёнок, 2021].

Описание материала для исследований

Место сбора	Географические координаты	Дата	Материал для морфологических исследований	Материал для генетических исследований
р. Вычегда	61°48'56,7" с. ш., 50°45'09,8" в. д.	21.07.2020	14 ♀♀: <i>Elaphoidella bidens</i>	
		25.09.2020	2 ♀♀: <i>E. bidens</i>	3 ♀♀: <i>E. bidens</i> , 1 ♀: <i>Attheyella crassa</i>
		23.07.2018, 17.07.2019	5 ♀♀: <i>Paracyclops imminutus</i>	
р. Сысола	61°38'52,26" с. ш., 50°50'2,05" в. д.	21.03.2019	5 ♀♀: <i>Phyllognatopus viguieri</i>	
оз. Глубокое	55°45'11" с. ш., 36°30'18" в. д.	29.08.2020	2 ♀♀: <i>E. bidens</i>	6 ♀♀: <i>E. bidens</i> , 1 ♂: <i>A. crassa</i>
		4.08.2013	2 ♀♀: <i>E. bidens</i>	
оз. Пааярви	61°04'59" с. ш., 25°01'00" в. д.	июнь 2017		1 ♀: <i>E. bidens</i>

Осенью, согласно нашим измерениям, температура воды в месте отбора проб на р. Вычегда составляла 9,8 °С, на контрольной станции, расположенной выше сточной трубы, – 7,5 °С. Температура воды в р. Сысола в месте сбора материала 21 марта 2019 г. составляла 8,0 °С, ледовое покрытие на этом участке реки отсутствовало.

В июле 2018–2020 гг. из р. Вычегда собраны количественные пробы зообентоса с помощью гидробиологического скребка с длиной лезвия 30 см. Фаунистические сборы (из р. Вычегда в сентябре, из р. Сысола и озер) осуществляли с применением того же гидробиологического скребка или небольшого сачка из капронового сита. Все пробы концентрировали, промывая их в полевых условиях через капроновое сито с размером ячеек 158 мкм. После этого количественные пробы зообентоса сразу фиксировали 4%-м раствором формальдегида. Остальной материал просматривали в лаборатории без фиксации, выбирали копепод и помещали их в 96%-й этиловый спирт.

Исследования морфологии рачков проводили под микроскопом Leica DM 4000 B. Анализировали строение антеннул, антен, торакальных (P1–P5) и околоротовых конечностей, фурки (каудальных ветвей). Вооружение экзоподитов и эндоподитов P2–P4 учитывалось с применением формулы: P2: a, b, c; P3: a, b, c; P4: a, b, c, где a, b и c – число придатков на последних члениках, считая от внутреннего края [Боруцкий, 1952]. Для идентификации видов использовали определители и описания [Lang, 1948; Боруцкий, 1952; Алексеев, 2010; Galassi et al., 2011]. Рисунки выполняли с помощью рисовального устройства, фотографии – с использованием камеры ASUS Phone ZE 520KL при увеличении в 1000 раз. Рисунки и фотографии обрабатывали в программах Adobe Photoshop CS3 Extended и Xara Photo & Graphic Designer 6.

Для анализа генетического разнообразия гарпактикоид использовали фрагмент гена первой субъединицы цитохромоксидазы митохондриальной ДНК (COI). Выделение ДНК проводили с помощью хелатирующей ионообменной смолы Chelex 100: образцы рачков помещали в 10 мкл 6 % раствора Chelex 100, добавляли протеиназу-К и инкубировали в течение 30 мин при 55 °С, затем в течение 15 мин

при 99 °С. Амплификацию фрагментов гена COI проводили с использованием высокоточной полимеразы в наборе Tersus Plus PCR Kit (“Евроген”, Россия) на приборе T100 Thermal Cycler (BioRad, США) в ЦКП “Молекулярная биология” Института биологии Коми НЦ УрО РАН. При проведении ПЦР использовали универсальные праймеры: COIH 2198 (5' TAAACTTCAGGGTGACCAAAAAATCA 3') и COIL 1490 (5' GGTCAACAAATCATAAAGA TATTGG 3') [Folmer et al., 1994]. Реакцию проводили в следующем режиме: начальная денатурация – 5 мин при 94 °С, следующие пять циклов по схеме: 90 °С (30 с), 45 °С (60 с), 72 °С (90 с); затем 27 циклов по схеме: 90 °С (30 с), 55 °С (45 с), 72 °С (60 с); конечная элонгация – 5 мин при 72 °С. ПЦР-продукты разделяли методом гель-электрофореза в 1%-м агарозном геле с бромистым этидием (2 мкг/мл). Для детекции фрагментов ДНК использовали трансиллюминатор UVT-1 (“Биоком”, Россия). Маркером длины фрагментов ДНК служил 100 bp Ladder DNA marker (100 bp–3000 bp) (Thermo Fisher Scientific, США). Очистка ПЦР-продуктов из геля проводилась набором Cleanup Standard (“Евроген”, Россия). Секвенирование образцов ДНК осуществлялось в ЦКП “Геном” Института молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН. Полученные нуклеотидные последовательности выравнивали с применением алгоритма ClustalW и анализировали в программном пакете Mega 6.0. Филогенетическое древо с расчетом бутстреп-поддержек узлов ветвления (1000 репликаций) строилось по алгоритму UPGMA с применением трехпараметрической модели Тамуры [Tamura, Nei, 1993].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Гарпактикоида *Elaphoidella bidens* обнаружена в количественных пробах зообентоса из р. Вычегда в 2018 и 2020 гг. В 2018 г. численность вида составляла 11,1 экз./м², в 2020 г. – 155,4 экз./м². В июле 2020 г. в пробе присутствовали самки с яйцевыми мешками *E. bidens*. *Paracyclops imminutus* встречался в р. Вычегда во все годы исследований. Его численность составляла от 44,4 экз./м² (в 2018 г.) до 2739,9 экз./м² (в 2020 г.). Во все годы в пробах регистрировали самок с яйцевыми мешками этого вида.

Морфологический анализ. Исследованные гарпактикоиды из р. Вычегда по фенотипу соответствовали двум видам: *Elaphoidella bidens* и *Attheyella crassa* (Sars G. O.). Во внешнем строении этих особей не было отмечено каких-либо отклонений, аномалий. По строению антенн и антеннул, фурки, околоротовых и плавательных конечностей особи *E. bidens* из р. Вычегда были сходны с таковыми из оз. Глубокого. Количество придатков на конечных члениках экзоподитов плавательных ног у этого вида соответствовало формуле: P2: 1, 2, 2; P3: 2, 2, 2; P4: 2, 2, 2, эндоподитов – P2: 2, 3, 0; P3: 3, 3, 0; P4: 2, 2, 0.

Найденные в р. Сысола самки *Phyllognathopus viguieri* по совокупности диагностических признаков не отличались от описаний в использованных ключах и определителях: они имели 8-члениковые антенны, 1-члениковый экзоподит антенн, вооруженный 5 щетинками, 3-члениковые экзо- и эндоподиты торакальных конечностей первой – третьей пары и 2-члениковый экзоподит четвертой пары ног, характерное строение и вооружение каудальных ветвей (рис. 1, а–в) и пятой пары конечностей (см. рис. 1, в). Некоторые особенности замечены у проанализированных нами особей в строении ног пятой пары (P5) и каудальных щетинок: наиболее длинная апикальная щетинка была не полностью расщеплена в средней части (см. рис. 1, а–в), ряд шипиков на спинной поверхности каудальных ветвей был недоразвит (см. рис. 1, а, б), а внутренний (самый толстый) шип на базисэндоподите P5 был длиннее остальных шипов этой конечности (см. рис. 1, в).

Обнаруженные в р. Вычегда *Paracyclops imminutus* хорошо отличались от других представителей этого рода по специфичным для вида признакам: поверхность спинной стороны и внутренний край каудальных ветвей были неровными, покрыты рядами ямок (рис. 2, г), на базисподите антенн отсутствовала группа шипиков у основания двух щетинок (рис. 2, д, е).

Молекулярно-генетический анализ. Всего получено 9 нуклеотидных последовательностей участка гена COI длиной 550 пар нуклеотидов для особей *E. bidens* из р. Вычегда и оз. Глубокого. Последовательности содержали 80 полиморфных сайтов, среди которых 69 – парсимониально информативных. Также были

отсеквенированы, но не отражены на древе одна особь *E. bidens* из оз. Пааярви и две особи *A. crassa*. Полученные нуклеотидные последовательности были депонированы в базу данных GenBank (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/>) под номерами: MW851202-MW851211, MW844032, MW844033.

В результате генетического анализа *Elaphoidella bidens* получены две клады с высокой степенью поддержки устойчивости ветвей, в одну из которых объединились особи из р. Вычегда, в другую – из оз. Глубокого (см. рис. 2). Генетическая дистанция между выявленными кладами (методом Тамура – Ней) составила 0,14. Разнообразие между особями внутри выделенных групп было низким: генетическая дистанция не превышала 0,01. Близкое родство обнаружено между *E. bidens* каждой из обследованных популяций с особями этого вида из Новой Зеландии, которые, соответственно, разделились на две группы: близкородственную вычегодским рачкам и гарпактикоидам из оз. Глубокого.

В кладу с особями *E. bidens* из оз. Глубокого вошел также один образец из оз. Пааярви (Финляндия), но так как полученная последовательность по техническим причинам была короче остальных, она не включена в древо, представленное на рис. 2.

Среди гарпактикоид, обнаруженных в месте сброса очищенных сточных вод АО “Монди СЛПК” (р. Вычегда), найдена одна особь вида *A. crassa*. Она была использована для генетического анализа вместе с особью того же вида из оз. Глубокого. Ранее было показано, что различные популяции *A. crassa* в европейской части континента на основании последовательности гена COI подразделяются на две группы [Kochanova, Gaviria, 2018]. В одну из групп вошли особи, пойманные в водах оз. Венерн (Швеция), Ньючимского водохранилища (Республика Коми), дельты р. Печоры (Ненецкий автономный округ), руч. Каркалай (Удмуртия), оз. Нарочь (Беларусь), в другую – особи из оз. Согнсванн (Норвегия) и оз. Женева (Швейцария). Представители обеих генетических групп обитают в Рыбинском водохранилище [Kochanova, Gaviria, 2018]. Анализ последовательности COI особей из р. Вычегда и оз. Глубокого, найденных в настоящем исследовании, свидетельству-

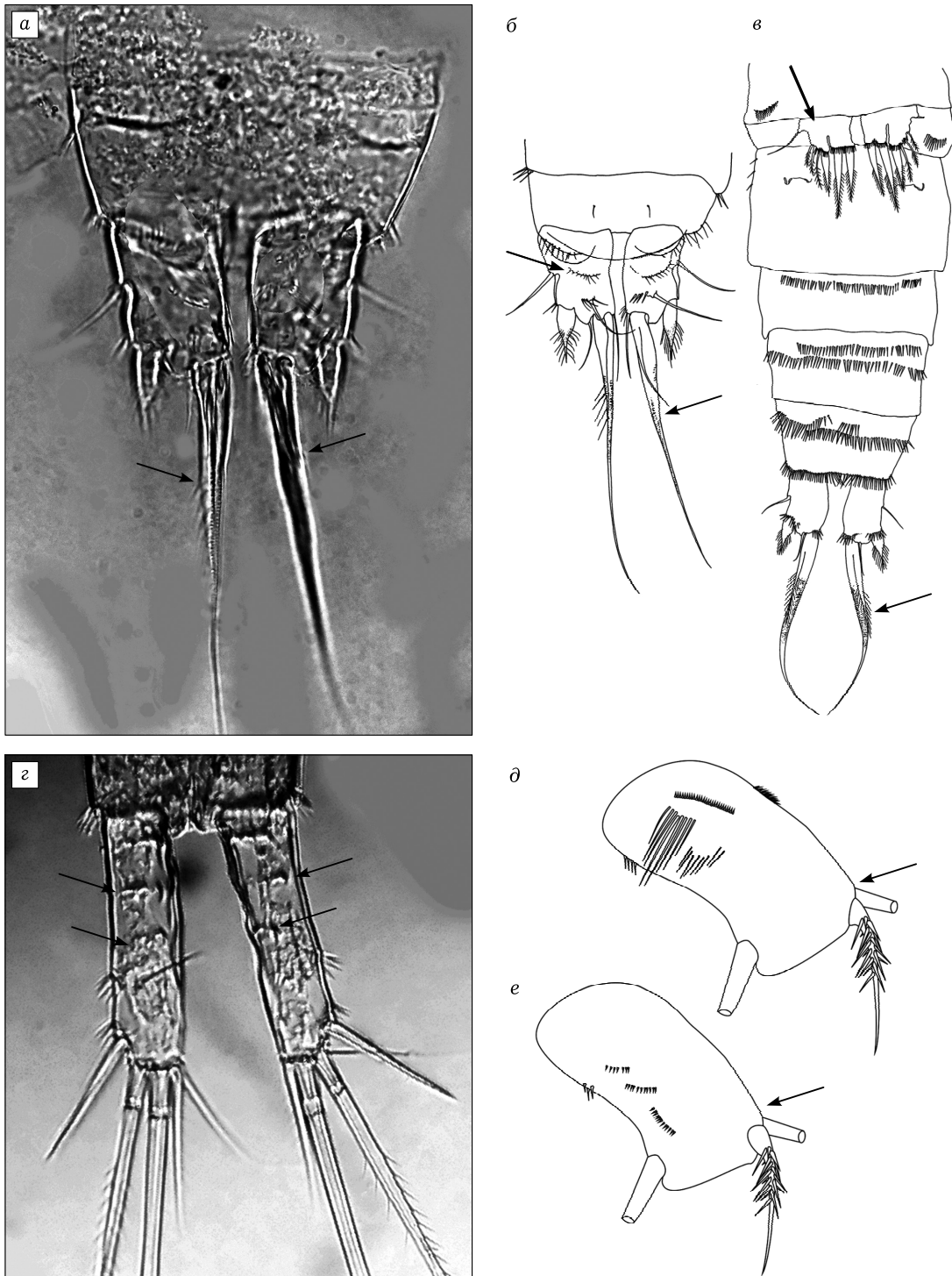


Рис. 1. Особенности морфологии *Phyllognatopus viguieri* (a–в) и *Parascyclops imminutus* (г–е) из рек Сысола и Вычегда, 2019 г.

a, г – фурка дорсально; в – abdomen вентрально; д – базиподит антенны, фронтальная сторона; е – базиподит антенны, каудальная сторона. Стрелками показаны особенности строения (описание в тексте).

ет о том, что генетически они ближе к первой из указанных групп и на филогенетиче-

ском древе объединяются с ними в одну кладу (не представлено).

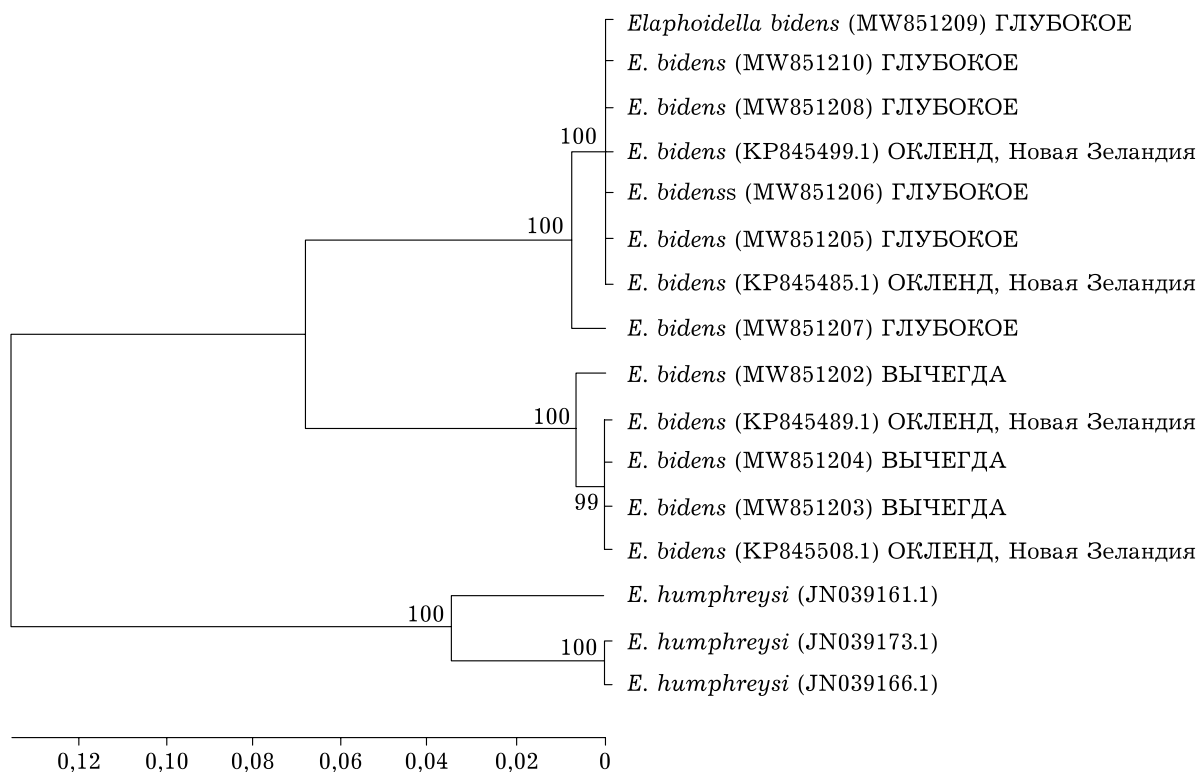


Рис. 2. Филогенетическое древо исследованных особей *Elaphoidella bidens*, построенное по данным секвенирования нуклеотидных последовательностей участка гена COI (550 пар оснований). В качестве внешней группы использованы сиквенсы COI мтДНК *Elaphoidella humphreysi* Karanovic. В скобках указаны регистрационные номера последовательностей в GenBank

ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее высказано предположение [Фефилова, 2020], что сточные воды не только создают условия для формирования в р. Вычегда сообществ с измененной структурой, но и являются источником новых для региональной фауны видов, например *Elaphoidella bidens*. Настоящие исследования добавили данные, поддерживающие это предположение. Показано, что морфологически и генетически однородная популяция этого вида и популяция *Paracyclops imminutus* устойчиво существуют и размножаются лишь на небольшом участке реки, в зоне непосредственного влияния очищенных сточных вод АО “Монди СЛПК”. На других станциях р. Вычегда, обследованных в 2018–2020 гг., эти виды в составе зообентоса отсутствовали [Батурина и др., 2021], несмотря на то что отепляющее влияние урбанизированных территорий на речные воды в среднем течении р. Вычегда распространено достаточно широко [Елсаков, Щанов, 2016]. Генетическая близость вычегдской клады *E. bidens* к рачкам из Новой Зеландии и от-

носительная генетическая однородность их общей группы, на наш взгляд, с большей вероятностью позволяет связать ее происхождение со стоками АО “Монди СЛПК”, состав биоты которых неизвестен. Данные по морфологии новозеландских особей, чей генетический материал был использован для исследований, отсутствуют. Однако новозеландские особи из обеих клад идентифицированы ранее как *E. bidens* [Watson et al., 2015], вид достаточно обычный как в крупных, так и в заболоченных мелких водоемах северной части архипелага [Lewis, 1972]. Сравнение с подробным описанием обитающей в Новой Зеландии *E. bidens* [Lewis, 1972] не оставляет сомнений в том, что в этом регионе присутствуют рачки, по основным признакам идентичные исследованным нами. По особенностям строения торакальных конечностей особи из р. Вычегда, Новой Зеландии и оз. Глубокого относятся к *E. bidens coronata*. Согласно [Lang, 1948], эта форма широко распространена в Европе, Северной и Южной Америке, Азии, где встречается, в том числе, в термальных во-

дах [Reid, 2001], обычна для тропического и субтропического пояса [Fefilova, Alekseev, 2018]. Как показали наши и ранее полученные данные, она генетически неоднородна и представлена, по меньшей мере, двумя группами, географически разобщенными или присутствующими совместно. Так, местом сбора новозеландских рачков, использованных в нашем исследовании, был ботанический сад Окленда, где представители обеих клад присутствовали в одной пробе из ручья [Watson et al., 2015]. Генетическое расстояние между гаплотипами *E. bidens*, согласно анализу авторов этих сборов, составляло >11 %.

В противоположность вычегодским *E. bidens*, найденные в этом же пункте отбора особи *Attheyella crassa* генетически не отличались от рачков этого вида из Республики Коми и других областей Европейского Севера, что косвенно указывает на естественное (не связанное с антропогенным заносом) происхождение популяции этого вида, в целом широко представленного в Вычегодском бассейне [Фефилова, 2015].

Гидротехнические сооружения и сточные воды могли быть источником других обнаруженных нами новых для Вычегодского бассейна веслоногих раков. Ранее эти виды были отмечены в очистных сооружениях Санкт-Петербургского водопровода (*Paracyclops imminutus*) [Алексеев, 2010] или водопроводных фильтрах (в Западной Европе, *Phyllognatopus viguieri*) [Reid, 2001]. Нативными местообитаниями *P. imminutus* являются подземные биотопы севера Европы [Алексеев, 2010]; *P. viguieri* широко распространен в тропиках и субтропиках, где встречается как в мелких водоемах, так и в пазухах листьев растений, чаще семейства Bromeliaceae [Reid, 2001; Galassi et al., 2011; Fefilova, Alekseev, 2018]. Эту гарпактикоиду часто находят в аквариумах с декоративными рыбами [Galassi et al., 2011], коммерческое распространение которых, как известно [Padilla, Williams, 2004], является одним из глобальных механизмов биологических инвазий водных растений и беспозвоночных. Для *P. viguieri* установлена беспрецедентная способность к выживанию в экстремальных условиях – спиртовых пробах кишечников рыб [Capezzuto et al., 2019], что, безусловно, способствует широкому распространению вида, в том числе в аквариумных сообществах, раз-

личных техногенных биотопах и связанных с ними сточных водах. Субтропическое, тропическое происхождение *P. viguieri* определяет его температурные требования (теплолюбивость) и, вероятно, пищевые предпочтения. Согласно [Lehman, Reid, 1993], *P. viguieri* способен к хищничеству – питается водными нематодами. В р. Сысола он существовал в сообществе, богатом этими червями, что, следовательно, согласуется с известной биологической характеристикой вида – его связью с этой группой. Несмотря на большое сходство обнаруженных нами особей *P. viguieri* с типовым описанием вида [Galassi et al., 2011], рачки из р. Сысола имели незначительные отличительные особенности в строении интегумента каудальных ветвей и наиболее длинной апикальной щетинки на них – она была неполностью расщеплена в средней части. Вероятно, такая морфологическая особенность присуща виду как форма изменчивости, возможно, что в антропогенных биотопах или при недавних вселениях в новые местообитания, как это было зафиксировано для *P. viguieri*, найденных в Турции [Bozkurt, 2007].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Происхождение обнаруженных в черте г. Сыктывкара в реках Сысола и Вычегда впервые для Республики Коми видов веслоногих раков, по нашему мнению, было антропогенным. Достаточно теплолюбивые виды были внесены со сточными водами в северные реки, где образовали жизнеспособные популяции, существование которых поддерживалось, тем не менее, лишь на ограниченных участках с повышенной температурой воды и отсутствием ледостава в течение всего холодного периода. Таким образом, гарпактикоиды *Elaphoidella bidens*, *Phyllognatopus viguieri* и циклопоида *Paracyclops imminutus* проявляли себя как факультативные синантропы – организмы, чье развитие на Севере возможно только на урбанизированных территориях. Молекулярно-генетический и детальный морфологический анализы подтвердили таксономическую принадлежность этих широко распространенных, но редких для региона исследований веслоногих раков, и установили их слабую внутривидовую изменчивость.

Мы благодарим Н. М. Коровчинского, научного руководителя Гидробиологической станции “Глубокое озеро” ИПЭЭ РАН, за предоставленную возможность собрать материал из оз. Глубокое, Л. Арвола (L. Arvola), заведующего Биологической станцией Ламми Хельсинского университета (Lammi Biological Station of Helsinki University) за предоставленную возможность получить пробы из оз. Пааярви и М. А. Батурину за помощь в сборе материала из рек Вычегда и Сысола.

Исследование выполнено в рамках темы Государственного задания № АААА-А17-117112850235-2, сбор материала из р. Вычегда и генетический анализ особей – при финансовой поддержке проекта “Оценка долговременного влияния АО “Монди СЛПК” (договор № 45-2018/180405).

ЛИТЕРАТУРА

- Алексеев В. Р. Циклопиды (Cyclopiformes) // Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. М., СПб.: Т-во науч. изд. КМК, 2010. С. 328–376.
- Батурина М. А., Фефилова Е. Б., Лоскутова О. А. Состояние бентосных сообществ в условиях влияния очищенных сточных вод целлюлозно-бумажного производства // Сиб. экол. журн. 2021. Т. 28, наст. вып. С. 723–735. doi: 10.15372/SEJ20210604
- Боруцкий Е. В. Harpacticoida пресных вод. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1952. 425 с. (Фауна СССР. Т. 3, вып. 4. Ракообразные).
- Елсаков В. В., Щанов В. М. Спутниковые методы в анализе изменений экосистем бассейна р. Вычегда // Соверш. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, N 4. С. 135–145.
- Жирков И. А. Биогеография. Общая и частная: суши, моря и континентальных водоемов. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2017. 319 с.
- Патова Е. Н., Кондратёнок Б. М., Сивков М. Д., Кострова С. Н. Качество вод реки Вычегда в условиях поступления очищенных сточных вод целлюлозно-бумажного производства // Сиб. экол. журн. 2021. Т. 28, наст. вып. С. 696–714. doi: 10.15372/SEJ20210602
- Фефилова Е. Б. Веслоногие раки (Copepoda). М.: Т-во науч. изд. КМК, 2015. 319 с. (Фауна европейского Северо-Востока России. Т. XII).
- Фефилова Е. Б. Находка теплолюбивого вида гарпактикоиды *Elaphoidella bidens* (Schmeil 1893) в р. Вычегда (бассейн Северной Двины Белого моря) // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология. 2020. doi: 10.17516/1997-1389-0319
- Чернов Ю. И. Биологическое разнообразие: сущность и проблемы // Успехи соврем. биологии. 1991. Т. 111, № 4. С. 499–507.
- Bozkurt A. Two new records of harpacticoid copepods for Turkish inland waters (Copepoda, Harpacticoida) *Phyllognathopus viguieri* (Maupas, 1892) and *Leptocaris brevicornis* (Van Douwe, 1904) // Crustaceana. 2007. Vol. 80, N 9. P. 1033–1042.
- Capezzuto F., Galassi D. M. P., Ancona F., Maiorano P., D’Onghia G. How far may life venture? Observations on the harpacticoid copepod *Phyllognathopus viguieri* under extreme stress conditions // Aquat. Ecol. 2019. Vol. 53, Is. 4. P. 629–637. doi: 10.1007/s10452-019-09713-4
- Fefilova E. B., Alekseev V. R. A new species and new records of harpacticoids (Crustacea: Copepoda: Harpacticoida) from North-Eastern Borneo // Zoosystematica Rossica. 2018. Vol. 27, N 2. P. 205–217. doi: 10.31610/zsr/2018.27.2.205
- Folmer O., Black M., Hoeh W., Lutz R., Vrijenhoek R. C. DNA primers for amplification of mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I from diverse metazoan invertebrates // Mol. Mar. Biol. Biotech. 1994. Vol. 3. P. 294–299.
- Galassi D. M. P., De Laurentiis P., Fiasca B. Systematics of the Phyllognathopodidae (Copepoda, Harpacticoida): re-examination of *Phyllognathopus viguieri* (Maupas, 1892) and *Parbatocamptus jochenmartensi* Dumont and Maas, 1988, proposal of a new genus for *Phyllognathopus bassoti* Rouch, 1972, and description of a new species of *Phyllognathopus* // ZooKeys. 2011. Vol. 104. P. 1–65. doi: 10.3897/zookeys.104.763
- Hewitt G. M. Genetic consequences of climatic oscillations in the Quaternary // Philosophical Transactions of The Royal Society B Biol. Sci. 2004. Vol. 359, N 1442. P. 183–195. doi: 10.1098/rstb.2003.1388
- Kochanova E. S., Gaviria S. Integrative taxonomy of the freshwater harpacticoid *Attheyella crassa* G. O. Sars, 1863 (Crustacea: Copepoda: Canthocamptidae) in the Palearctic region // Invert. Zool. 2018. Vol. 15, N 3. P. 267–276. doi: 10.15298/invertzool.15.3.05
- Lang K. Monographie der Harpacticiden. Stockholm: A-B Nordiska Bokhandeln, 1948. 1682 p.
- Lehman P. S., Reid J. W. *Phyllognathopus viguieri* (Maupas, 1892), a Predaceous Copepod of Phytoparasitic, Entomopathogenic, and Free-Living Nematodes // Soil and Crop Sci. Soc. of Florida Proc. 1993. Vol. 52. P. 78–82.
- Lewis M. H. Freshwater harpacticoid copepods of New Zealand. 1. *Attheyella* and *Elaphoidella* (Canthocamptidae) // N. Z. Journal of Marine and Freshwater Research. 1972. Vol. 6 (1 & 2). P. 23–47.
- Padilla D. K., Williams S. L. Beyond ballast water: aquarium and ornamental trades as sources of invasive species in aquatic ecosystems // Front Ecol. Environ. 2004. Vol. 2, N 3. P. 131–138.
- Rahel F. J. Biogeographic barriers, connectivity and homogenization of freshwater faunas: it’s a small world after all // Freshwater Biol. 2007. Vol. 52. P. 696–710. doi: 10.1111/j.1365-2427.2006.01708.x
- Reid J. W. A human challenge: discovering and understanding continental copepod habitats // Hydrobiologia. 2001. Vol. 453. P. 201–226.
- Tamura K., Nei M. Estimation of the number of nucleotide substitutions in the control region of mitochondrial DNA in humans and chimpanzees // Mol. Biol. Evol. 1993. Vol. 10. P. 512–526.
- Watson N. T. N., Duggan I. C., Hogg I. D. Assessing the diversity of New Zealand freshwater harpacticoid copepods (Crustacea: Copepoda) using mitochondrial DNA (COI) barcodes // New Zealand Journal of Zoology. 2015. Vol. 42, N 2. P. 57–67. doi: 10.1080/03014223.2015.1011592

Morphological and genetic studies of copepods (Copepoda) of zones of the Komi Republic Rivers effected of thermal pollution

E. B. FEFILOVA, E. E. RASOVA, I. O. VELEGZHANINOV

*Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the UB of the RAS
167982, Syktyvkar, Kommunisticheskaya str., 28
E-mail: fefilova@ib.komisc.ru*

In 2018–2020. we identified in Vychegda and Sysola Rivers new for the Komi Republic and the entire Northern Europe species of copepods: *Elaphoidella bidens*, *Phyllognatopus viguieri*, *Paracyclops imminutus*. All of these species were found exclusively in the areas of wastewater discharge of a timber processing company or urban wastewater of the city of Syktyvkar. The analysis of the identified specimens showed their morphological similarity with the type descriptions, only in *P. viguieri* from Sysola River we found certain features in the structure of the furca which distinguished it from the type form. As a result of molecular genetic studies, we determined that the crustacean *Attheyella crassa* native to the Vychegda basin is identical in the structure of mtDNA-COI to specimens of this species from the Moscow Oblast, while *E. bidens* from the zone of influence of wastewaters of a pulp and paper production company in the Vychegda basin differed from representatives of the species from the Moscow Oblast by 14 % and was similar to *E. bidens* from New Zealand. This characteristic feature of the Vychegda population of *E. bidens* indirectly confirms that the mechanism of invasion of the species into a new habitat is associated with wastewater. The identified species of copepod crayfish which are new for the Komi Republic represent a facultative synanthropic fauna in the study region that is capable of development only in urbanized areas.

Key words: Harpacticoida, Cyclopoida, mt-DNA COI, morphology, bottom fauna, the Vychegda River, wastewaters.