

North-Eastern Federal University
Russian Academy of Sciences

**Paleolimnology of Northern Eurasia
Experience, Methodology, Current Status**

Proceedings of the International Conference

Yakutsk
22 – 27 August 2016

Yakutsk
2016

DISPERSAL AND HYBRIDIZATION OF SIBERIAN WHITEFISH *COREGONUS LAVARETUS PIDSCHIAN* (GMELIN) IN THE ARCTIC WATER BODIES DURING THE LATE PLEISTOCENE

Zakharov E.S.¹, Pestryakova L.A.², Bochkarev N.A.³, Zuykova E.I.³, Romanov V.I.⁴, Politov D.V.⁵

¹ Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk

² M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk

³ Institute of Systematics and Ecology of Animals SB RAS, Novosibirsk

⁴ National Research Tomsk State University, Tomsk

⁵ Vavilov Institute of General Genetics RAS, Moscow

The results of conducted morphological and genetic analyses state the oncoming migration induced hybridization of several divergent mitochondrial lineages of the white fish in water bodies of the northern Arctic and adjacent territories during the post-glacial period. The study of ND1 gene in mtDNA proves the sympatric existence of two ecological forms/species of the white fish in water bodies of the Anabar River basin.

РАССЕЛЕНИЕ И ГИБРИДИЗАЦИЯ ПОПУЛЯЦИЙ ПЫЖЬЯНОВИДНЫХ СИГОВ (*COREGONUS LAVARETUS PIDSCHIAN*) В АРКТИЧЕСКИХ ВОДОЕМАХ СИБИРИ В ПЕРИОД ПОЗДНЕГО ПЛЕЙСТОЦЕНА

Захаров Е.С.¹, Пестрякова Л.А.², Бочкарев Н.А.³, Зуйкова Е.И.³,
Романов В.И.⁴, Д.В. Политов В.Д.⁵

¹Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск

²ФГАОУ ВПО Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Амосова, Якутск

³Институт систематики и экологии животных СО РАН, Новосибирск

⁴Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

⁵Институт общей генетики им. Н.И. Вавилова РАН, Москва

Сиг-пыжьян *C. lavaretus pidschian* (Gmelin, 1788) – один из самых распространенных видов (видовых комплексов) сиговых рыб в водоемах Якутии и сопредельных территорий. Несмотря на широкое распространение вида и высокую численность популяций, его изученность довольно фрагментарна. Главным образом исследования сводились к описанию новых популяций/форм/видов сигов, которые основывались на сравнительных морфологических, экологических и биологических анализах (Световидов, 1934; Михин, 1955; Вершинин, 1961; Новиков, 1966; Скрыбин, 1977; Кириллов, 1955, 1962, 1964, 1972; Калашников, 1968; Карасев, 1988; Кириллов и др., 2011). В Южной Сибири наибольшее число экологических форм и видов сигов зарегистрировано в озерах бассейнов рек Витим (Орон, Капылюши, Доронг, Баунт) и Большой Енисей (Нойон-Холь, Борзу-Холь, Кадыш, Тоджа, Додот) (Иоганзен, Моисеев, 1955; Лобовикова, 1959; Кирилов, 1972; Скрыбин, 1977; Гундризер, 1978; Бочкарев, Зуйкова, 2009; Бочкарев, Зуйкова, 2010а; 2010б; Bochkarev et al., 2011; 2013).

В Сибирской Арктике описано значительно меньше экологических форм пыжьяновидных сигов. В оз. Таймыр зарегистрировано три экологических формы/вида пыжьяновидных сигов, а именно: сиг-пыжьян, озерная форма *C. l. pidschian patio taimyrensis* и озерно-речная форма *C. l. pidschian patio logaschevi* (Михин 1955). Как отмечал автор, сибирский сиг с выраженным горбатым рылом (озерно-речной сиг) встречался только в р. Нижняя Таймыра и западной части оз. Таймыр. По заключению В.С. Михина, симпатрические сиви из оз. Таймыр представляют собой экологические формы. Данный подход к оценке структуры сигов в этом водоеме в дальнейшем был

использован и другими исследователями (Романов, 1975; Романов, Тюльпанов, 1985; Романова, Романов, 1988, и др.).

В водоемах Якутии Л.С. Берг (1948) описал один чрезвычайно полиморфный экотип сига-пыжьяна – восточно-сибирского сига *C. l. pidschian natio brachymystax*. Несколько позже Ф.Н. Кириллов (1972) описал еще ледниково-равнинного сига – *C. l. pidschian natio glacialis*. Эти сиги хорошо различаются по пластическим признакам, экологическим характеристикам и тяготеют к различным биотопам. Восточно-сибирский сиг обитает в реках, от верхнего течения до нижнего; а ледниково-равнинный сиг – в озерах и в приустьевых участках рек, впадающих в море (Кириллов, 1972; Романов, Бочкарев, 2009). В нижнем течении рек эти две формы обитают симпатрично и ведут себя как биологические виды. Тем не менее, в ряде сводок конца 19 – начала 20 вв. они сведены до уровня экологической формы, и не имеют собственного таксономического статуса. (Решетников, 1980; Атлас пресноводных рыб... 2003).

Генетические исследования сиговых рыб из водоёмов Якутии начались сравнительно недавно (Слободянюк и др., 1993; Смирнов и др. 2009; Яхненко, Мамонтов, 2009; Сендек, Иванов, 2013; Bochkarev et al., 2013). Большая часть работ посвящена изучению формообразования и дивергенции сиговых рыб, тогда как возможные пути их миграции между бассейнами рек не рассматривались. Между тем считается, что в позднем Плейстоцене существовала связь между бассейнами рек Енисей, Лена и Обь. Большинство современных авторов полагают, что северный сток больших сибирских рек запирался единым континентальным ледником и, в связи со значительным подъемом воды, в среднем течении образовывалось несколько больших пригляциальных озер, которые через тургайские ворота имели сток в Каспийское море (Гроссвальд, Котляков, 1989; Волков, Казьмин, 2007). Кроме того, миграции сигов могли проходить вдоль кромки морского ледника, где существовала цепь подпрудных пресноводных шельфовых водоемов.

Молекулярно-генетический анализ показал, что миграции сигов между бассейнами крупных рек в Южной Сибири носили ограниченный характер. В процессе изучения было обнаружена зона вторичной интерградации в бассейне среднего Енисей и озера Тоджинской котловины. Таким образом, была подтверждена гипотеза об обмене гаплотипами между различными популяциями пыжьяновидных сигов через трансконтинентальную систему сброса талых вод в позднем Плейстоцене. Молекулярно-генетические исследования подтвердили ранее выдвинутые, на основе морфологических анализов предположения (Бочкарев, Зуйкова, 2010а; 2010б).

При изучении пыжьяновидных сигов из р. Анабар обнаружено, что в бассейне реки обитают две экологические формы сигов, ранее описанные как восточно-сибирский и ледниково-равнинный сиги. Восточно-сибирский сиг встречается от верхнего течения до устья р. Анабар. Ареал ледниково-равнинного сига приурочен к эстуарию реки. Морфоэкологические характеристики симпатрических сигов из р. Анабар оказались близки к характеристикам аналогичных форм симпатрических сигов из оз. Таймыр и р. Обь. Таймырский озерно-речной сиг по своим морфо-экологическим и генетическим характеристикам оказался близок к восточно-сибирскому сигу, который, в свою очередь, оказался морфологически близок к сигам из бассейна р. Обь (Берг, 1948; Романов и др., 2009). Ледниково-равнинный сиг морфологически близок к озерному сигу из оз. Таймыр (Бочкарев и др. в печати; Bochkarev et al., 2013).

Молекулярно-генетический анализ, включающий гаплотипы сигов из рек Сосьва, Сосьва (Нижней Оби), бассейнов рек Хатанга и Курейка, озера Хантайского (без деления на экологические формы) и двух экологических форм из бассейна р. Анабар, показал, что в Сибирской Арктике (от р. Обь до р. Анабар) обитают только две экологические формы/вида пыжьяновидных сигов – восточно-сибирский и ледниково-равнинный сиги. Учитывая их морфологическое и генетическое сходство, названия сиг-пыжьян (*C. l. pidschian*), восточно-сибирский сиг (*C. lavaretus pidschian natio*

brachymystax) и таймырский речной сиг (*C. l. pidschian natio logaschevi*) являются синонимами. Ледниково-равнинный сиг оказался морфологически и генетически близок к таймырскому озерно-речному сигу. По всей видимости, названия таймырский озерно-речной сиг (*C. l. pidschian natio taimyrensis*) и ледниково-равнинный сиг (*C. l. pidschian natio glacialis*) также являются синонимами (Романов и др., в печати).

В результате молекулярно-генетических исследований сигов р. Анабар в составе популяции восточно-сибирского сига обнаружены две тесно связанные филогенетические линии, при этом в составе популяции ледниково-равнинного сига таких линий зарегистрировано значительно больше. Обе экологические формы характеризуются самым высоким числом гаплотипов, самым высоким гаплотипическим и нуклеотидным разнообразием среди исследованных арктических и южно-сибирских популяций сигов (Bochkarev et al., 2013). Данный факт свидетельствует либо о древности арктических популяций сигов, либо об их высокой миграционной активности в постледниковый период с последующей гибридизацией (Бочкарев и др., в печати).

К настоящему времени показано, что в период последнего оледенения морской ледник перекрывал устья всех сибирских рек и покрывал значительную территорию п-ва Таймыр и Анабарского щита (Mangerud et al., 2004; Волков, Казьмин, 2007). Возможно, что именно в бассейне р. Анабар ледник находился наиболее продолжительный период времени, поскольку именно в этой реке отсутствуют такие реофильные виды, как сиг-валек и ленок. При этом сиг-валек встречается в реках Пясины и Хатанга, а в бассейнах рек Оленек и Енисей сиг-валек и ленок являются одними из самых распространенных видов.

Мы полагаем, что в период расселения в каждом крупном речном бассейне пыжьяновидные сиги были представлены несколькими дивергентными филогенетическими линиями. На это указывают результаты морфологического и генетического анализов форм/видов сигов, обитающих в водоемах Сибирской Арктики и сопредельных территорий. В постледниковый период их встречные миграции привели к значительной гибридизации и, в результате, к значительному увеличению числа гаплотипов в водоемах, расположенных на всем протяжении миграционных путей. Наиболее заметные последствия этих процессов зарегистрированы в популяциях сигов из водоемов бассейна р. Анабар.

Исследование выполнялось при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-04-01708, и частично грант № 14-04-00926.

Список литературы

1. Атлас пресноводных рыб России / Ред. Ю.С. Решетникова. М.: Наука, 2003. 379 с.
2. Берг Л.С., 1948. Рыбы пресных вод СССР и сопредельных стран. М.-Л.: Изд-во АН СССР. Ч. 1. 466 с.
3. Бочкарев Н.А., Зуйкова Е.И., Пестрякова Л.А., Захаров Е.С., Романов В.И., Политов Д.В. Сиг-пыжьян (*Coregonus lavaretus pidschian*, Coregonidae) реки Анабар морфология, биология, генетика // Сибирск. экол. журн., в печати.
4. Бочкарев Н.А., Зуйкова Е.И. Популяционная структура сига-пыжьяна (*Coregonus lavaretus pidschian*, Coregonidae) в озерах Тоджинской котловины и в верхнем течении реки Большой Енисей (республика Тыва) // Зоол. журн. 2009. Т. 88. № 1. С. 47–60
5. Бочкарев Н.А., Зуйкова Е.И. Популяционная структура и возможные пути дифференциации сига-пыжьяна (*Coregonus lavaretus pidschian*, coregonidae) в Додотских озерах Тоджинской котловины // Сибирский Сибирск. экол. журн. 2010а. № 1. С. 41–55.
6. Бочкарев Н.А., Зуйкова Е.И. Сравнительная характеристика сига-пыжьяна (*Coregonus lavaretus pidschian*, Coregonidae) из озера Каракуль и реки Большой Абакан. К вопросу о вторичной интерградации сигов бассейна реки Енисей // Сообщества и популяции животных: экологический и морфологический анализ / Тр. ИСиЭЖ СО РАН. Изд-во КМК: Новосибирск-Москва, 2010б. С. 187–211.

7. Вершинин Н.В. Питание молоди сиговых рыб в нижней Лене // Вопр. ихтиол. 1961. Т. 1. Вып. 3 (20). С. 453–461.
8. Волков И.А., Казьмин С.П. Сток вод последнего оледенения севера Евразии // География и природные ресурсы. 2007. № 4. С. 5–10.
9. Гроссвальд М.Г., Котляков В.М. Великая приледниковая система стока Северной Евразии и ее значение для межрегиональных корреляций // Четвертичный период. Палеогеография и литология: Сб. науч. трудов. Кишинев, Штииница, 1989. С. 5–13.
10. Гундризер А.Н. К систематике и экологии сигов Тувинской АССР // Вопр. биологии. 1978. Томск. С. 20–42.
11. Иоганзен Б.Г., Моисеев В.П. Каракольский сиг из Восточного Алтая // Заметки по флоре и фауне Сибири. Томск, 1955. С. 25–30
12. Калашников Ю.Е. Многоотычинковые сиги озера Орон системы р. Витим // Вопр. Ихтиол. 1968. Вып. 4. С. 637–645.
13. Карасев Г.Л. Рыбы Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1987. 296 с.
14. Кириллов Ф. Н. Рыбы реки Индигирки // Изв. ВНИОРХ.М. 1955. Т. 35. С. 141–167.
15. Кириллов Ф. Н. Ихтиофауна бассейна р. Виллой // Тр. Ин-т биол. Якут. фил. СО АН СССР. 1962. Вып. 8. С. 5–71
16. Кириллов Ф. Н. Видовой состав реки Алдана // Позвоночные животные Якутии: (Материалы по экологии и численности). Якутск. 1964. С. 73–81.
17. Кириллов Ф.Н. Рыбы Якутии. М.: Наука, 1972. 360 с
18. Кириллов А.Ф., Сивцева Л.Н., Собакина И.Г., Жирков Ф.Н. Рыбы бассейна реки Анабар. Учебное пособие, Якутск, 2011. 34 с.
19. Лобовикова А.А. О нахождении телецкого сига (*Coregonus lavaretus pidschian* natio Wapachowski) в озере Черном бассейна среднего Енисея // Вопр. ихтиол. 1959. Т. 13. С. 55–58.
20. Михин В.А. Рыбы озера Таймыр и Таймырской губы // Изв. ВНИОРХ. 1955. Т. 35. С. 5–43.
21. Новиков А.С. Рыбы реки Колымы. М.: Наука, 1966. 134 с.
22. Решетников Ю.С. Экология и систематика сиговых рыб. М.: Наука, 1980. 301 с.
23. Романов В.И., Бочкарев Н.А. К вопросу о статусе экологических форм сигов *Coregonus lavaretus pidschian* Таймырского озера // Вестник ТГПУ. 2009. Вып. 11(89). С. 186–193.
24. Романов Н.С. К экологии сига озера Таймыр // Вопросы рыбного хозяйства Восточной Сибири / Тр. Красноярск, отд. Сиб. НИИ рыбн. хоз-ва. Т. 10. Красноярск: Красноярск. кн. изд-во, 1975. С. 49–54.
25. Романов Н.С., Тюльпанов М.А. Ихтиофауна озер п-ова Таймыр. Вопросы хозяйственного рыбопользования // География озер Таймыра. Л.: Наука, 1985. С. 139–183.
26. Романова Н.М., Романов Н.С. Питание озерного сига *Coregonus lavaretus pidschian* бассейна озера Таймыр // Вопр. ихтиол. 1988. Т. 28. Вып. 6. С. 978–982.
27. Романов В.И., Зуйкова Е.И., Бочкарев Н.А. Морфологическая и экологическая дифференциация симпатрических сигов рода *Coregonus* из оз. Таймыр // Сибирск. экол. журн., в печати.
28. Световидов А. Н. О географической изменчивости пыжьяна (*Coregonus lavaretus pidschian*) // Доклады АН СССР. 1934. Т. 4. № 5/6. С. 343–345.
29. Сендек Д.С., Иванов Е.В. Генетическая дифференциация ледовитоморского пыжьяна из крупных рек Якутии // Биология, биотехника разведения и состояние запасов сиговых рыб. Мат-лы Восьмого международного научно-производственного совещания (Тюмень, 27–28 ноября 2013 г.) / под ред. д.б.н. А.И. Литвиненко, д.б.н. Ю.С. Решетникова. Тюмень: ФГУП «ГОСРЫБЦЕНТР». 2013. С. 194–199.
30. Скрябин А.Г. Рыбы Баунтовских озер Забайкалья. Наука: Новосибирск, 1977. 230 с.

31. Слободянюк С.Я., Кирильчик С.В., Мамонтов А.М., Скулин В.А. Сравнительный рестрикционный анализ митохондриальной ДНК байкальского *Coregonus lavaretus baicalensis* и баунтовского *C. lavaretus baunti* озерных сига // Вопр. ихтиол. 1993. Т. 33. № 5. С. 631–636.
32. Смирнов В.В., Смирнова-Залуми Н.С., Суханова Л.В. Микроэволюция байкальского омуля *Coregonus autumnalis migratorius* (Georgi). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 246 с.
33. Яхненко В.М., Мамонтов А.М. Сравнительный изоферментный анализ байкальских и баунтовских сига // Сибирск. экол. журн. 2009. № 5. С. 441–443.
34. Bochkarev N.A., Zuykova E.I., Abramov S.A. et al. Morphological, biological and mtDNA sequences variation of coregonid species from the Baunt Lake system (the Vitim River basin) // Adv. Limnol. 2013. № 64. P. 257–277.
35. Bochkarev N.A., Zuykova E.I., Katokhin A.V. Morphology and mitochondrial DNA variation of the Siberian whitefish *Coregonus lavaretus pidschian* (Gmelin) in the upstream water bodies of the Ob and Yenisei rivers // Evol. Ecol. 2011. V. 25. P. 557–572.
36. Mangerud J., Jakobsson M., Alexanderson H., Astakhov V., Clarke G. K. C., Henriksen M. Ice-dammed lakes and rerouting of the drainage of northern Eurasia during the Last Glaciation // Quat. Sci. Rev. 2004. V. 23 (11-13). P. 1313–1332

IMPLEMENTATION OF GPR METHOD FOR PALELIMNOLOGY STUDIES ON SELECTED OBJECTS IN POLAND

Artur Zieliński ¹, Jerzy Ziętek ², Anna Strzępowicz ³, Mikołaj Łyskowski ⁴, Ewelina Mazurkiewicz ⁵

¹ Jan Kochanowski University in Kielce, Institute Geography, Świętokrzyska 15 Str., 25-406 Kielce, Poland

^{2, 3, 4, 5} AGH University of Science and Technology, Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection, A. Mickiewicza 30 Ave., 30-059 Krakow, Poland

¹ aziel@ujk.edu.pl, ² zietek@geol.agh.edu.pl, ³ strzepowicz@agh.edu.pl, ⁴ lyskowski@geol.agh.edu.pl, ⁵ ewemazurkiewicz@gmail.com

Lake sediments can serve as a valuable geoarchive of the environment, it is because the lakes are highly sensitive element of any ecosystems. Paleolimnology is a science mainly engaged in the reconstruction process of lake environment changes. Using a number of different methods to identify components of the bottom sediments, both autochthonous and allochthonous. Additionally to a detailed study of sediments, another extremely valuable information it knowledge of their thickness, shape, and nature of the mineral composition forming bottom of a lake. Good method for identification of such elements is the Ground Penetrating Radar technique (GPR).

GPR method belongs to the non-invasive geophysical methods. Its advantage is ease of use and high precision of measurement and the short time of data acquisition. Measurements carried out with GPR allows efficient and accurate inventory of multiple objects. This method uses the phenomenon of electromagnetic (EM) wave reflection in the geological medium. During propagation EM wave is attenuated and scattered. Due to the nature of the survey, for the purposes of geological studies, antennas used during the measurements operate at a relatively low frequencies (up to about 250 MHz). The authors used GPR model ProEx manufactured by MALA Geoscience with shielded and unshielded type of antennas and with different frequency matched to optimize the depth range of tests depending on the nature of the environment and the expected results.

The results show that the GPR method can be successfully implemented in process of identification of the lake sediments thickness in different areas. Presented examples of