

Влияние разработки рудного месторождения на структуру сообществ мошек в горной реке северо-восточной Тувы

Influence of mining works on the structure of blackfly communities in the mountain river of north-eastern Tuva

Л.В. Петрожицкая
L.V. Petrozhitskaya

Институт систематики и экологии животных СО РАН, ул. Фрунзе 11, Новосибирск 630091 Россия. E-mail: lusia@eco.nsc.ru.
Institute of Systematics and Ecology of Animals, Russian Academy of Sciences, Frunze Str. 11, Novosibirsk 630091 Russia.

Ключевые слова: мошки, Simuliidae, макрозообентос, видовое богатство, структура сообществ, водотоки, горные разработки, биоиндикаторы, тяжёлые металлы, донные отложения.

Key words: blackflies, Simuliidae, macrozoobenthos, species richness, community structure, watercourses, mining, bioindicator, heavy metals, bottom sediments.

Резюме. На примере горной реки в северо-восточной Туве рассмотрено влияние горнодобывающих работ на сообщества мошек (Diptera, Simuliidae) амфибиотического комплекса макрозообентоса. В бассейне реки Ак-Хем выявлено 8 видов мошек: *Gymnopais andrei* Vorobets, 1984, *Gymnopais trifistulatus* Rubtsov, 1955, *Helodon alpestris* (Dorogostaisky, Rubtsov et Vlasenko, 1935), *Prosimulium intercalare* Rubtsov, 1956, *P. kolymense* Patrusheva, 1975, *P. tridentatum* Rubtsov, 1940, *Metacnephia amsheevi* Usova et Bazarova, 1990, *M. kirjanovae* (Rubtsov, 1956). Видовой состав включает 30 % общего разнообразия мошек бассейна р. Большой Енисей. В комплексе амфибионтов фоновых водотоков мошки уступают основному компоненту — подёнкам по разнообразию и обилию (8 и 16 видов, 28 и 33 % в структуре доминирования, соответственно). Разработка полезных ископаемых в бассейне р. Ак-Хем привела к ухудшению качества воды по гидрохимическим показателям, в особенности тяжёлым металлам и донным отложениям, перемещаемым вниз по течению реки. Комплекс амфибионтов, при общем видовом богатстве Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera — 44 таксона, полностью исчезает в зоне непосредственной близости к месту поступления загрязнений, показатель биотического индекса EPT (суммарное количество видов Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera) с 8–11 единиц для фоновых створов падает до 0 в основном русле реки. По мере поступления воды притоков наблюдается улучшение среды обитания и постепенное восстановление сообществ амфибионтов в нижних участках продольного профиля реки (EPT = 15). Процесс восстановления мошек отстаёт от остальных тестовых групп насекомых, что связано с донными отложениями, препятствующими фиксации личинок на каменистом субстрате и их питанию. Предложено использование мошек в качестве биоиндикаторов: применение биотического индекса EPS (суммарное количество видов Ephemeroptera, Plecoptera, Simuliidae, находится в пределах 7–14) наряду с EPT повысит эффективность оценки состояния водной среды и в особенности возрастающих объёмов донных отложений. Долговременная активная разработка месторождения руды на северо-востоке Тувы несёт риск загрязнения донными осадками с повышенным содержанием

тяжёлых металлов не только р. Ак-Хем, но и р. Большой Енисей, одного из крупнейших источников чистой воды в Туве.

Abstract. Influence of mining on the communities of blackflies (Diptera, Simuliidae) as a component of macrozoobenthos was analyzed in the basin of mountain river Ak-Khem in the north-eastern Tuva. 8 species of blackflies were identified, *Gymnopais andrei* Vorobets, 1984, *G. trifistulatus* Rubtsov, 1955, *Helodon alpestris* (Dorogostaisky, Rubtsov et Vlasenko, 1935), *Prosimulium intercalare* Rubtsov, 1956, *P. kolymense* Patrusheva, 1975, *P. tridentatum* Rubtsov, 1940, *Metacnephia amsheevi* Usova et Bazarova, 1990 and *M. kirjanovae* (Rubtsov, 1956), which accounted about 30% of species richness in the Bolshoy Yenisei River basin. The species *Gymnopais andrei* was registered in Tuva and the Altai-Sayan mountain system for the first time. The blackflies and mayflies accounted for 28 and 33% of the collected material. The species richness of Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera in the Ak-Khem river basin included 44 taxons. Mining leads to a decrease in water quality by chemical characteristics, especially heavy metals and sediments. The insects of amphibiotic complex completely disappeared in the zone of immediate proximity to the contamination site, the biotic index EPT fell up from 11 to 0 in the mainstream of the river. As water arrives from the tributaries, the habitat is improved and communities are gradually restored in the lower sections of the river (EPT = 15). The use of blackflies as bioindicators is suggested, the biotic indices EPS (the total number of species of Ephemeroptera, Plecoptera, Simuliidae, is within 7–14), along with the EPT, will improve the effectiveness of assessing the state of the aquatic environment and in particular the increasing volumes of bottom sediments. The long-term mining of polymetallic ores in the east of Tuva carries the risk of contamination by solid sediments with heavy metals not only the Ak-Khem River, but also the Bolshoy Yenisei — the largest clean river of Tuva. Monitoring of the Ak-Khem River with help of bioindicators, including not only stoneflies, mayflies, caddis flies, but also blackflies will increase the effectiveness of assessing the increasing solid flow of the river.

Введение

В горах Сибири имеются большие запасы полезных ископаемых, к таковым относится Кызыл-Таштыгское месторождение колчеданно-полиметаллических руд на северо-востоке Тувы, где идёт добыча руды открытым способом и завершается строительство горно-обогатительного комбината. Работы сопровождаются вырубкой хвойных лесов, деградацией почв и растительного покрова, наблюдается загрязнение поверхностных вод тяжёлыми металлами и отходами производства, что ведёт к изменению облика горно-таёжного ландшафта и в целом экосистемы верховий р. Большой Енисей. В районе горных разработок проводится мониторинг поверхностных вод по химическим показателям, наряду с которыми используются биологические, оценивающие экологическую ситуацию по составу и численности донного населения беспозвоночных.

Биологический мониторинг проводится различными методами и биоиндикация на основе макрозообентоса входит в современные стандарты оценки состояния пресноводных экосистем [Shitikov et al., 2003; Buss et al., 2014]. По многим показателям, удовлетворяющим требованиям, предъявляемым к биоиндикаторам, относятся насекомые четырёх отрядов — Plecoptera, Ephemeroptera, Trichoptera, Diptera. Определение ведётся до уровня семейства, рода и вида [Bakanov, 2000; Buss et al., 2014; Wright, Ryan, 2016]. Из двукрылых чаще используются комары-звонцы (Diptera, Chironomidae), мошки (Diptera, Simuliidae) — значительно реже, по причине высокой агрегированности личинок, особенно в равнинных реках, и слабой чувствительности к отдельным категориям загрязнений [Semenchenko, 2004; Buss et al., 2014]. В биоиндикации учитывается и трофическая структура сообществ, изменение соотношения различных компонентов по способу добывания пищи указывает на уровень и характер загрязнения вод [Bakanov, 2000]. В работе с макрозообентосом широко применяются биотические индексы, которые наряду со структурно-функциональными характеристиками сообществ амфибиотических насекомых отражают изменения долгосрочного порядка, служат интегральным критерием состояния водной среды и экосистемы в целом, и в дальнейшем они могут быть использованы для оценки экологических рисков [Bakanov, 2000; Clements et al., 2000; Shitikov et al., 2003]. Из-за несложности расчётов получили наибольшее применение индексы Вудивисса (оценка уровня загрязнения по наличию или отсутствию отдельных групп гидробионтов) и ЕРТ (суммарное число видов трёх отрядов Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, представленных в исследуемых биотопах) [Bakanov, 2000; Shitikov et al., 2003; Semenchenko, 2004; Buss et al., 2014].

Горные и равнинные водотоки различаются по многим параметрам, как гидрологическим, гидрохимическим, так и гидробиологическим — по составу

и численности населения макрозообентоса. В горных водотоках юга Сибири, наряду с веснянками, подёнками и ручейниками, в водотоках широко представлены мошки с немалым разнообразием, высокой численностью, выраженной реакцией на меняющиеся абиотические факторы среды [Petrozhitskaya, Rodkina, 2007, 2009; Petrozhitskaya, 2013]. Поверхностные воды и природные ландшафты Восточной Тувы до начала 21 века относились к ненарушенным экосистемам Алтае-Саянской горной страны. Интенсивная трансформация, происходящая в настоящее время в результате хозяйственного освоения горных территорий Приенисейской части Алтае-Саянского региона, сопровождается значительными изменениями разнообразия экосистем, снижением состава и численности животных за счёт изменения среды обитания [Vinogradov, 2011].

Цель данного исследования — оценить влияние разработки рудного месторождения на состав и структуру сообществ мошек в горной реке северо-восточной Тувы для последующей экспертной оценки уровня загрязнения реки донными отложениями.

Район работ, материал и методы

В основе сообщения лежат сборы из среднего-горной северо-восточной Тувы (800–1900 м) 2007–2010 гг. в бассейне р. Ак-Хем — левого притока второго порядка р. Большой Енисей. Кызыл-Таштыгское месторождение расположено в центральной части хребта Академика Обручева — водораздела между бассейнами рек Большой и Малый Енисей.

В сборе материала использован моностворный подход с общепринятыми методами — ручной сбор с поверхности камней, с помощью скребка и гидробиологического сачка. Пробы взяты по принципу «вверх-вниз» от места рудного объекта (рис. 1). Фоновые створы выбраны выше и в стороне от источника загрязнения [Semenchenko, 2004], для сравнения видового состава мошек использованы региональные данные по сходным типам местообитаний [Petrozhitskaya, 2013]. В бассейне р. Ак-Хем отработано 16 створов, из них фоновые — 7 (истоки р. Ак-Хем — створы № 1, 2, притоки — № 3, 6, 10, 11, 13), остальные 9 створов рассматриваются как загрязнённые в различной степени (рис. 1), в р. Оо-Хем обследован 1 створ (№ 17).

Материал определён до вида в соответствии с современной системой семейства Simuliidae и синонимией [Yankovsky, 2002; Adler, Crosskey, 2016]. Дополнительно использованы данные по другим компонентам амфибиотического комплекса, любезно предоставленные В.В. Заикой.

Структура сообществ мошек оценена по шкале Энгельманна: эудоминанты (40–100 %), доминанты (12,5–39,9 %), субдоминанты (4–12,4 %), рецеденты (1,3–3,9 %) и субрецеденты (< 1,3 % от общей численности) [Engelmann, 1978]. Функциональные характеристики основаны на способе добывания пищи, ле-

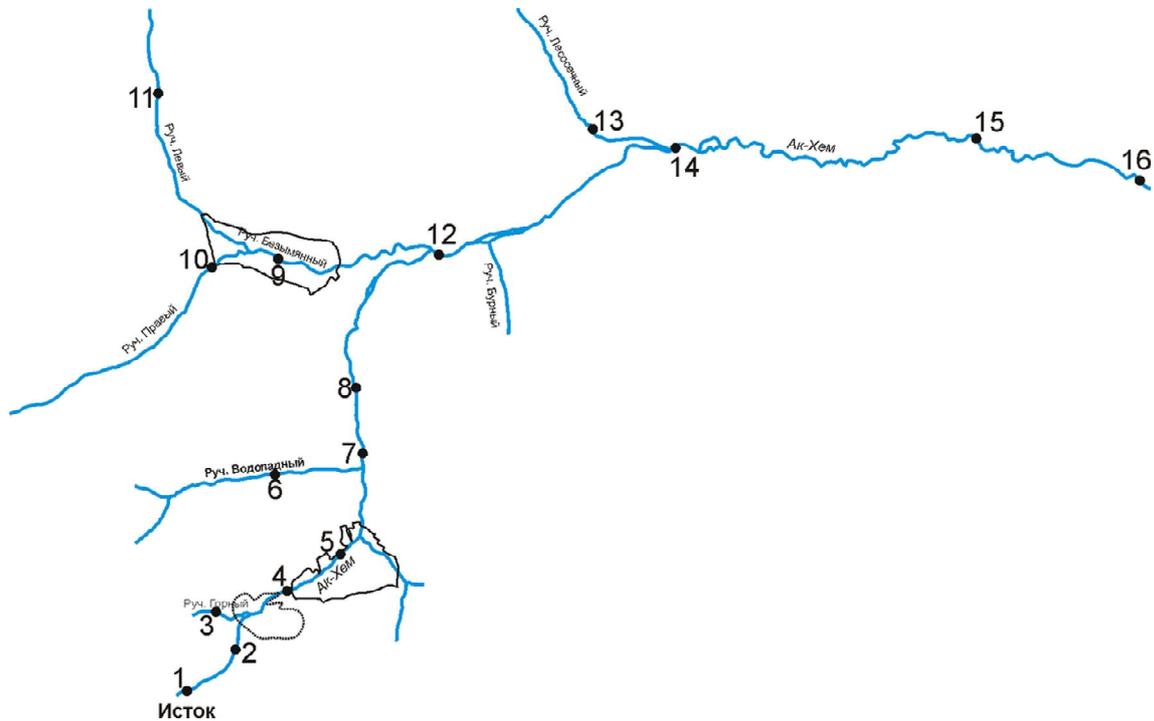


Рис. 1. Схема расположения створов в бассейне р. Ак-Хем. Фоновая зона, створ: № 1 — исток р. Ак-Хем (удалённость от рудного объекта — 2 км выше), № 2 — р. Ак-Хем (1 км выше); притоки р. Ак-Хем: № 3 — ручей Горный, № 6 — ручей Водопадный; № 10 — ручей Правый; № 11 — ручей Левый; № 13 — ручей Лесосечный. Тестируемая зона р. Ак-Хем (удалённость от рудного объекта, ниже по течению): № 4 — 0 км от рудного объекта; № 5 — 0,5 км, № 7 — 2 км, № 8 — 3 км, № 9 — хвостохранилище на ручье Безымянный, № 12 — 6 км, № 14 — 12 км, № 15 — 17 км, № 16 — 22 км от рудного объекта.

Fig. 1. Scheme of the location of stations in the basin of Ak-Khem River. Background uncontaminated zone, station: № 1 — headwater of Ak-Khem River (distance from the ore object is 2 km upstream), № 2 — Ak-Khem River (1 km upstream); tributaries of Ak-Khem River: № 3 — Gorny Creek, № 6 — Creek Waterfall; № 10 — Right Creek; № 11 — Left Creek; № 13 — stream Lesosnechny. Tested contaminated zone of Ak-Khem River (distance from the ore site, downstream): № 4 — 0 km from the ore site; № 5 — 0.5 km, № 7 — 2 km, № 8 — 3 km, № 9 — sump on the Bezymyanny stream, № 12 — 6 km, № 14 — 12 km, № 15 — 17 km, № 16 — 22 km downstream.

жащие в основе жизненных форм [Chertoprud, 2006]. Типизация биотопов проведена по Иллиесу, Ботосаняну [Ilies, Botosaneanu, 1963], распределение гидробионтов в продольном профиле водотока рассмотрено согласно речному континууму и синтетической теории [Statzner, Higl, 1985; Thor et al., 2006].

Для оценки химического состава поверхностных вод бассейна р. Ак-Хем использованы данные по основным показателям [Geoecological..., 2012], предельно-допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ даны для водоёмов, используемых в рыбохозяйственных целях [Water..., 2010].

В районе исследования среднегодовое количество осадков достигает 640 мм, из них 89 % выпадает с апреля по октябрь. Кызыл-Таштыгское месторождение расположено на высоте 1600–1800 м в узкой эрозионной долине р. Ак-Хем. В водном режиме отмечаются невысокое половодье, значительные летние и осенние паводки, формирующие 55 % стока. Реки бассейна р. Большой Енисей в верхнем течении имеют каменисто-галечный грунт, в среднем — появляются ледниково-эрозионные отложения. Климат

континентальный, типично горный, влажный, с продолжительной и малоснежной зимой. Среднегодовая температура воздуха $-1,5^{\circ}\text{C}$, минимум -34°C , максимум $+25,4^{\circ}\text{C}$. В течение 200 дней в году удерживается отрицательная среднесуточная температура воздуха, лето короткое, с обильными дождями. Солнечных дней в году 161 (44 %), с осадками — 146 (40 %), в середине лета выпадает до 70 мм осадков в месяц. Средняя продолжительность безморозного периода 58 дней, снежный покров устанавливается в начале октября. Повсеместно сохраняется многолетняя мерзлота, оттаивающая до глубины 0,5 м и способствующая высокому поверхностному стоку рек [Gerasimov et al., 1964].

Результаты и обсуждение

В бассейне р. Ак-Хем определён таксономический состав и долевое участие мошек в макрозообентосе фоновой и загрязнённой части бассейна. До начала строительных и горнорудных работ (2007–2008 гг.) в комплексе амфибиотических насекомых

по разнообразию и численности в водотоках преобладали подёнки (табл. 1). Мошки были менее разнообразны по составу и по обилию немногим уступали подёнкам. Веснянки в совокупности представлены достаточно широко, ручейники немногочисленны, но с большим количеством видов. В бассейне р. Ак-Хем суммарное видовое богатство амфибионтов трёх отрядов (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera) включает 44 таксона, из которых 8 относятся к категории многочисленных.

В фоновой зоне наивысшие показатели плотности населения (986 экз./м²) выявлены у веснянок в низовье ручья Горный (рис. 1, № 3), в устье этого ручья и верхней зоне р. Ак-Хем плотности снижены до 150–180 экз./м². Подёнки распределены более равномерно — 300 экз./м². Плотность населения мошек в ручьях может достигать 350 экз./м², структура населения отчётливо дифференцирована. Выделены эудоминанты — *Gymnopaia trifistulatus* Rubtsov, 1955 (46,5 %), доминанты — *Prosimulium intercalare* Rubtsov, 1956, *P. tridentatum* Rubtsov, 1940 (26,1 и 14,4 % соответственно), субдоминанты — *Gymnopaia andrei* Vorobets, 1984, *Prosimulium kolymense* Patrusheva, 1975 (5,5 и 5,0 %), рецеденты — *Metacnephia amsheevi* Usova, Bazarova, 1990 (1,3 %), субрециденты — *Helodon alpestris* (Dorogostaisky, Rubtsov et Vlasenko, 1935), *Metacnephia kirjanovae* (Rubtsov, 1956) (0,8 и 0,4 %, соответственно от общего числа 670 особей). В верхней зоне — эфиритрали основного русла р. Ак-Хем выявлены 3 вида, из них доминант — *Prosimulium tridentatum*, субдоминанты — *Metacnephia kirjanovae* и *Helodon alpestris*.

Для изучения влияния горнодобывающих работ на гидроценоз использованы сборы 2009–2010 гг. Они показали, что на верхней границе с нарушенными территориями (рис. 1, № 4) в водах р. Ак-Хем присутствуют только единичные экземпляры подёнок и ручейников, ниже по течению (№ 5) в зоне рудного объекта не обнаружены амфибиотические насекомые (рис. 2). Химические характеристики близ объекта показывают рост общей минерализации и жёсткости воды по сравнению с истоками р. Ак-Хем, биологическое потребление кислорода (БПК₅) и pH воды не соответствуют нормативам для водоемов рыбохозяйственного назначения (табл. 2). По мере удаления от рудного объекта и впадения притоков (ручьи Водопадный и Медвежий), с водами которых привносятся живые организмы, увеличиваются размеры р. Ак-Хем и расход воды (с 108 до 243 л/с). Все это способствует снижению показателей общей минерализации, жёсткости воды, pH и БПК₅ (табл. 2). Однако количество взвешенных твёрдых частиц в воде превышает в 1,4–2 раза показатели фоновых створов. Что касается концентрации тяжёлых металлов, то они в десятки и даже тысячи раз превышают ПДК [Water..., 2010; Geoecological..., 2012]. Эти условия не способствуют сохранению популяций амфибионтов, поступивших с водами притоков (рис. 2). Так, на створе № 8 отмечено присут-

Таблица 1. Уровень разнообразия и обилия компонентов амфибиотического комплекса макрозообентоса бассейна р. Ак-Хем (июль 2008 г.)

Table 1. The diversity and abundance of amphibiotic insects of macrozoobenthos in Ak-Khem River (July 2008)

Таксоцен	Кол-во видов	Обилие, %	Многочисленные виды
Ephemeroptera	16	31,0	3
Plecoptera	13	19,4	3
Trichoptera	15	2,3	2
Diptera, Chironomidae	–	19,3	3
Diptera, Simuliidae	8	28,0	3

Примечание. Всего собрано 2387 особей.

Note. A total of 2387 individuals were collected.

ствии по одному виду подёнок и мошек, двух видов ручейников при отсутствии веснянок. Несколько расширенный видовой состав амфибионтов в створе № 9, расположенном в точке строящегося хвостохранилища, где наблюдаются изменения условий среды обитания, но ситуация не критичная. Далее по течению р. Ак-Хем (№ 12) наблюдается дальнейшее снижение минерализации, концентрации тяжёлых металлов и повышение pH, что в целом ведёт к улучшению условий существования гидробионтов и появлению всех четырёх компонентов амфибиотического комплекса. Население веснянок, подёнок и ручейников представлено двумя видами, мошки только одним (*Helodon alpestris*). В самых удалённых точках от рудного объекта (№ 15, 16) ситуация в реке становится в целом благополучной, представлены все рассматриваемые таксономические группы, причём видовое богатство веснянок, подёнок и ручейников значительно выше по сравнению с истоками р. Ак-Хем (рис. 2). Мошки менее представительны как по видовому составу, так и плотности популяции (10 экз./м²).

В р. Оо-Хем (25 км от истоков притока р. Ак-Хем), выявлена структура сообществ мошек, отличающаяся от фоновых створов р. Ак-Хем (рис. 2, № 17), что обусловлено гидродинамическими показателями. Отчётливо выражен переход к другому типу сообществ, меняется состав и структура: отмечена смена доминантов (*P. tridentatum*) и субдоминантов (*Metacnephia kirjanovae*, *Helodon alpestris*), полностью отсутствуют виды рода *Gymnopaia*, на смену которым приходят виды рода *Simulium* s.str. видовых групп *malyschevi* и *tuberosum*, составляющие основу населения метакринали среднегорных водотоков [Petrozhitskaya, 2013].

В фоновых створах популяции хирономид имеют выровненные плотности, у веснянок и мошек выражены резкие колебания. В продольном профиле р. Ак-Хем в непосредственной близости от рудного

Таблица 2. Гидрологические и гидрохимические характеристики водотоков бассейна р. Ак-Хем (2008–2010 гг.)
Table 2. Hydrological and chemical characteristics of watercourses of the Ak-Khem River basin (2008–2010)

Показатель	Фоновая зона, створ							Тестируемая зона, створ								
	1	2	3	6	10	11	13	4	5	7	8	9	12	14	15	16
Расстояние створа до рудного объекта, км	ИСТ 2,0	1,0	ПРК	ПРК	ПРК	ПРК	ПРК	0	0,5	2,0	3,0	ПРК, ХВХ 5,0	6,0	12,0	17,0	22,0
Абсолютная высота, м н.у.м.	1962	1666	1700	1600	1450	1600	1300	1600	1550	1500	1500	1450	1362	1280	1250	1200
Уклон, %	26	19	17	18	16	17	15	17	17	17	16	16	10	9	9	8
Ширина водотока, м	0,4	0,6	0,6	0,8	1,3	0,9	0,8	1,5	1,8	0,9	2,0	2,3	5,0	7,0	7,5	7,5
Скорость течения, м/с	0,25	0,3	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8
Расход воды, л/с	5,4	20,3	6,5	48	119	108	87	108	224	238	243	227	580	810	900	900
Температура воды, °С	4	4	4	5	5	5	7	5	7	8	8	6	8	10	12	12
Общая минерализация, г/л	0,09	0,13	0,13	0,09	0,14	0,14	0,11	0,21	0,48	0,25	0,17	–	0,14	0,14	0,15	0,16
рН, норма 6,5–8,5	7,06	7,3	7,3	6,9	7,08	7,08	7,44	6,78	3,27	5,0	6,26	–	7,3	7,3	7,3	7,4
Общая жесткость, мг-экв/л	0,85	1,35	1,00	0,15	0,6	0,6	0,6	2,2	5,0	3,5	1,6	–	0,95	0,95	1,3	1,45
БПК ₅ , мг/л; ПДК не > 3,0	–	1,28	–	–	–	–	–	3,52	–	–	1,52	–	–	–	–	–
Взвешенные частицы, мг/л	54,4	54,4	–	–	71,0	–	5,6	–	–	–	98,8	–	–	–	–	–
Прозрачность воды	ПБО	ПБО	ПБО	ПБО	ПБО	ПБО	ПБО	ПБО	МО	МО	ПБО	О	–	ПБО	ПБО	ПБО

Примечание. ИСТ — исток р. Ак-Хем, ПРК — приток, ХВХ — хвостохранилище, ПБО — прозрачная без осадка, МО — мутная с опалесценцией, О — с осадком. Жирным шрифтом выделены основные показатели, выходящие за рамки допустимых значений для водоёмов, используемых в рыбохозяйственных целях.

Note. ИСТ — headwater of the Ak-Khem River, ПРК — tributary, ХВХ — sump, ПБО — transparent without sediment, МО — turbid water with opalescence, О — with sediment. In bold type the main indicators are outlined, which go beyond the permissible values for reservoirs used for fishery purposes.

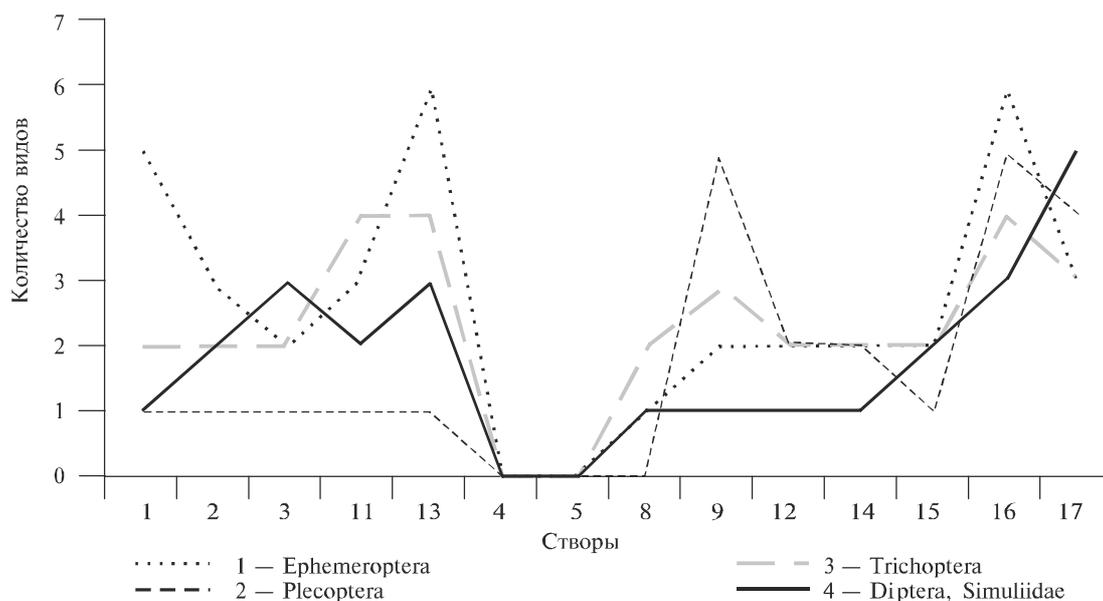


Рис. 2. Распределение видов амфибиотического комплекса в бассейне р. Ак-Хем и р. Оо-Хем (2010 г.). 1 — Ephemeroptera, 2 — Plecoptera, 3 — Trichoptera, 4 — Diptera, Simuliidae.

Fig. 2. Distribution of species of the amphibioc complex in the basin of Ak-Khem and Ooh-Hem Rivers (2010). 1 — Ephemeroptera, 2 — Plecoptera, 3 — Trichoptera, 4 — Diptera, Simuliidae.

объекта амфибионты полностью отсутствуют, по мере удаления вниз по течению у хирономид достаточно быстро достигаются средние фоновые плотности. У мошек процесс восстановления на нарушенных участках реки идёт медленнее по сравнению с остальными компонентами амфибиотического комплекса. В целом, в условиях усиливающегося антропогенного воздействия в бассейне р. Ак-Хем толерантными оказались только 4 вида: веснянки *Arcynopteryx polaris* (Klapálek, 1912), ручейники *Rhyacophila sibirica* MacLachlan 1879, подёнки *Ameletus inopinatus* Eaton, 1887 и мошки *Helodon alpestris* (Dorogostajsky, Rubtsov, Vlasenko, 1935).

В реках бореальной зоны Палеарктики мошки входят в состав доминантов и характеризуются высокими плотностями населения [Malmqvist et al., 2004]. В горно-таёжных ландшафтах восточной Тувы мошки представлены 31 видом из 5 родов, из которых в бассейне р. Большой Енисей отмечены 28 видов [Petrozhitskaya, 2013]. Таксономическую основу фауны составляют роды *Simulium* (10 видов) и *Prosimulium* (7 видов), в сумме включающие 55 % общего видового состава. В среднегорных водотоках широко представлены виды из родов *Prosimulium*, *Helodon* и *Metacnephia*, тяготеющие к бореальным и горно-таёжным ландшафтам. Полученные сведения по составу и структуре сообществ мошек ненарушенных водотоков бассейна р. Ак-Хем не противоречат имеющимся региональным сведениям, видовое разнообразие не превышает 30 % от состава мошек бассейна р. Большой Енисей. Следует отметить, что обнаруженный вид *Gymnopais andrei* впервые выявлен в Алтае-Саянской горной системе и за пределами типового места в Якутии [Vogobets, 1984].

Использование личинок мошек в качестве биоиндикаторов не столь широко встречается по сравнению с другими представителями реофильного комплекса ввиду интолерантности ко многим загрязнениям, включая тяжёлые металлы [Allan, 2004; Yanygina, 2012]. Следует учесть, что личинки мошек активно реагируют на повышение мутности воды как одного из основных факторов, снижающих её качество. Реакция мошек проявляется в виде активных миграций, что связано с их морфофункциональными и поведенческими особенностями [Waters, 1972; Allan, 1987; Petrozhitskaya, Rudneva, 2000; Shubina, 2006]. При выборе биоиндикаторов в мониторинге поверхностных вод следует учитывать региональные особенности [Shitikov et al., 2003; Semenchenko, 2004], к числу которых на северо-востоке Тувы относятся сейсмичность и горный рельеф, обильные летние осадки, частые паводки и повышенный риск возрастания эрозийных процессов. В летнее время повышение мутности воды в р. Ак-Хем является следствием общих природно-климатических условий и усугубляется нарушением целостности территории при масштабных разработках руды [Geocological..., 2012].

Изучение влияния добычи полиметаллических руд на гидробиоценозы проводится методом сопостав-

ления результатов химического и биологического анализов в фоновых створах и продольном профиле реки Ак-Хем в зависимости от удалённости от источника загрязнения. По результатам гидрохимического анализа отчётливо наблюдается ухудшение качественных и количественных показателей состава воды в непосредственной близости от рудного объекта по сравнению с фоновыми ненарушенными участками. По мере удаления от карьерного разреза в продольном профиле реки идёт постепенное снижение концентрации тяжёлых металлов в воде, разбавление химических веществ в возросшем объёме воды, адсорбция и осаждение органических и твёрдых частиц на поверхности грунтообразующих субстратов. Представители макрозообентоса из числа амфибионтов р. Ак-Хем активно реагируют на меняющиеся условия среды обитания. Сокращение видового состава подёнок и ручейников при единичной их численности, отсутствие веснянок и мошек в сопредельной с карьером верхней зоне реки указывает на резкое ухудшение условий обитания гидробионтов. При карьерной добыче полезных ископаемых и вывозе пустых пород на отвалы в воздухе возрастает количество взвешенных твёрдых частиц, осаждающихся на поверхности растений, почвы и водоёмов. В водотоках из числа амфибионтов в первую очередь реагируют виды чувствительные к повышенной мутности, на что указывает появление опалесцирующей плёнки (табл. 2), снижающей прозрачность из-за взвешенных, пылевидных частиц. Веснянки, как наиболее чувствительные ко всем видам загрязнений, и мошки — специализированные фильтраторы активно мигрируют из загрязнённых участков реки [Courtney, Clements, 2002]. По типу жизненных форм личинки мошек относятся к малоподвижным фильтраторам, не способным к активному перемещению на большие расстояния [Chertoprud, 2006]. Исключение составляет катастрофический снос — дрейф, вызванный паводковыми водами или резким ухудшением условий обитания [Waters, 1972; Bogatov, 1994; Petrozhitskaya, Rudneva, 2000; Shubina, 2006]. Отсутствие веснянок и мошек в этой зоне можно рассматривать как избегание загрязнённых участков в процессе миграций и дальнейшего их перераспределения в русле реки [Waters, 1972; Allan, 1987]. Личинки мошек отрицательно реагируют на возрастание взвешенных твёрдых частиц в воде по двум причинам: не могут добывать пищу из-за засорения фильтрующего аппарата, и осаждение осадка на субстрате препятствует фиксации личинки к твёрдой поверхности с помощью заднего прикрепительного органа.

О значительном превышении токсичных веществ в эпириэриали верхнего участка р. Ак-Хем можно судить по створу, расположенному в 0,5 км ниже рудного объекта. Показатели рН, общей минерализации, жёсткости воды, биологического потребления кислорода и концентрации тяжёлых металлов резко отличаются от фоновых, что ведёт к снижению

качества воды от «чистых» до «грязных», не пригодных для использования в рыбохозяйственных целях [Water..., 2010]. Превышения ПДК тяжёлых металлов в воде катастрофически высоки и опасны для гидробионтов. Отсутствие преимагинальных фаз амфибиотических насекомых в этой зоне профиля указывает на высокую степень загрязнения воды и её токсичность. Снижение уровня загрязнения вниз по течению идет при возрастании речного стока, разбавлении химических компонентов чистыми водами притоков, адсорбции металлов и осаждении взвешенных частиц в виде донного осадка на поверхности каменистого субстрата (табл. 2). С постепенным улучшением водной среды наблюдается медленное восстановление сообществ амфибионтов, на что указывает их состав и численность. В пространственном распределении макрозообентоса в горном потоке прослеживаются как континуальность, так и дискретность, что в значительной мере обусловлено особенностями рельефа, изменением гидродинамических показателей [Statzner, Higler, 1985; Petrozhitskaya, Thorp et al., 2006; Rodkina, 2007, 2009a, b; Petrozhitskaya et al., 2010] и влиянием характера использования околоводной территории [Malmqvist, Holffsten, 1999; Allan, 2004]. Что касается малых притоков р. Ак-Хем, то в них отмечены редкие виды мошек из числа малоподвижных альгофагов соскребаателей рода *Gymnopais*, обитающих в родниковых и снежниковых водотоках гор Южной Сибири [Patrusheva, 1982; Petrozhitskaya, Rodkina, 2002; Petrozhitskaya, 2013]. Верховья рек, рассматриваемые как рефугиумы, поддерживают разнообразие амфибиотических насекомых горных систем Южной Сибири [Petrozhitskaya, Rodkina, 2002; 2009; Tiunova, Bazova, 2015; Petrozhitskaya, Matafonov, 2016].

В продольном профиле рек прослеживается накопление тяжёлых металлов не столько в воде, сколько в донных осадках на значительном удалении от источника загрязнения [Malmqvist, Holffsten, 1999]. Рост добычи полезных ископаемых сопровождается постепенным увеличением отходов производства, вымыванием твёрдых частиц и рудообразующих химических элементов с территории промышленной зоны и их последующим осаждением в виде донных отложений и накоплением в конусе выноса реки. Изучение влияния тяжёлых металлов на лотические бентосные сообщества следует проводить в широких масштабах, затрагивая целые экорегионы [Malmqvist, Holffsten, 1999; Allan, 2004]. Состояние литосферы в районе Кызыл-Таштыгского рудного месторождения по геохимическим критериям содержания тяжёлых металлов в поверхностных водах соответствует классу «Б» — катастрофически высокой степени загрязнения [Geoecological..., 2012]. Гидродинамические показатели горной реки Ак-Хем и масштабные эрозионные процессы, усиливающиеся при вскрытии горных пород, способствуют активному переносу твёрдых частиц вниз по течению и накоплению их в межгорных котловинах, что увеличивает риск ухуд-

шения экологической обстановки в ранее чистых от загрязнений участках бассейна р. Большой Енисей. Известно, что со временем масштабы негативного воздействия тяжёлых металлов на сообщества макрозообентоса расширяются и затрагивают значительные части бассейновой системы и отмечаются на протяжении нескольких десятилетий после завершения горнодобывающих работ [Malmqvist, Holffsten, 1999; Clements et al., 2000; Allan, 2004].

По данным геологической оценки район Кызыл-Таштыгского месторождения относится к горным территориям с высокой степенью неотектонической и сейсмической активности, с масштабными эрозионными расчленениями. На общем фоне природно-климатических особенностей проведение горнодобывающих работ со вскрытием рудных пластов в пределах неотектонических блоков, испытывающих медленное поднятие, может способствовать нарастанию эрозионного разрушения реки и медленному её загрязнению тяжёлыми металлами [Geoecological..., 2012].

Для интегральной оценки качества поверхностных вод используются биотические индексы, из которых ЕРТ имеет наибольшее распространение [Malmqvist, Holffsten, 1999; Buss et al., 2014]. В бассейне р. Ак-Хем показатель ЕРТ в фоновых створах составляет 8–11, что соответствует высокой чистоте воды в притоках и истоке исследуемой реки (рис. 3, табл. 2). В продольном профиле реки в зоне наивысшего загрязнения индекс ЕРТ падает до 0, что указывает на сверхтоксичность воды и непригодность для обитания амфибиотических насекомых. По мере удаления от источника загрязнения, на расстоянии 3 км от карьера (створ № 8) наблюдается повышение индекса ЕРТ до 3 при отсутствии веснянок. В устье р. Ак-Хем (№ 16) выявлено изменение состава и структуры сообществ не только мошек, но и других амфибионтов, при этом ЕРТ возрастает до 15, что указывает на наличие восстановительного процесса (рис. 3).

В биомониторинге вод используется широкий набор биотических индексов, учитывающих таксономический уровень, природно-климатические и региональные особенности [Allan, 2004; Buss et al., 2014; Wright, Ryan, 2016]. В выборе индексов можно ограничиться малым набором с учётом временных и других затрат, при этом возможна замена отдельных компонентов, например, замена ручейников мошками [de Moor, Ivanov, 2008]. Так, в дополнение к индексу ЕРТ можно рекомендовать индекс EPS (суммарное число видов Ephemeroptera, Plecoptera, Simuliidae), находящегося в пределах от 7 до 14, который расширит рамки оценки состояния гидроценоза при нарастании процесса седиментации твёрдых частиц в исследуемой реке (рис. 3). Расширение видового состава и рост численности популяции мошек в р. Ак-Хем указывает на 17 км от истока реки — участок, до которого ещё не дошли донные осадки, привнесённые течением воды с мест разработки месторождения руды.

Выводы

Разработка рудного месторождения в верхней зоне р. Ак-Хем ведёт к эрозии горных почв, загрязнению рудообразующими элементами и донными отложениями нижерасположенных участков реки. Амфибиотический комплекс макрозообентоса активно реагирует на катастрофически высокие концентрации загрязнений, меняющиеся условия среды обитания, что подтверждается общим снижением разнообразия и биотическими индексами на основе индикаторных таксонов. На примере амфибионтов показано негативное действие химических компонентов воды на сообщества насекомых, выраженное в полном исчезновении их на участках реки, прилегающих непосредственно к рудному объекту. В нижнем течении реки наблюдается постепенное восстановление сообществ амфибионтов, но для мошек характерен более медленный процесс, что связано с донными отложениями, препятствующими фиксации личинок на каменистом субстрате и осуществлению процесса питания при фильтрации воды. Предложено использование мошек в качестве биоиндикаторов, биотические индексы EPS наряду с ЕРТ повысят эффективность оценки возрастающих объёмов донных отложений. Долговременная активная разработка месторождения руды на северо-востоке Тувы несёт риск загрязнения донными осадками с повышенным содержанием тяжёлых металлов не только р. Ак-Хем, но и р. Большой Енисей, одного из крупнейших источников чистой воды в Туве.

Благодарности

Автор искренне признателен В.В. Заике за предоставленный для работы материал и информацию по амфибионтам.

Исследование поддержано Программой фундаментальных научных исследований (ФНИ) государственных академий наук на 2013–2020 гг., проект VI.51.1.7. (АААА-А16-116121410123-1).

Литература

- Adler P.H., Crosskey R.W. 2016. World blackflies (Diptera: Simuliidae) a comprehensive revision of the taxonomic and geographic inventory // 126 p. URL: <http://www.clemson.edu/cafls/biomia/pdfs/blackflyinventory.pdf>
- Allan J.D. 1987. Macroinvertebrate drift in a rocky mountain stream // *Hydrobiologia*. Vol.144. No.3. P.261–268.
- Allan J.D. 2004. Landscapes and riverscapes: influence of land use on stream ecosystems // *Annual Review of Ecology and Systematics*. Vol.35. P.257–284.
- Bakanov A.I. 2000. [The use of zoobenthos for monitoring freshwater reservoirs (review)] // *Biologiya vnutrennih vod*. No.1. P.68–82. [In Russian].
- Bogatov V.V. 1994. [Ecology of river communities of Russian Far-East]. Vladivostok: Dalnauka. 218 p. [In Russian].
- Buss D.F., Carlisle D.M., Chon T.S., Culp J., Harding J. S., Keiser-Vlek H.E., Hughes R.M. 2014. Stream biomonitoring using macroinvertebrates around the globe: a comparison of large-scale programs // *Environmental Monitoring and Assessment*. Vol.187. No.1. P.4132–138.
- Chertoprud M.V. 2006. [Analysis of life forms of rheophilic macrobenthos: a new approach to community classification] // *Zhurnal Obshchei Biologii*. Vol.67. No.3. P.190–197. [In Russian].
- Clements W.H., Carlisle D.M., Lazorchak J.M., Johnson P.C. 2000. Heavy metals structure benthic communities in Colorado Mountain streams // *Ecological Applications*. Vol.10. No.2. P.626–638.
- Courtney L.A., Clements W.H. 2002. Assessing the influence of water and substratum quality on benthic macroinvertebrate communities in metal-polluted stream: an experimental approach // *Freshwater Biology*. Vol.47. P.1766–1778.
- Engelmann H.-D. 1978. Zur Dominanzklassifizierung von Bodenarthropoden // *Pedobiologia*. Bd.18. S.378–380.
- Geocological state of Environment in surroundings of Kyzyl-Tashtyg polymetallic deposit (Tuva). 2012. Kyzyl: TuvIENR SB RAS. 178 p. http://www.ipc-publisher.ru/monographs.aspx?id_mn=11. [In Russian].
- Gerasimov I.P., Kamanin L.G., Likhanov B.N. 1964. [Central Siberia]. M.: Nauka. 250 p. [In Russian].
- Illies J., Botosaneanu L. 1963. Problems et methodes de la classification et de zonation cologique des eaux courantes, considerees surtout du point de vue faunistique // *Mitteilungen, Internat. Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, Stuttgart. No.12. S.1–57.
- Malmqvist B., Adler P.H., Kuusela K., Merritt R.W., Wotton R.S. 2004. Black flies in the boreal biome, key organisms in both terrestrial and aquatic environments: a review // *Ecoscience*. Vol.11. P.187–200.
- Malmqvist B., Holffsten P.O. 1999. Influence of drainage from old mine deposits on benthic macroinvertebrate communities in central Swedish streams // *Water Research*. Vol.33. No.10. P.2415–2433.
- de Moor F.C., Ivanov V.D. 2008. Global diversity of caddisflies (Trichoptera: Insecta) in freshwater // *Hydrobiologia*. Vol.595. P.393–407.
- Patrusheva V.D. 1982. [Blackflies of Siberia and the Far East]. Novosibirsk: Nauka. 320 p. [In Russian].
- Petrozhitskaya L.V. 2013. [Spatial and typological characteristics of black fly communities (Diptera, Simuliidae) in Eastern Tuva] // *Evrasiatskii Entomologicheskii Zhurnal (Euroasian Entomological Journal)*. Vol.12. No.5. P.506–514. [In Russian].
- Petrozhitskaya L.V., Matafonov P.V. 2016. Blackflies (Diptera, Simuliidae) in Eastern Trans-Baikal: taxonomic composition and physiographic distribution // *Inland Water Biology*. Vol.9. No.3. P.217–225.
- Petrozhitskaya L.V., Rodkina V.I. 2002. [The structure of the communities and spatial distribution of blackflies (Diptera: Simuliidae) in the watercourses of the basin Abakan River] // *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*. Vol.9. No.3. P.371–376. [In Russian].
- Petrozhitskaya L.V., Rodkina V.I. 2007. The fauna and distribution of black flies (Diptera, Simuliidae) in rivers of the South-Eastern Altai Mountains // *Entomological Review*. Vol.87. No.6. P.677–684.
- Petrozhitskaya L.V., Rodkina V.I. 2009a. The spatial distribution of black flies (Diptera, Simuliidae) in the basin of the of the Sema mountain river in the North Altai mountain region // *Inland Water Biology*. Vol.2. No.1. P.33–41.
- Petrozhitskaya L., Rodkina V. 2009b. Relationship between blackfly (Diptera: Simuliidae) distribution in the Sema river basin (North Altai) // *Acta Zoologica Lituanica*. Vol.19. No.4. P.289–294.
- Petrozhitskaya L.V., Rodkina V.I., Zaika V.V. 2010. Distribution of amphibiotic insects of different trophic groups in mountainous and steppe rivers of Western Tuva // *Inland Water Biology*. Vol.3. No.2. P.126–134.
- Petrozhitskaya L.V., Rudneva L.V. 2000. [Drift of larvae of Dipterous insects in a mountainous watercourse of the Altai] // *Sibirskii Ekologicheskii Zhurnal*. Vol.7. No.4. P.439–443. [In Russian].

- Semenchenko V.P. 2004. [Principles and systems of bioindication in running waters]. Minsk.: Orekh. 125 p. [In Russian].
- Shitikov V.K., Rosenberg G.S., Zinchenko T.D. 2003. [Quantitative hydroecology: methods of system identification]. Toliatti: Institute of Ecology of Volga basin RAS. 463 p. [In Russian].
- Shubina V.N. 2006. [Benthos of salmon rivers of the Urals and Timan]. Sankt-Peterburg: Nauka. 401 p. [In Russian].
- Statzner B., Higler B. 1985. Questions and comments on the river continuum concept // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. Vol.42. P.1038–1044.
- Tiunova T.M., Bazova N.V. 2015. [To the fauna of mayflies (Insecta, Ephemeroptera) of Baikal Lake basin] // Evraziatskii Entomologicheskii Zhurnal (Euroasian Entomological Journal). Vol.14. No.1. P.79–92. [In Russian].
- Thorp J.H., Thoms M.C., Delong M.D. 2006. The riverine ecosystem synthesis: biocomplexity in river networks across space and time // River Research and Applications. No.22. P.123–147.
- Vinogradov V.V. 2011. [Spatial-temporal organization of small mammalian communities in the Yenisei part of the Altai-Sayan mountainous country]. Avtoref. diss. ... doct. biol. nauk. Novosibirsk. 43 p. [In Russian].
- Water quality standards for water bodies of fishery importance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters, water bodies of fishery significance. 2010. // Prikaz Federal'nogo agentstva po rybolovstvu ot 18 yanvarya 2010 g. No.20. [In Russian].
- Waters T.F. 1972. The drift of stream insects // Annual Review of Entomology. Vol.17. P.253–272.
- Wright I.A., Ryan M.M. 2016. Impact of mining and industrial pollution on stream macroinvertebrates: importance of taxonomic resolution, water geochemistry and EPT indices for impact detection // Hydrobiologia. Vol.772. P.103. doi:10.1007/s10750-016-2644-7.
- Yankovsky A.V. 2002. [A key for the identification of blackflies (Diptera, Simuliidae) of Russia and adjacent countries (former USSR)]. Sankt-Peterburg: Zoological Institute RAS. 570 p. [In Russian].
- Yanygina L.B. 2012. [Ecological consequences of the activities of mining enterprises for the bottom communities of the Altai watercourses] // Vestnik Kazhstanskogo Nacional'nogo universiteta. Seriya ekologicheskaya. Vol.33. No.1. P.216–219. [In Russian].

Поступила в редакцию 16.3.2018