НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 3, с. 43–51 **http://www.izdatgeo.ru**

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ КРИОЛИТОЗОНЫ

УДК 551.34

РАЗНООБРАЗИЕ ТАЛИКОВ РЕЧНЫХ ДОЛИН И ИХ СИСТЕМАТИЗАЦИЯ

В.М. Михайлов

Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция Института мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, 685024, Магадан, ул. Гагарина, 12, Россия, svnims@mail.ru

Исследования последних лет показали, что разнообразие таликов речных долин выходит далеко за рамки даже наиболее разветвленных классификаций. В первую очередь это относится к таликам, существующим за счет конвективного переноса тепла. Для учета различий в фильтрационном потоке выделены две составляющие. Одна из них (основная) обеспечивает перенос тепла от его источника и имеет решающее значение для самого существования талика, другая (вторичная) влияет в основном на интенсивность перераспределения тепла в толще горных пород, определяя размеры талой зоны. Предложена расширенная типизация гидрогенных таликов речных долин, представляющая собой развитие схемы С.М. Фотиева; намечены наиболее актуальные направления дальнейших исследований, ориентированных на выяснение связи мерзлотных условий в долинах с геологической деятельностью рек.

Гидрогенные талики, классификация, речные долины, подземные воды, фильтрация, конвективный теплообмен, водообмен

DIVERSITY AND SYSTEMATIZATION OF TALIKS IN RIVER VALLEYS

V.M. Mikhailov

North-Eastern Permafrost Research Station, P.I. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 685000, Magadan, Gagarina str., 12, Russia, svnims@mail.ru

The results of recent researches have shown that diversity of taliks in river valleys goes far beyond the limits of the most branched classifications. This refers mainly to taliks that exist due to convective heat exchange. To account for the distinctions, two constituents of groundwater flow are marked out, the primary and the secondary ones. The first provides heat transfer from its source and so has a crucial significance for the very existence of a talik; the other one influences mostly the intensity of heat redistribution in a rock mass, determining the dimensions of a thawed zone. An extended typification of hydrogenous taliks of river valleys is based on the scheme by S.M. Fotiev. The most relevant courses of further researches are outlined in order to reveal the influence of rivers' geological activity upon the permafrost conditions in valley bottoms.

Hydrogenous taliks, classification, river valleys, groundwater, seepage, convective heat exchange, water exchange

ВВЕДЕНИЕ

Систематизация таликов в середине прошлого века пережила период весьма интенсивного развития: если М.И. Сумгин [*1937*] выделял лишь две категории таликов, то в наиболее разветвленных схемах С.М. Фотиева [*1978*] и Н.Н. Романовского [*1983*] насчитываются десятки элементов низших рангов. Попыток дальнейшего совершенствования этих классификаций либо создания альтернативных не было. Это вполне понятно, так как до недавнего времени обе они, хотя и с несколько разных позиций, достаточно полно отражали все разнообразие уже изученных таликов.

В результате исследований последних лет выяснилось, что талики речных долин, в обеих схемах имеющие низкие таксономические ранги (по С.М. Фотиеву – водопроводящие первого вида, по Н.Н. Романовскому – грунтово-фильтрационные пойменные) обладают значительным разнообразием, сильно различаясь по целому ряду характеристик, в первую очередь гидрогеологических и теплофизических. Подобные талики широко распространены на северо-востоке Азии [*Михайлов, 1998*]. Достаточно отметить, что только в пойме р. Колыма они занимают тысячи квадратных километров; это намного больше, чем суммарная площадь всех таликов бассейна, относящихся к иным категориям. Таким образом, назрела необходимость систематизации накопившихся в настоя-

© В.М. Михайлов, 2010

щее время сведений об особенностях движения переносящих тепло подземных вод и о соответствующих величинах теплооборотов и разработки на этой основе более детальной типизации таликов, учитывающей различия внутри вышеупомянутых таксонов. Решение этой задачи составляет основную цель работы. Кроме того, последовательный анализ новых данных позволяет устранить противоречия в толковании различными авторами механизмов формирования и гидрогеологических особенностей некоторых категорий таликов, лучше понять степень их разнообразия и основные закономерности распространения. Он необходим также для выделения наиболее актуальных и перспективных направлений дальнейших исследований.

Основное различие классификаций С.М. Фотиева и Н.Н. Романовского состоит в том, что в первой из них подробная типизация гидрогенных таликов вынесена за рамки общей схемы. Такой подход представляется целесообразным, поскольку основные отличительные признаки, использованные автором (природные воды, служащие источником тепла, и направление движения подземных вод), специфичны именно для таких таликов. Он тем более оправдан при учете более тонких гидрогеологических и теплофизических особенностей. Поэтому обсуждаемая ниже типизация таликов речных долин по сути является развитием соответствующей схемы С.М. Фотиева.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ТИПИЗАЦИИ

По характеру теплового взаимодействия подземных вод и мерзлых пород С.М. Фотиев [*1978*] выделил два основных типа гидрогенных таликов: водно-тепловые и водно-химические, существующие при отрицательных температурах подземных вод и горных пород. В речных долинах дальнейшее подразделение обоих типов идентично; отличие заключается в величинах теплооборотов, уменьшающихся с ростом минерализации воды. По отношению к мерзлым толщам различают помимо таликов, открытых в сторону дневной поверхности, межмерзлотные и внутримерзлотные талики [*Романовский, 1983*], по С.М. Фотиеву [*1978*] – “внутренние”. В настоящей работе рассматриваются открытые водно-тепловые талики, специфичные для речных долин, т. е. так или иначе связанные с водотоками. Именно такие талики имеют преимущественное распространение на большей части территории сплошной криолитозоны; на северо-востоке Азии их преобладание становится подавляющим. В дальнейшем под поперечными размерами таликов подразумеваются величины, измеренные на дневной поверхности. Это позволяет избежать, во-первых, неопределенностей, возникающих в тех случаях, когда талые зоны ограничены либо частично перекрыты маломощными козырьками многолетнемерзлых пород (ММП); во-вторых, излишнего (на современном этапе) умножения выделяемых таксонов.

Главное нововведение предлагаемой типизации (см. таблицу) состоит в том, что в потоке под-

Расширенная типизация таликов речных долин

Вид талика	Природные воды, служащие источником тепла	Составляющие фильтрационного потока		Механизм передачи тепла	Положение в долине
		Основная	Вторичная		
1	Речные	–	–	Кондуктивный	Подрусловые
2	Речные	НД	а – нет, б – СГД	Конвективный и кондуктивный	Подрусловые
3	Речные	СГЦ	–	Конвективный и кондуктивный	Пойменные
4	Речные	СГЦ	СВЦ, а – в коренных породах, б – в аллювиальных отложениях	Конвективный	Пойменные
5	Речные	СГЦ	СВЦ	Конвективный	Пойменно-террасовые
6	Речные	СГЦ	СВЦ	Конвективный	Внутренних дельт и конусов выноса
	Дождевые	НД			
7	Речные	СГЦ	–	Конвективный	Прирусловые
	Дождевые	НД			
8	Подмерзлотные	ВД	–	Конвективный и кондуктивный	Ассоциированные
9	Подмерзлотные	ВД	СГД	Конвективный и кондуктивный	Автономные

Примечание. ВД – восходящее движение, НД – нисходящее движение, СГД – субгоризонтальное движение, СВЦ – субвертикальная циркуляция, СГЦ – субгоризонтальная циркуляция.

земных вод выделены две составляющие – основная и вторичная. Необходимость такого подхода следует из результатов предыдущих исследований. Было показано, что наиболее обширные водопроводящие талики формируются за счет интенсивного тепло- и массообмена между руслами и пойменными массивами [*Михайлов, 1998*]. Он сосредоточен преимущественно в субгоризонтальной плоскости, в маломощном слое, обладающем резко повышенной водопроницаемостью [*Михайлов, 1999*]. Конвективный тепломассоперенос в вертикальном направлении развивается лишь при определенных условиях. Он способствует усилению оттока тепла от речных русел и существенному увеличению поперечных размеров таликов, на которых при этом формируются специфические геосистемы [*Михайлов, 2003б*]. Ключевым фактором, обусловливающим эти отличия, является развитие в фильтрационном потоке достаточно мощной субвертикальной циркуляции. Она носит подчиненный характер как в гидродинамическом отношении (будучи обусловлена общим движением подземных вод по уклону долины), так и в теплофизическом смысле (способствует усиленному перераспределению вглубь тепла, поступающего из русла в субгоризонтальной плоскости). Поэтому в данном случае в фильтрационном потоке основной составляющей следует считать субгоризонтальную циркуляцию, вторичной – субвертикальную. В таликах других категорий имеются свои особенности переноса тепла подземными водами, которые будут подробно рассмотрены ниже. Если вторичная составляющая отсутствует либо практически не влияет на характеристики талика, то в соответствующей графе таблицы поставлен прочерк; для первой из рассматриваемых категорий роль конвективного теплообмена пренебрежимо мала.

В дополнение к ведущим факторам (источник тепла и особенности циркуляции подземных вод) в таблице указаны механизмы, определяющие существование талика и его размеры. Если кондуктивный перенос тепла незначителен, т. е. в том же направлении действует более эффективный конвективный механизм, то в таблице он не отмечен.

Большое разнообразие таликов речных долин, а следовательно, и классификационных признаков, использованных в расширенной типизации, не позволяет адаптировать к ней выразительные термины, введенные С.М. Фотиевым [*1978*]. Более подробно вопросы терминологии обсуждаются в заключении; в последующем изложении будут использоваться порядковые номера, соответствующие (условно) видам таликов. Здесь следует лишь отметить, что виды 3–5 соответствуют водопроводящим, виды 2, 6 – водопоглощающим, виды 8, 9 – водовыводящим таликам.

Почти все указанные в таблице виды таликов подразделяются далее на сквозные и несквозные, а также (по С.М. Фотиеву) на первичные и вторичные. Эти различия для целей настоящего исследования не принципиальны и в таблице для упрощения не отражены.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В ГИДРОГЕННЫХ ТАЛИКАХ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ

Последовательность изложения в данном разделе определяется изученностью отдельных категорий таликов, а также возможностью привести количественные оценки величин теплооборотов по литературным источникам либо по результатам предыдущих исследований. Поэтому талики вида 7 рассматриваются в конце раздела, после видов 8 и 9.

Вид 1. При анализе закономерностей формирования таликов этого вида следует учитывать, что, хотя конвективный теплоперенос при движении грунтовых вод происходит не только вдоль фильтрационного потока, но и в поперечном направлении (за счет обтекания частиц грунта), роль этого процесса, как правило, пренебрежимо мала. Увеличение интенсивности передачи тепла по сравнению с чисто кондуктивным механизмом становится заметным лишь при скоростях фильтрации порядка первых метров в час [*Перльштейн, 1979*]. Поэтому при отсутствии мощных восходящих либо нисходящих потоков подземных вод подрусловые талики существуют почти исключительно за счет кондуктивного теплообмена: при интенсивной фильтрации по общему уклону долины талик неизбежно распространился бы в пойму реки. В действительности подрусловые талики могут быть даже у́же русел вследствие формирования ММП на мелководных прибрежных участках [*Карпов, 1986*]. Локально и в отдельные фазы гидрологического режима в таликах этого вида может действовать довольно значительный конвективный перенос тепла, не оказывающий существенного влияния на термический режим горных пород. Так, в работе [*Wankievicz, 1984*] описан интенсивный прогрев трехметрового слоя подрусловых отложений в межень за счет большого перепада уровней воды в двух смежных плесах и усиленной фильтрации воды от верхнего по течению плеса к нижнему. При этом на глубинах более 1/3 ширины русла влияние данного процесса нивелировалось и слабоградиентное распределение низких положительных температур оставалось практически неизменным.

Вид 2. В условиях, способствующих поглощению речных вод, талики могут формироваться не только под крупными реками, но и под водотоками низких порядков, в том числе перемерзающи-

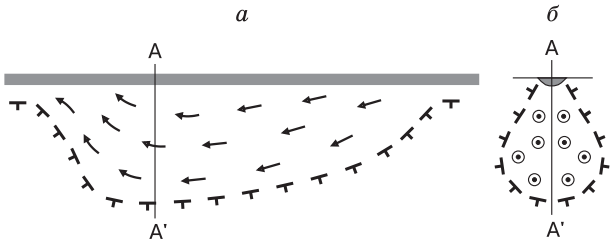

Рис. 1. Конфигурация водопоглощающих таликов вида 2(б) и движение в них подземных вод:

а – продольный разрез вдоль русла реки; *б* – поперечный разрез.

ми и даже периодически пересыхающими. Инфильтрация (инфлюация) происходит по карстовым полостям или разрывным нарушениям в коренных породах либо в толщу рыхлых отложений с резко повышенной мощностью. Наиболее существенные внутривидовые различия связаны с тем, являются ли талики сквозными или нет (рис. 1), поэтому целесообразно выделять два подвида – 2(а) и 2(б).

Талики подвида 2(а) упоминаются во многих источниках; с теоретических позиций условия их формирования наиболее подробно рассмотрены в работе [*Кудрявцев и др., 1974*]. Они играют значительную роль в питании подземных вод глубокой циркуляции и, по-видимому, намного более многочисленны по сравнению с таликами подвида 2(б), однако сведений о натурных исследованиях таких таликов, по существу, нет. Несомненно, что их поперечные размеры зависят от ряда факторов, среди которых доминируют геологические, определяющие интенсивность поглощения поверхностных вод (например, густота и раскрытие трещин в коренных породах и т. п.). Площадь таликов подвида 2(а) не может быть велика, так как противостоять промерзанию способен лишь сосредоточенный, компактный нисходящий поток; при этом тепловой потенциал речных вод крайне редко используется полностью (в тех случаях, когда температура в потоке, непосредственно на уровне подошвы многолетнемерзлых пород, неизменно равна 0 °С).

Талики подвида 2(б) подробно изучены С.Н. Булдовичем с соавт. [*1991*] в бассейне р. Кувет. Они “имеют, как правило, форму вытянутых ванн... Ширина их достигает первых сотен метров при длине до 1–2 км” [*Булдович и др., 1991, с. 61*], т. е. эти талики намного крупнее описанных выше. В поперечном разрезе они имеют грушевидную форму и на дневной поверхности не выходят за пределы русел (в приведенной цитате, по-видимому, имеется в виду максимальная ширина). Авторами были исследованы как замкнутые (выклинивающиеся в нижней оконечности) талики данного вида, так и открытые, т. е. соединяющиеся с аналогичными таликами более крупных рек. В нижней части замкнутого талика подземные воды, отдав горным породам часть своей тепловой энергии, вытесняются обратно в русло реки (см. рис. 1); показано, что при отсутствии литологического контроля подобные талики способны мигрировать вверх по долинам.

Вид 3. Талики этого и последующих трех видов развиваются, прежде всего, благодаря формированию в слое аллювия нормальной мощности многочисленных предпочтительных путей фильтрации, в которых крупнообломочный материал почти полностью лишен мелкозернистого заполнителя [*Михайлов, 1999*]. Вследствие чрезвычайно высокой эффективной проницаемости этого слоя, измеряемой сотнями метров в час, в поймах развивается интенсивный тепло- и массообмен, и в целом за теплый сезон реки отдают вмещающим горным породам до 1000 МДж и более с 1 м^2 водной поверхности. В пересчете на единицу площади таликов вида 3 поступление тепла за счет этого механизма составляет многие десятки МДж/м^2 и зачастую становится ведущей приходной статьей теплового баланса [*Михайлов, 2008б*].

Столь интенсивный прогрев грунтов намного превосходит уровень, необходимый для поддержания талика, и его ширина ограничена исключительно геологическими факторами, в первую очередь поперечными размерами области, в которой развиты предпочтительные пути фильтрации (рис. 2, *а*) и осуществляется конвективный тепло-

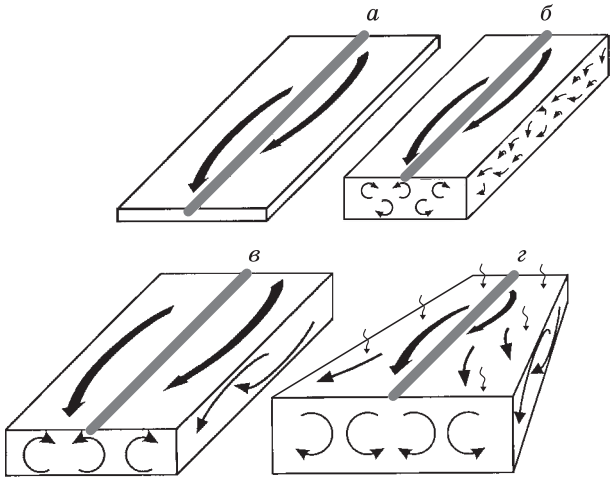

Рис. 2. Циркуляция подземных вод в области развития конвективного тепломассопереноса таликов различных видов:

а – вид 3; *б* – вид 4; *в* – вид 5; *г* – вид 6 (заливкой выделены отложения террас). Стрелки по мере уменьшения размера соответствуют следующим видам движения подземных вод: основная циркуляция в субгоризонтальной плоскости – вторичная циркуляция (субвертикальная, менее интенсивная в таликах вида 4; дивергентная составляющая в таликах вида 6) – инфильтрующиеся воды атмосферного происхождения.

массоперенос. У водотоков VI и более высоких порядков (по системе Хортона–Штралера) эта область в плане обычно совпадает с отчетливо выраженным поясом русловых переформирований. За ее пределами отложения поймы, длительное время оставаясь неподвижными, постепенно утрачивают высокие фильтрационные свойства, заиливаются и промерзают. Нижняя граница области проходит по кровле плотикового (в переуглубленных долинах ложноплотикового) аллювия, еще более подверженного заиливанию. Вертикальные размеры очень малы по отношению к ширине (во много сотен раз), и даже у крупнейшей реки региона Колымы в основном не превышают 10 м. Глубже, как и в случае подруслового талика вида 1, из-за низкой проницаемости отложений прогрев грунтов происходит в основном за счет теплопроводности. Поэтому мощность талика вида 3 определяется, при прочих равных условиях, его поперечными размерами, которые намного превышают ширину русла в межень (в среднем примерно в 8–12 раз). Очевидно, что талая зона представляет собой единое образование и выделять в ней, как это иногда делается, подрусловой талик в принципе неправильно. Аналогичной точки зрения придерживался И.А. Некрасов: "...при каких условиях происходит резкое расширение таликов, когда талики выходят за пределы русла и прируслового поймы, пока не выяснено" [*Некрасов, 1967, с. 27*].

Продольные размеры таликов вида 3 определяются наличием в разрезе прослоев хорошо фильтрующих галечников, т. е. в конечном счете геологическими факторами, подробно рассмотренными в работе [*Михайлов, 1999*]. В благоприятных условиях талики протягиваются вниз по долинам на сотни километров, перемежаясь с таликами видов 4–6, которые формируются как бы "на фоне" вида 3 и намного более ограничены по длине.

Водообмен таликов вида 3 с реками носит двусторонний характер: в каждом поперечном сечении поймы развиваются, как правило, и высачивание грунтовых вод в русло, и инфильтрация речных вод в аллювий (на рис. 2, *а* картина сильно схематизирована). На отдельных участках долины преобладание одного из двух процессов может быть весьма значительным. Так, в ручье Контактовый (III порядка, с надмерзлотным таликом) расходы воды в летнюю межень уменьшаются в 4–4,5 раза на расстоянии менее 500 м. Тем не менее даже в таких случаях главная роль в теплообмене принадлежит взаимно компенсирующимся составляющим расходов инфильтрации и высачивания [*Михайлов, 2002*]. Поэтому подобные талики (так же как и два последующих вида) должны быть отнесены (по С.М. Фотиеву [*1978*]) к категории водопроводящих, тем более, что алгебраическая сумма этих расходов часто меняет знак вниз по долине.

Вид 4. Непременным условием формирования таликов этого вида, как и рассмотренного выше, служит интенсивный конвективный теплообмен в субгоризонтальной плоскости. Но в данном случае в горных породах пойм развивается также значительный субвертикальный тепломассоперенос (см. рис. 2, *б*). Это становится возможным в силу одной из двух причин. Первая – омоложение зоны тектонического нарушения, по которой заложена долина реки. Вторая – очень быстрое накопление в долине аллювия повышенной мощности, при котором прослои заиленных галечников формироваться не успевают. Соответственно, формируются два подвида таликов – 4(а) и 4(б). Их объединяет то, что "сверхпроницаемый" слой аллювия подстилается горными породами, также обладающими относительно высокой водопроницаемостью. Неоднородность фильтрационных свойств этих пород при их большой мощности является причиной того, что движение грунтовых вод по уклону долины сопровождается развитием восходящих и нисходящих токов, многократно усиливающим прогрев глубинных слоев.

Процессы, приводящие к трансформации таликов из вида 3 в вид 4, обусловливают увеличение ширины поймы, пояса русловых переформирований, а следовательно, и талой зоны [*Михайлов, 2003б*]. Это обстоятельство, наряду с развитием тепломассопереноса в вертикальном направлении, способствует деградации многолетней мерзлоты в долинах небольших водотоков вплоть до IV, иногда до III порядков.

Вид 5. Генезис таликов этого вида практически тот же, что и подвида 4(б); разница состоит в том, что они распространяются далеко за пределы пойм – до второй надпойменной террасы включительно (см. рис. 2, *в*). Вероятно, это связано с особо интенсивным накоплением аллювия и формированием в этой фазе развития гипертрофированно широких пойм (которые обычны на северовостоке Азии [*Михайлов, 2008а*]). При переходе реки в стадию динамического равновесия пойма сужается и занимает более низкое гипсометрическое положение, так что бывшие окраинные участки становятся низкими надпойменными террасами. Но аллювиальные отложения в них сохраняют высокие фильтрационные свойства и, несмотря на относительное понижение уровня грунтовых вод, по-прежнему получают от рек значительные количества тепла, достаточные для поддержания талого режима. Аналогично видам 3 и 4 эти талики представляют собой единые образования, отдельные участки которых приурочены к различным элементам речных долин, от русел до низких надпойменных террас.

Инструментальные исследования конвективного теплообмена таликов видов 4 и 5 с водотоками проводились в ряде долин II–IV порядков

[*Михайлов, 2003а*]. Полученные оценки теплового потока в горные породы в одинаковых условиях (устойчивая ясная погода в середине лета) оказались в среднем примерно в 1,5 раза больше, чем в таликах вида 3, что вполне согласуется с качественными различиями, которые обсуждались выше. По-видимому, в близкой пропорции соотносятся и суммарные теплообороты, но при этом количество тепла, приходящееся на единицу площади намного более широких таликов видов 4 и 5, становится меньше по сравнению с видом 3, хотя и остается существенно избыточным.

Теоретические оценки показывают, что талики видов 3–5 могли бы существовать при значительно меньшем поступлении тепла от водотоков. Тем не менее многочисленные конкретные расчеты дают близкие величины, сильно превышающие минимально необходимые значения. Вероятно, аллювиальные отложения, высокие фильтрационные свойства которых хорошо выражены по простиранию и по глубине, в природе встречаются достаточно редко.

Вид 6. Талики этого вида замыкают ряд генетически сходных образований, начатый видом 3. В плане они приблизительно повторяют очертания соответствующих геоморфологических элементов и по отношению к сформировавшим их водотокам имеют наибольшие поперечные размеры и наименьшую длину. По рельефу поверхности шестой вид намного ближе не к пятому (также отличающемуся большой шириной), а к подвиду 4(б), так как при переходе в стадию динамического равновесия пояс русловых переформирований не изменяет своего гипсометрического положения (во всяком случае у изученных рек). Так, в средней части континентальной дельты р. Буюнда, где ширина талика более 14 км [*Михайлов, Банцекина, 2001*], отметки поверхности по мере удалении от реки варьируют в целом в тех же пределах, что и внутри этого пояса.

Одна из двух отличительных черт таликов вида 6 состоит в том, что вниз по течению вследствие расширения области с повышенными фильтрационными свойствами отложений расход подземного потока неизменно и существенно возрастает за счет русловых вод (см. рис. 2, *г*). Небольшие водотоки в межень нередко полностью впитываются в отложения своих конусов выноса. Таким образом, налицо качественное отличие от трех предыдущих видов, и по терминологии С.М. Фотиева [*1978*] талики вида 6 следует относить к водопоглощающим. На оконечности таликов грунтовые воды выклиниваются на дневную поверхность, образуя слабопроточные болота и разнокалиберные ручьи и речки, либо сливаются с мощными подземными потоками более крупных таликов.

Естественно полагать, что в таликах данного вида, где поперечные размеры области с интенсивной циркуляцией грунтовых вод предельно велики, конвективный теплообмен также достигает максимальной интенсивности. Но количество тепла, которое может отдать река, ограничено, поэтому его поступление на единицу площади талика (Q_f), наоборот, достигает минимума и становится сравнимым с теплом, приносимым инфильтрующимися осадками (Q_{inf}). Для крупнейшей талой зоны в континентальной дельте р. Буюнда оценка снизу суммы $Q_f + Q_{inf}$ составляет всего 13 МДж/м^2 [*Михайлов, Банцекина, 2001*], из которых вклад второго слагаемого равен 4–5 МДж/м^2.

Дождевые воды, инфильтруясь в грунт, вначале образуют самостоятельный нисходящий поток, переносящий тепло в нижние горизонты зоны аэрации (мощность которой достигает 7 м, вероятно, и более), затем сливаются с субгоризонтальным основным подземным потоком. Последний, так же как и в таликах видов 4 и 5, формирует вторичную субвертикальную циркуляцию на фоне плановой дивергенции. На оконечности талика, если он не соединяется с более обширной талой зоной, фильтрационный поток расходует практически весь запас тепла; в этом усматривается сходство с подвидом 2(а).

Поскольку условия зимнего охлаждения и промерзания верхних горизонтов пород в талике и за его пределами существенно не различаются, приведенное выше значение суммы $Q_f + Q_{inf}$ представляет собой близкую оценку “тепловой добавки”, минимально необходимой для существования талика. Это имеет важное значение для последующего анализа.

Виды 8, 9. Водовыводящим таликам этих видов посвящена обширная литература. Они являются сквозными “по определению”. Несмотря на идентичность ведущих факторов формирования, большинство исследователей проводят между ними четкую грань; по Н.Н. Романовскому [*1983*], они принадлежат даже к разным типам (гидрогенному и гидрогеогенному соответственно). В данной типизации восьмой вид, в котором подземные воды глубокой циркуляции выводятся в существующий независимо от них надмерзлотный талик, назван ассоциированным. Седьмой вид, формирующийся самостоятельно, назван автономным. Именно это различие обусловливает количественную дифференциацию по критическим условиям существования. Согласно теоретическим расчетам И.А. Зуева [*1975*], в первом случае для поддержания таликового режима достаточно, чтобы вынос тепла восходящим фильтрационным потоком был равен 8 МДж/м^2; это подтверждено с использованием данных натурных измерений. Очевидно, что эта величина компенсирует теплопотери через бо-

ковую поверхность талика. Во втором случае, т. е. для противодействия развитию ММП сверху, необходимо дополнительно 16–24 МДж/м^2. Это значение близко к цифре, полученной для таликов вида 6 – с учетом того, что последняя является оценкой снизу и что боковые теплопотери у этих таликов, в пересчете на единицу площади, пренебрежимо малы.

По гидродинамическим и гидротермическим характеристикам вид 8 во многом является как бы зеркальным отражением подвида 2(а). И тот и другой формируются компактным (восходящим/нисходящим) фильтрационным потоком, который смешивается с более мощным субгоризонтальным (над/подмерзлотным) потоком. Следует отметить, что во втором случае есть исключения, т. е. выше по долине подмерзлотный поток отсутствует. Обе категории таликов имеют минимальные плановые размеры; в обеих тепловой потенциал субвертикального потока используется, как правило, не до конца.

Сходную в общем пару представляют вид 9 и подвид 2(б). Их сближает трансформация субвертикального фильтрационного потока в субгоризонтальный, в котором зачастую полностью исчерпывается начальный тепловой потенциал природных вод, служащих источником тепла. Талик вида 9 в тех случаях, когда вынос тепла восходящим фильтрационным потоком намного превышает приведенную выше критическую величину, не ограничен в плане поперечными размерами этого потока, а распространяется вниз по долине, образуя своего рода "таликовый шлейф". Его продольные и поперечные размеры лимитируются, с одной стороны, остатками теплозапасов в подземных водах, движущихся уже по уклону долины, с другой – водопропускной способностью горных пород. По мере удаления от выхода восходящего потока талая зона довольно быстро сужается, но в наиболее крупных таликах (где обычно действуют несколько таких потоков) ее длина может достигать нескольких километров.

Вид 7. Прирусловые талики в существующих классификациях не отделялись от пойменных. Следствием этого была противоречивость литературных сведений о размерах последних: в исследованиях по северо-востоку Азии сообщалось, что они занимают, как правило, всю ширину поймы, тогда как для территорий с более мягкими климатическими условиями обычно отмечалась их приуроченность к низким, ежегодно заливаемым участкам (см., например, [*Шевелева, Хомичевская, 1967; Селиванов, 1971*]). Причина заключается в том, что в действительности были описаны талики разных видов, причем виды 3–6 широко распространены на северо-востоке Азии и сравнительно редко встречаются за пределами этого региона. Интересно отметить, что И.А. Некрасов [*1967*] относил талики седьмого вида не к пойменным, а к подрусловым.

Талики этого вида формируются в аллювии "обычного" сложения, т. е. без предпочтительных путей фильтрации, что резко снижает поступление тепла от рек (по ориентировочным оценкам, оно не превышает первых десятков мегаджоулей с 1 м^2 водной поверхности) и увеличивает потенциальный вклад других источников. В ряде работ большое значение отводится периодическому затоплению низкой поймы. Но половодья и паводки проходят при пониженных температурах речных вод и вряд ли способны существенно усиливать прогрев заливаемых грунтов.

Приведенные выше оценки "тепловой добавки", минимально необходимой для формирования надмерзлотного талика в условиях северо-востока Азии, составляют 24 МДж/м^2 и ниже. Очевидно, что в менее суровых условиях эта величина еще меньше. Поэтому заметная или даже ведущая роль в формировании таликов вида 7 может принадлежать инфильтрации атмосферных осадков, тепловое влияние которых в сопредельном регионе Южной Якутии достигает 20 МДж/м^2 [*Чижов, 1966*]. Эта оценка была получена автором при допущении, что вся влага выпавших осадков просачивается в грунт без потерь на эвапотранспирацию и на некоторой глубине в пределах талика охлаждается до 0 °С. В действительности величина Q_{inf} существенно меньше – около 14 МДж/м^2 [*Михайлов, Банцекина, 2001*]. Тем не менее в сравнительно теплом климате этого оказывается достаточно для формирования таликов на плоских водоразделах и хорошо дренированных надпойменных террасах [*Южная Якутия, 1975*]. На низкой пойме при редуцированном слое мелкозернистого аллювия пойменной фации и разреженном растительном покрове потери на эвапотранспирацию минимальны, поэтому и здесь талики могут существовать только за счет инфильтрации осадков. Оценить роль конвективного теплообмена с реками (скорее всего, развивающегося в процессе берегового регулирования) в количественном отношении не представляется возможным, хотя, судя по ряду признаков [*Фотиев, 1963*], она довольно значительна.

О преимущественном распространении в долинах Южной Якутии не пойменных, а прирусловых таликов можно судить по сведениям о расселении в них деревьев, служащих индикаторами талых зон – чозений и тополей [*Тюлина, 1959, 1962; Щербаков, 1973*]. Имеются также достаточно подробные описания отдельных таликов этого вида (см., например, [*Фотиев, 1963*]). В основном они здесь развиты вдоль водотоков, находящихся в стадии глубинной эрозии, где уклоны долин мак-

симальны и содержание в аллювии мелкозернистых частиц минимально. Наибольших поперечных размеров талики достигают в расширениях долин (подобно описанному в работе [*Фотиев, 1963*]).

На большей части северо-востока Азии даже завышенная оценка Q_{inf} (полученная с допущениями, аналогичными указанным выше) составляет менее 10 МДж/м^2, и существование прирусловых таликов возможно только при поступлении примерно равных количеств тепла от рек. Вероятно, даже такие величины конвективного теплопереноса в аллювии "обычного" сложения достигаются нечасто, поскольку в регионе не описан ни один талик, безусловно принадлежащий к этому виду. Вторая причина – небольшая доля водотоков в стадии глубинной эрозии, занимающих менее 30 % протяженности речной сети против 70 % на сопредельной территории Южной Якутии [*Михайлов, 2001*].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключительном разделе необходимо, прежде всего, вернуться к вопросам терминологии. В классификациях С.М. Фотиева [*1978*] и Н.Н. Романовского [*1983*] полное название каждого вида таликов построено однотипно, отражая и механизмы их формирования, и положение в долине. Использование аналогичного принципа при увеличении числа отличительных признаков приведет к созданию весьма громоздких словосочетаний. К тому же, различия между отдельными видами имеют разную природу (например, 8 и 9; 5 и 6), что делает невозможным построение идентичных конструкций. Поэтому подобный подход вряд ли приемлем. Разумеется, неудобно и использование цифровых обозначений. Вероятно, целесообразно вообще отказаться от унифицированной терминологии и исходить исключительно из соображений полноты и краткости, с учетом сложившейся практики. Тогда талики видов 8 и 9 следует называть напорно-фильтрационными, соответственно ассоциированными и автономными. Для всех остальных видов основной (для видов 5–7 и единственной) характеристикой служит положение в долине, а в качестве уточняющей указывается присущая только данному виду особенность движения подземных вод. Наиболее развернутые названия имеют талики видов 2 и 4 (например, 4(а) – пойменные с субвертикальной циркуляцией грунтовых вод в трещинах коренных пород).

Приведенная таблица включает все описанные в литературе категории и разновидности таликов речных долин (с оговорками, изложенными в начале статьи). В ней учтены, на уровне современных представлений, все возможные комбинации основных факторов их формирования (сочетания характерных особенностей движения подземных вод и основных источников тепла). В данном отношении принципиальные модификации маловероятны. Вместе с тем не до конца понятна относительная роль этих факторов для таликов вида 7; остается открытым вопрос о возможности формирования пойменных таликов при меньшей интенсивности конвективного теплообмена по сравнению с видом 3 (у которого он больше необходимой величины в несколько раз).

Ландшафтное разнообразие таликов, скорее всего, намного шире, чем известно на сегодняшний день. Формирование в аллювиальных отложениях предпочтительных путей фильтрации, а следовательно, и таликов видов 3–6 закономерно связано с определенным типом русловых процессов, внешне выраженным в ветвлении русла на рукава [*Михайлов, 1999*]. В пределах относительно опускающихся блоков земной коры многие ветвящиеся реки из-за уменьшения уклонов долин трансформируются в меандрирующие. Этот процесс занимает длительное время, о чем свидетельствует довольно широкое распространение переходных типов (относительно прямолинейные и разветвленно-извилистые русла). По-видимому, талики при этом сокращаются в размерах и в конечном счете переходят в другие категории (вид 1 или 7) либо промерзают. Но, как следует из предыдущего обсуждения, даже при неизменном уклоне долины скорость промерзания окраин талых зон вследствие ослабления водообмена варьирует в очень широком диапазоне; не исключено поэтому, что "реликтовые" пойменные талики могут некоторое время сохраняться и в поймах меандрирующих рек. Вполне вероятно, что в будущем может возникнуть необходимость выделения промежуточных (переходных) категорий таликов. Во всяком случае, проблема индикации таликов речных долин нуждается в самом тщательном изучении, и ключевым звеном при этом должно стать исследование связи мерзлотно-гидрогеологических условий с геологической деятельностью рек.

Считаю своим приятным долгом выразить глубокую признательность профессору С.М. Фотиеву и анонимному рецензенту за ценные советы и замечания, которые помогли существенно улучшить изложение центральных положений данной работы.

Литература

Булдович С.Н., Гарагуля Л.С., Типенко Г.С. и др. Математическое моделирование кондуктивно-конвективного теплопереноса в таликах криолитозоны // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология, 1991, № 5, с. 60–71.

Зуев И.А. Об оценке естественных запасов подземных вод сквозных таликов Северо-Востока в связи с разработкой месторождений и вопросами водоснабжения // Колыма, 1975, № 9, с. 38–40.

Карпов Е.Г. Подземные льды Енисейского Севера. Новосибирск, Наука, 1986, 132 с.

Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Чижов А.Б. Приближенные методы оценки условий существования таликов // Мерзлотные исслед., 1974, вып. 14, с. 81–90.

Михайлов В.М. Некоторые закономерности формирования и распространения пойменных таликов // Проблемы геокриологии: Сб. докл. Якутск, Изд-во СО РАН, 1998, с. 82–87.

Михайлов В.М. Предпочтительные пути движения грунтовых вод в крупнообломочных аллювиальных отложениях // Колыма, 1999, № 4, с. 21–28.

Михайлов В.М. О геологических факторах руслового процесса рек горных стран // Колыма, 2001, № 2, с. 22–27.

Михайлов В.М. Количественные методы индикации пойменных таликов (теоретические предпосылки) // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 1, с. 49–55.

Михайлов В.М. Гидротермический режим водотоков как индикатор существования грунтово-фильтрационных таликов (по результатам натурных исследований) // Криосфера Земли, 2003а, т. VII, № 2, с. 57–66.

Михайлов В.М. О развитии на таликах речных долин безлесных и редколесных геосистем и их индикационной роли // Геоэкология, 2003б, № 5, с. 414–421.

Михайлов В.М. Реки горных сооружений Северо-Востока Азии в стадии направленной аккумуляции // Чтения памяти А.П. Хохрякова: Материалы Всерос. науч. конф. (Магадан, 28–29 окт. 2008 г.). Магадан, Ноосфера, 2008а, с. 261–264.

Михайлов В.М. Сезонная динамика конвективного теплообмена рек с пойменными таликами // Геоэкология, 2008б, № 3, с. 214–221.

Михайлов В.М., Банцекина Т.В. Грунтово-фильтрационный талик в континентальной дельте р. Буюнда (Сеймчано-Буюндинская впадина) // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 2, с. 20–28.

Некрасов И.А. Талики речных долин и закономерности их распространения. М., Наука, 1967, 140 с.

Перльштейн Г.З. Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на Северо-Востоке СССР. Новосибирск, Наука, 1979, 302 с.

Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. М., Изд-во Моск. ун-та, 1983, 232 с.

Селиванов А.А. Геокриологические условия Верхнебуреинской котловины // Геокриологические исследования. Якутск, 1971, с. 112–115.

Сумгин М.И. Вечная мерзлота почв в пределах СССР. Изд. 2-е. М., Изд-во АН СССР, 1937, 380 с.

Тюлина Л.Н. Лесная растительность среднего и нижнего течения р. Юдомы и низовьев р. Маи. М., Изд-во АН СССР, 1959, 224 с.

Тюлина Л.Н. Лесная растительность средней и нижней части бассейна Учура. М.; Л., Изд-во АН СССР, 1962, 149 с.

Фотиев С.М. Сезонное промерзание и протаивание горных пород в южной части Алданского нагорья // Многолетнемерзлые горные породы различных районов СССР. М., Изд-во АН СССР, 1963, с. 31–61.

Фотиев С.М. Гидрогеотермические особенности криогенной области СССР. М., Наука, 1978, 236 с.

Чижов А.Б. Роль конвективного теплопереноса инфильтрующимися атмосферными осадками в формировании мерзлотно-гидрогеологических условий // Мерзлотные исслед., 1966, вып. 5, с. 43–49.

Шевелева Н.С., Хомичевская Л.С. Геокриологические условия Енисейского Севера. М., Наука, 1967, 126 с.

Щербаков И.П. Лесной покров Северо-Востока Азии // Материалы V Всесоюз. совещ. “Биологические проблемы Севера”. Магадан, 1973, с. 185–193.

Южная Якутия. М., Изд-во Моск. ун-та, 1975, 444 с.

Wankievicz A. Hydrothermal processes Beneath Arctic River Channels // Water Resources Res., 1984, vol. 20, No. 10, p. 1417–1426.

Поступила в редакцию
8 сентября 2008 г.