



**Р. Г. Джемалов**  
Институт водных  
проблем Российской  
академии наук

**Т. И. Сафронова**  
Институт водных  
проблем Российской  
академии наук

# Подземный сток Восточной Сибири

и его изменение в XXI веке<sup>1</sup>

*Изучены особенности формирования водных ресурсов Восточной Сибири в условиях нестационарного климата и проведена региональная переоценка и картирование подземного стока этого крупного региона. The singularities of East Siberia water resources forming are analyzed in the terms of time-dependent climate. The regions overestimate and mapping of underground water flow is performed in this large scale region.*

**Ключевые слова:** водные ресурсы, подземные воды, речной и подземный стоки, естественные ресурсы подземных вод.  
**Keywords:** water resources, underground water, river's and underground water flows, natural resources of underground water.

**З**аметное потепление в Восточной Сибири в течение последних десятилетий сопровождается ростом температуры воздуха, некоторым увеличением атмосферных осадков и существенным изменением годовых и сезонных величин подземного и речного стока.

Изучение современных пространственно-временных особенностей формирования речного стока как элемента водного баланса суши дает возможность рассмотреть изменение режима годового и межлетнего стока рек в различных природно-климатических зонах России в связи с глобальными вариациями климата и антропогенным воздействием. Изучение пространственно-временных особенностей формирования подземной составляющей общего речного стока направлено на выявление современных закономерностей питания подземных вод и формирования их естественных ресурсов при существующих климатических условиях и прогнозируемых изменениях климата [2].

Внутригодовое распределение стока чувствительно к изменениям как атмосферных осадков, так и температуры воздуха. При этом важным является не только величина этих изменений, но и сезоны (месяцы) их проявлений. Сток рек внутри года за последние десятилетия имеет более равномерное распределение: максимальный половодный сток ниже, а межлетний (подземный) выше, чем при климатических условиях середины XX века.

Истинно межлетним стоком для рек Восточной Сибири служит зимний сток с ноября по март, когда реки покрыты льдом и в их питании принимают участие только подземные воды. Это дает основание рассчитать естественные ресурсы подземных вод (обеспеченный питанием расход подземного потока) по данным межлетних расходов рек и оценить масштабы

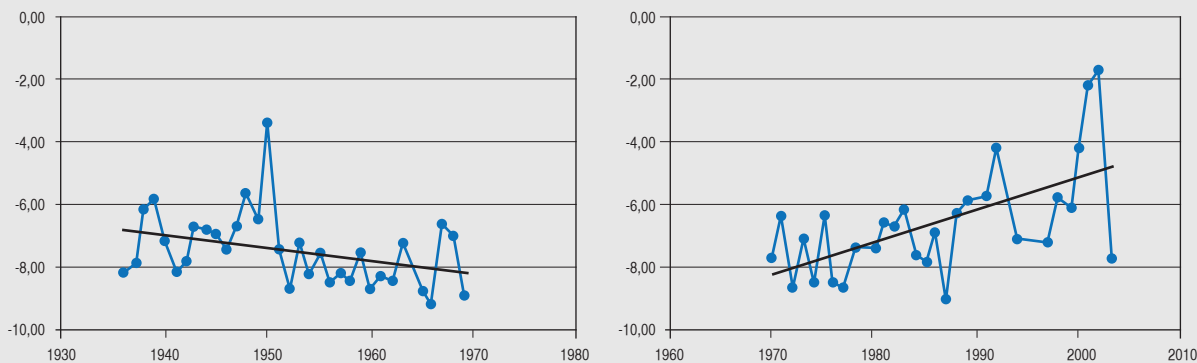
и направленность их изменений за последние годы в связи с климатическими вариациями.

**Влияние изменений климатических условий Восточной Сибири на условия формирования режима поверхностного и подземного стока.**

Средняя скорость потепления для России в 1976-2009 гг. составила 0,47°C/10 лет, в Восточной Сибири и Прибайкалье-Забайкалье — 0,52°C/10 лет. В рекордном 2007 году положительная аномалия составляла 2,1°C. В сравнительно холодном 2009 г. среднегодовая температура воздуха на территории России превысила «норму» 1961-1990 гг. на 0,55°C. Последние 30 лет на всей территории России происходило потепление [3]. Это в совокупности характеризует современные изменения климата с учетом антропогенных воздействий, особенно на территории Якутии. Если изменения среднегодовой температуры за период с 1935 по 2009 г. почти на всех метеостанциях характеризуются положительными линейными трендами, то за период с 1935 по 1970 г. отмечается падение температуры, а с 1970 по 2007 г. ее рост (рис. 1). При этом ход температуры теплого периода не имеет направленных изменений за весь период наблюдений. В то же время температуры холодного периода по всем метеостанциям имеют статистически обоснованный рост с ярко выраженным линейным трендом.

В среднем по России тренд среднегодовых осадков за 1976–2009 гг. составляет 0,85 мм/мес/10лет и свидетельствует об увеличении количества осадков за последние 30 лет. Годовые суммы осадков в 2009 г. превышали норму во всех регионах, особенно в Прибайкалье и Забайкалье. Однако изменение их количества происходит крайне неравномерно и разнонаправленно. По данным одних

**Рис. 1.**  
Графики изменения среднегодовой температуры за периоды 1935–1970 и 1970–2007 гг.



1 Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 08-05-00428, 09-05-92001-ННС), НОЦ (госконтракт 02.740.11.0336).

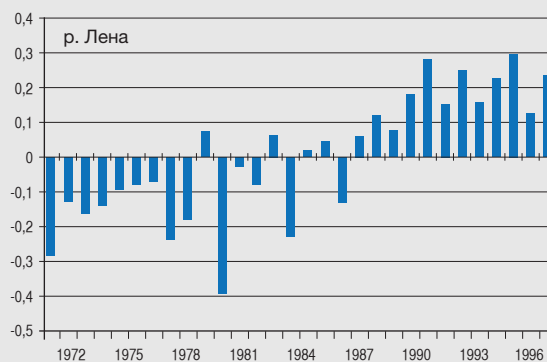
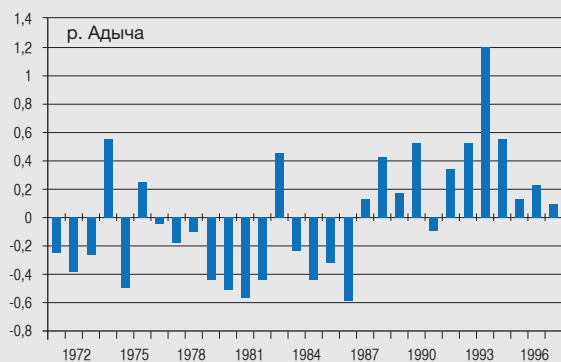
метеостанций, суммы среднегодовых осадков за период 1970–2009 гг. имеют тенденции к увеличению, по другим – к уменьшению [3]. Это обусловлено климатическими, географическими и ландшафтными условиями выпадения осадков конкретного района этой огромной территории.

Характерная особенность Восточной Сибири – практически повсеместное распространение многолетнемерзлых пород (ММП). Мощность ММП в северных и центральных районах достигает 200–500 м. В южных частях (Забайкалье, бассейн верхней Лены) мощность ММП уменьшается, появляются участки переходной и островной мерзлоты с таликами. При сплошном распространении ММП на долю таликов обычно приходится до 5% территории, в зоне переходной мерзлоты – 50%, а при островной – более 80% всей территории [6, 7]. Наиболее распространены подрусловые и подозерные талики. В пределах сплошного развития ММП их температура обычно ниже  $-2,5^{\circ}\text{C}$ . В области прерывистого распространения мерзлой зоны ее мощность снижается до 50 м, температура постепенно возрастает до  $-1^{\circ}\text{C}$ . В пределах островной мерзлой зоны мощность ММП обычно меньше 50 м при их температуре около и выше  $-1^{\circ}\text{C}$ .

Мощность сезонно-талого (деятельного) слоя (СТС) изменяется от 0,5 до 5,0 м, что

определяется широтой местности, физико-географической и геокриологической обстановкой конкретной территории. СТС способствует частичному или полному перераспределению влаги по сезонам года, определяет величину влагозапасов на водосборе, и таким образом деятельный слой служит сезонно-мерзлотным регулятором стока рек и питания подземных вод. Анализ данных с 1990-х годов свидетельствует об увеличении мощности СТС на большинстве наблюдательных площадок. Даже в 2009 г. мощность СТС на 8–13% превышала среднее ее значение за предыдущее десятилетие. Увеличение температуры воздуха за последние 15–30 лет способствует более глубокому сезонному протаиванию, в результате чего над ММП образуется довольно мощный талый слой и происходит постепенный отрыв мерзлых толщ от поверхности земли. Развитие такого процесса во времени приведет к сокращению площади распространения приповерхностных ММП [3, 6]. На значительных площадях Лено-Вилюйской низменности часто встречаются на небольшой глубине погребенные льды мощностью свыше 5–10 м. В результате их современного таяния формируются многочисленные термокарстовые озера, представляющие дополнительный источник питания подземных

**Рис. 2.**  
Нормированная диаграмма отклонения годового межсезонного стока от среднего значения за период 1970–1999 гг.:  
а) р. Адыча – створ Юрдук Кумах,  
б) р. Лена – створ Крестовское



**Рис. 3.**  
График изменения доли межсезонного стока в годовом за 30 лет на рр. Алдан (створ Суон Тит) и Алазея (створ Аргахта)

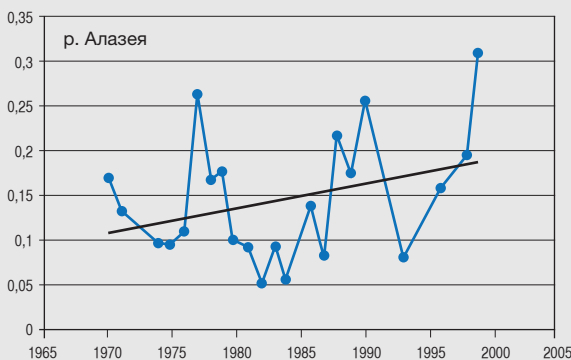
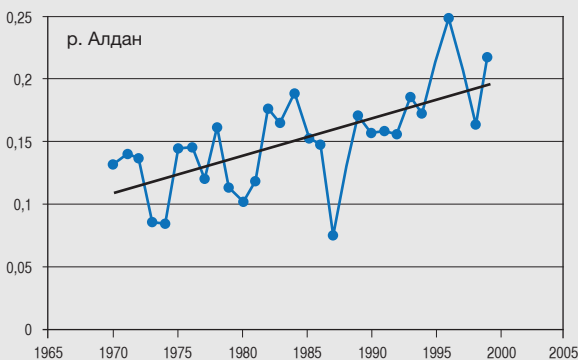
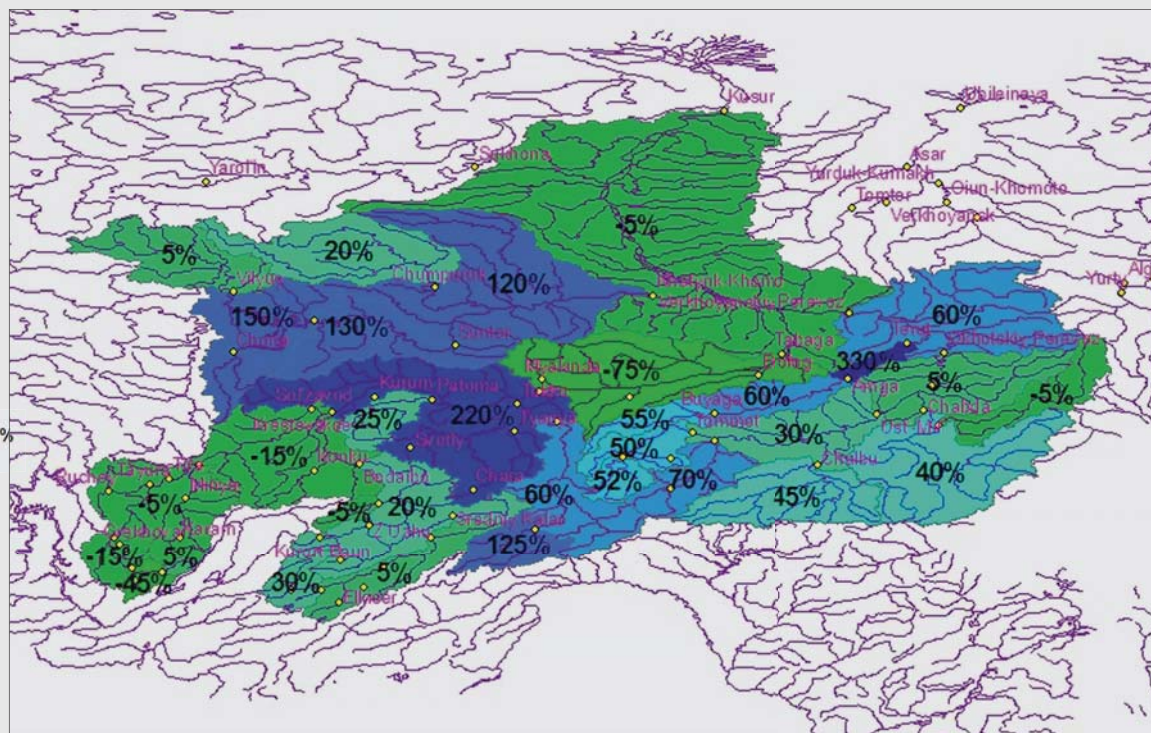
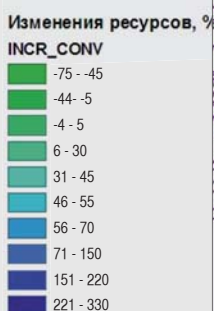


Рис. 4.

Карта–схема изменений подземного стока бассейна Лены по состоянию на 2005 г (в процентах отклонения современных величин стока от их предыдущих оценок [6]).



и поверхностных вод. Развитие термокарста и эрозия берегов уже сейчас в ряде мест составляют 10 м/год и более.

### Современные изменения годового и межennaleго стока речных бассейнов Восточной Сибири.

В ходе исследований обработаны данные гидрологических наблюдений Росгидромета по 150 гидрометрическим постам бассейна р. Лены и 30 постам бассейнов рек Колыма и Анадырь. Из них выбраны наиболее представительные по полноте данных и периоду наблюдения. Для каждого выбранного поста построены графики изменения во времени значений среднегодового и среднемежennaleго стока, а также графики и гистограммы отклонения годовых и межennaleго величин стока от средних их значений за выбранный период наблюдений. Анализ временных рядов стоковых и метеорологических характеристик проведен для трех временных интервалов: 1) с начала наблюдения по 2000–2008 гг.; 2) с 1939 по 1969 г.; 3) с 1970 по 2000 г. или до конца наблюдений. Два последних периода сопоставимы по длительности, что позволяет сравнивать между собой среднегодовые и сезонные характеристики за эти близкие по длительности интервалы времени для более объективной оценки выявляемых изменений.

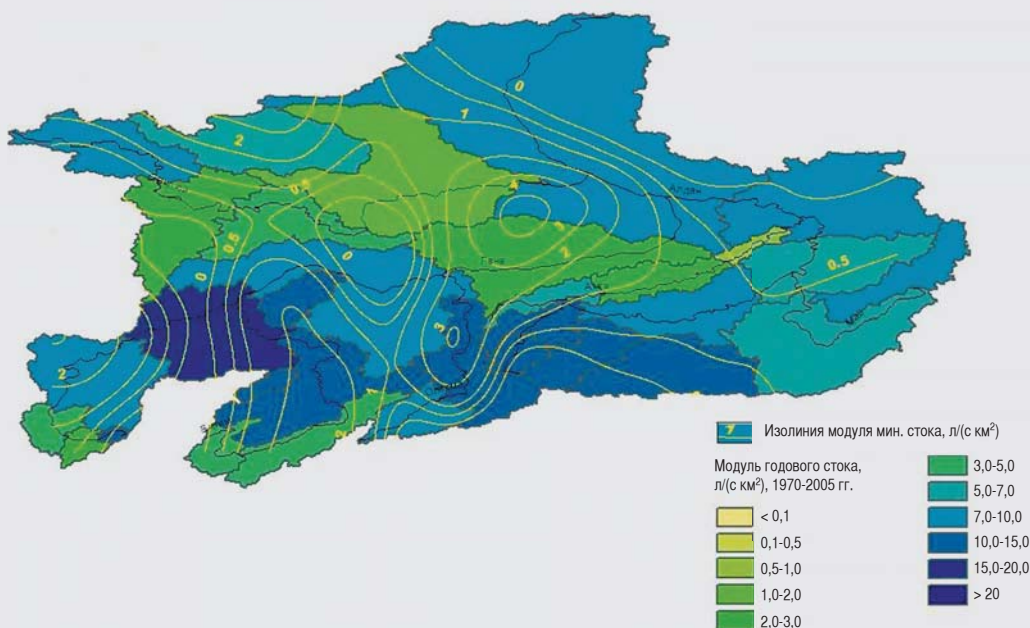
Установлено, что в бассейне Лены из 75 наиболее представительных створов за весь

период наблюдений происходит увеличение среднегодового стока на 57 створах и среднемежennaleго — на 59. За последние 30 лет межennaleго сток увеличивается на большей части территории бассейна Лены (85% створов дают положительный линейный тренд). На построенных нормированных диаграммах (гистограммах) среднегодового и среднемежennaleго стока за определенный период наблюдений видно, с какого года идет заметное увеличение или уменьшение стока (рис. 2). Кроме того, за последние десятилетия изменилась доля межennaleго стока в среднегодовом. Почти по всем створам за период 1970–2000 гг. она растет (рис. 3).

### Региональная переоценка естественных ресурсов подземных вод бассейна р. Лены.

Выполненный анализ изменения межennaleго стока рек Восточной Сибири за весь период наблюдений и особенно за последние 30 лет позволяет провести региональную переоценку подземного стока по речным бассейнам и их частям (естественных ресурсов подземных вод). Несмотря на сравнительно небольшое количество атмосферных осадков в регионе, их небольшие потери на испарение при суровом климате и широком распространении ММП обуславливают здесь сравнительно высокий поверхностный и подземный сток (рис. 4).

Гидрогеологические структуры Восточной Сибири можно разделить на три типа



**Рис. 5.** Карта водных ресурсов (среднегодового речного стока) бассейна Лены с изолиниями минимального речного стока 80%-й обеспеченности по состоянию на 2005 г.

в соответствии с различным участием водоносных горизонтов в формировании подземного и поверхностного стока. К первому типу относятся структуры с тесным взаимодействием подземных и поверхностных вод, ко второму — ограниченного взаимодействия и к третьему — весьма ограниченного (незначительного) взаимодействия подземных и поверхностных вод. При этом основного внимания заслуживают водоносные горизонты верхней части гидрогеологического разреза в зоне прерывистого и островного распространения ММП, активно взаимодействующие с поверхностными водами [7].

В верхнем течении р. Лены, по бассейнам рек Олекмы, Алдана и Амги естественные ресурсы подземных вод за последние 30 лет увеличились в среднем на 30–60% и более. Хотя по отдельным частным водосборам верхней Лены наблюдается уменьшение ресурсов до 25%. Островной характер ММП в сочетании с закарстованностью пород и значительным эрозионным врезом речных долин обеспечивают благоприятные условия инфильтрации атмосферных осадков и активную взаимосвязь подземных и поверхностных вод.

В среднем течении Лены, включая бассейн Вилюя, увеличение естественных ресурсов подземных вод колеблется от 20–30 до 100%. Вместе с тем в этой же части бассейна происходит довольно существенное сокращение подземного стока (до 75%). Это связано с широким распространением здесь водоносных систем ограниченного взаимодействия подземных и поверхностных вод. Резкое усиление

суровости мерзлотных условий в северном направлении приводит к уменьшению количества и размеров таликов и, соответственно, к сокращению разгрузки подземных вод. В долине Лены с ними связаны устойчивые наледы [7].

В нижнем течении Лены наблюдается незначительное сокращение ресурсов подземных вод на 5%. Эта величина изменения зимнего стока находится в пределах точности измерения расхода рек. Поэтому можно полагать, что меженный сток на этом меридиональном отрезке русла Лены не претерпевает существенных изменений. Это может быть связано в основном с вкладом малых рек на участке Табага - Кюсюр, а также с существенной заболоченностью территории.

**Основные факторы изменения меженного (подземного) стока рек Восточной Сибири.**

Сток рек крупных бассейнов в основном формируется сравнительно малыми притоками длиной до 10–15 км. Для бассейна Лены они составляют 60–70% протяженности гидрографической сети. Однако в условиях суровой зимы Сибири эти реки могут перемерзать или же существенно сокращать свое живое сечение. Именно от соотношения между сокращением пропускной способности участка реки и притоком зимнего меженного стока зависят формирование наледей или же снижение притока подземных вод в реку [1, 6].

При современном росте зимних температур происходит уменьшение толщины речного льда, сохранение стока в малых реках

и повышение расходов межленного (подземного) стока к концу зимы по ряду створов на р. Лены и ее притоках (рис. 5). При повышении зимних температур на 2–4°C межленный сток Лены и ее основных притоков (рр. Витим, Алдан, Виллой и др.) возрастает на 30%. Таким образом, ледяной покров малых и средних рек служит регулятором водообмена гидрографической сети с водоносными горизонтами, что особенно важно в последние десятилетия в связи с повышением годовых и сезонных температур воздуха [6].

Исследуемая территория сильно заболочена, особенно долина нижнего течения Лены – Центрально-Якутская, Северо-Сибирская и Яно-Индибирская низменности. В связи с потеплением климата болота становятся более теплыми, мерзлый торф и заторфованные породы оттаивают на большую глубину, особенно в речных долинах южной тайги. Поэтому болотные комплексы служат дополнительным источником подпитывания малых и средних притоков Лены, Виллоя, Алдана и других рек в зоне островной и прерывистой мерзлоты. На более глубокое протаивание болотных массивов указывает существенное увеличение эманации парниковых газов в последние десятилетия.

Болота могут выделять углерод в виде углекислого газа или метана. Концентрация  $\text{CH}_4$  в мерзлых породах достигает 33 мл/кг. Изотопный состав углерода метана указывает на его биогенное происхождение. Современное выделение  $\text{CH}_4$  происходит в основном при положительных температурах, но, по некоторым данным, образование и эманация части  $\text{CH}_4$  возможны и при отрицательных температурах. В связи с этим рост количества доступного органического субстрата и повышение температуры грунта способствуют усилению эмиссии парниковых газов.

По современным оценкам величина потока  $\text{CH}_4$  с заболоченных и переувлажненных земель может достигать 188 мг  $\text{C}(\text{CH}_4)/\text{м}^2$  в сутки. Эти потоки  $\text{CH}_4$  отличаются высокой пространственной и временной

изменчивостью в зависимости от температуры, влажности, глубины оттаивания, типа растительности. Наиболее активно процесс образования  $\text{CH}_4$  развивается в талых породах деятельного слоя и таликах в результате деятельности метаногенных микроорганизмов. При выделении углерода в виде метана происходит многократное усиление парникового эффекта, так как метан по своим радиационным свойствам в 21 раз активнее  $\text{CO}_2$  [5, 6].

Прямые измерения содержания  $\text{CH}_4$  в ММП дают основания полагать, что на северо-востоке России на площади около 180 тыс. км<sup>2</sup> в верхних 25 м мерзлых пород содержится примерно 10,0 млрд. м<sup>3</sup>  $\text{CH}_4$ . В связи с этим ММП можно рассматривать как один из важнейших резервуаров метана. Прогнозируемое оттаивание мерзлых пород на 2–3 м приведет к эманации из ММП до 1,7 млрд м<sup>3</sup>  $\text{CH}_4$ , что соответствует поступлению в экосистемы порядка 2–15 г  $\text{C}(\text{CH}_4)/\text{м}^2$ . Прогнозируемая эманация  $\text{CH}_4$  при оттаивании ММП будет меньше расчетной голоценовой эмиссии, так как в динамике количества термокарстовых озер на северо-востоке России в течение последних десятилетий наблюдается сокращение их площади. Это свидетельствует о том, что современная толща ММП не может служить потенциально значимым источником метана в атмосфере в связи с эпигенетическим промерзанием подозерных таликов, что предотвращает эмиссию  $\text{CH}_4$  из осушенных озерных котловин. С другой стороны, оттаивание ММП и сокращение площади озер приводят к увеличению речного стока и береговой эрозии [1, 5].

Таким образом, увеличение (уменьшение) естественных ресурсов подземных вод происходит в связи с изменением соотношения основных стокообразующих факторов (температура, осадки, испарение), оттаиванием мерзлых пород, ростом заозерности и заболоченности территории, уменьшением толщины льда на реках, условиями формирования подземных вод конкретных районов. ❏

## Литература

1. Георгиади А.Г., Золотокрылин А.Н. Тепловодообмен в мерзлотных ландшафтах Восточной Сибири и его факторы. – Москва – Тверь: ООО «Издательство «Триада», 2007. 576 с.
2. Джамалов Р.Г., Зекцер И.С. и др. Изменение подземного стока под влиянием климата и антропогенных воздействий // Водные ресурсы. 2008. Т.35. № 1. С.17–24.
3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2009 год. 2009 г. М.: Изд-во Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). 2010. 57 с.
4. Карта подземного стока территории СССР, Масштаб 1:2 500 000 – Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, Москва 1977.
5. Краев Г. Н. Закономерности распространения метана в многолетнемерзлых породах на Северо-востоке России и прогноз его поступления в атмосферу. Автореферат диссертации. М., 2010. 20 с.
6. Марков М.Л. Проблемы оценки естественных ресурсов подземных вод по гидрологическим данным в условиях изменения климата. Материалы конференции «Ресурсы подземных вод». М.: Макс-Пресс, 2010. С. 94–98.
7. Протасьев М.С. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 17 Лено-Индибирский район – Гидрометеиздат Ленинград, 1972. 407 с.