Министерство образования Российской Федерации

Российский государственный гидрометеорологический университет

С.К. АРЖАКОВА

ЗИМНИЙ СТОК РЕК КРИОЛИТОЗОНЫ РОССИИ

Научный редактор акад. АПВН А.М. Владимиров



VЛК 556 167

Аржакова С.К. Зимний сток рек криолитозоны России: Монография. – СПб.; РГГМУ, 2001. – 209с.

Рецензенты: проф. д-р геол.-мин. наук, О. Н. Толстихин, д-р геогр. наук П. П. Гаврильев

Рассматриваются условия формирования и основные закономерности изменения зимнего стока. Приведены методы его расчета при наличии, недостаточности и отсутствии данных гидрометрических наблюдений. Выполнена типизация рек по режиму стока в зимнюю межень. Дается оценка изменений характеристик зимнего стока под влиянием горнорудных работ, регулирования стока ГЭС, эксплуатации полземных вол.

Рассчитана на научных сотрудников, преподавателей и студентов гидрометеорологических, географических и гидрогеологических специальностей, а также на специалистов, деятельность которых связана с изучением, оценкой и охраной водных ресурсов рек криолитозоны.

Both the conditions and main rules of the river's low-flow at winter season are taking into consideration. The methods for low-flow estimation at the case of sufficient and unavailability of the hydrometric data described. The river classified according its water regime features, with taking into consideration the human impact, consisted at region in mining, hydroelectric power stations creating and water supplying.

The book oriented to those scientists, lectures and students of hydrometeorologocal, geographical and hydrogeological who are working at the sphere of estimation, investigation and protection of water resources within the criolitozone.

ISBN 5-8613-016-2

© С.К. Аржакова, 2001

© Российский государственный гидрометеорологический

Российский государственный университет (РГГМУ), 2001 гидрометеорологический институт

BUELHOTEKA

195196, СГК Молоохтинский пр., 98

368170

Предисловие

Гидрология рек криолитозоны является одним из наиболее сложных научных направлений гидрологии суши. Под гидрологией рек криолитозоны понимается учение о закономерностях формирования водных ресурсов и гидрологического режима рек, водного баланса речных бассейнов, а также о специфических гидрологических явлениях и процессах, происходящих на реках территории распространения многолетнемерзлых пород.

Как научное направление гидрология рек криолитозоны сформировалось в 80-х годах XX в. в результате расширения гидрологических исследований на территории многолетнемерзлых пород. Общие и специальные вопросы гидрологии рек криолитозоны, основные ее проблемы и задачи освещены в трудах Б.Л. Соколова. Анализируя результаты гидрологических исследований, выполненных на территории мерзлых пород к концу 80-х годов, Б.Л. Соколов писал: "Специфика природных условий формирования водных ресурсов и гидрологического режима рек в районах многолетнемерзлых пород... требует и специфических методов их изучения, и научного обобщения данных наблюдений. Это приводит к относительному обособлению части гидрологического знания с целью более глубокого проникновения в сущность природных процессов, появлению новых идей, гипотез, принципов, объектов и предмета изучения, уточнению существующих и разработке новых понятий, терминов и их определений и пр. Таким образом, с точки зрения внутренних потребностей развития гидрологической науки становление гидрологии рек криолитозоны... необходимый и закономерный процесс" [144, с. 204].

Начало изучению водного режима рек криолитозоны было положено В.Е. Водогрецким, которого по праву считают одним из

основоположников гидрологии рек криолитозоны. В 50-х годах он впервые обобщил данные наблюдений по режиму и стоку рек Северо-Востока СССР и на этой основе им были разработаны методы расчета годового, максимального, минимального и внутригодового распределения стока рек региона. Значительный вклад в изучение гидрологии рек криолитозоны внесли А.М. Владимиров, А.М. Комлев, Б.М. Гинзбург, О.Н. Толстихин, В.Р. Алексеев, Д.А. Бураков, Л.М. Корытный, А.В. Петенков, В.С. Антонов, В.В. Иванов, Г.А. Плиткин и др.

Следует особо отметить научную деятельность Дальневосточного научно- исследовательского гидрометеорологического института (ДВНИГМИ), который не только проводит гидрологические исследования на обширной территории Сибири и Дальнего Востока, но и является научным центром, организовавшем всю работу в этом регионе. Начиная с 60-х годов ДВНИГМИ было организовано три научне конференции, по гидрологии рек криолитозоны, на которых обсуждались научные и практические достижения в этой области, координировались работы по дальнейшим исследованиям. На первой научной конференции, состоявшейся в 1961 г., рассматривались проблемы прогнозов и расчетов дождевых паводков на реках Сибири и Дальнего Востока. Проведенная в 1983 г. вторая конференция была посвящена проблемам гидрологии рек зоны БАМ и Дальнего Востока. Третья научная конференция проходила в 1988 г. На ней было заслушано 190 докладов по 10 секциям. Конференция показала, насколько глубоко и разносторонне развивается гидрология рек криолитозоны в современный период.

Предлагаемая работа представляет собой первый опыт обобщения результатов исследований в области гидрологии рек криолитозоны. В качестве объекта исследования выбран зимний сток рек, поскольку изменения водных ресурсов, происходящие под влиянием как хозяйственной деятельности, так и глобальных изменений климата, проявляются в первую очередь на зимнем речном стоке как наиболее чувствительном водном индикаторе, лимитирующем водопотребление и водопользование, а также условия существования гидробионтов.

В настоящее время накоплен достаточно большой объем гидрометеорологической информации и научной литературы о зимнем

стоке рек криолитозоны и появилась возможность глубже осмысливать имеющийся фактический материал. Имеются определенные достижения как в изучении условий формирования и закономерностей изменения зимнего стока, так и в разработке методов его расчета и применения результатов исследований в практической деятельности. Однако зимний сток рек криолитозоны, особенности его формирования и изменения в сложных мерзлотно- гидрогеологических условиях до сих пор достаточно полно не изучались. В связи с этим обобщение имеющихся исследований и данных стационарных наблюдений по зимнему стоку, доведенное до конкретных рекомендаций по его расчету и прогнозу, представляется своевременным и весьма актуальным в современных условиях, когда в результате антропогенного воздействия возрастает дефицит водных ресурсов и ухудшается экологическое состояние водных объектов.

В монографии показывается сложность формирования речного стока в зимний меженный период года в условиях глубокого промерзания гидрогеологических структур, характерного для районов распространения многолетнемерзлых пород. Приведены общие сведения о водном режиме рек региона и его особенностях в зимнюю межень. Даются конкретные рекомендации по расчету характеристик зимнего стока при различном объеме исходной гидрометеорологической информации...

Вопросы изучения условий и закономерностей формирования зимнего стока рек криолитозоны являются весьма сложными, поэтому выполненные разработки по количественной его оценке еще не могут претендовать на очень высокую точность, хотя базируются на современных методах гидрологического анализа. Приведенные в монографии сведения отражают современный уровень изученности зимнего стока рек исследуемого региона. Ввиду сложности исследования автор считает, что проблема количественной оценки зимнего стока остается еще до конца не разрешенной. Для дальнейшего развития и уточнения методов расчета зимнего стока рек необходимы прежде всего расширение сети гидрологических станций и постов, постановка комплексных исследований на базе организации воднобалансовых станций в регионе и улучшение гидрогеологической изученности территории. Автор полагает, что для уточнения и совершенствования изложенных в работе методов требуется

поиск новых решений для описания закономерностей изменения зимнего стока рек в сложных мерзлотно-гидрогеологических условиях.

В основу монографии положены результаты исследований автора в различных геокриологических районах Якутии, опубликованные в отечественной литературе материалы, а также данные стационарных наблюдений Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромета) Российской Федерации. Работа над монографией проходила при постоянном внимании и консультациях академика А.М. Владимирова. Автор выражает признательность и глубокую благодарность О.Н. Толстихину, П.П. Гаврильеву и другим за советы и критические замечания, которые были учтены при подготовке рукописи к печати.

and the second of the second o

THE RELEASE OF THE PROPERTY OF THE WAY OF THE WAY OF THE PARTY OF THE

s de la Martine de Maria de La Maria de la Carta de La Maria de Maria de La Maria de La Maria de La Maria de L De la Maria de

Введение

Интенсивное хозяйственное освоение природных богатств Сибири и Дальнего Востока привело к тому, что обеспечение водой населения и промышленных объектов в необходимом количестве и требуемого качества, особенно зимой, является здесь одной из главнейших проблем. Решение этой жизненно важной проблемы зависит от степени изученности зимнего стока рек региона, поскольку сток рек в зимний меженный период является одной из основных гидрологических характеристик, используемых при водохозяйственном и строительном проектировании, при решении проблем рационального использования и охраны водных ресурсов. Характеристики зимнего стока лимитируют водопотребление и водоотведение: они имеют определяющее значение при размещении производительных сил и населенных пунктов. Поэтому изучение условий формирования и закономерностей изменения речного стока в зимний маловодный период года имеет большое научное и практическое значение.

Научное значение исследований заключается в разработке более обоснованных методов расчета характеристик зимнего стока применительно к сложным мерзлотно-гидрогеологическим условиям территории криолитозоны. Существующие методы расчета не являются достаточно надежными, поскольку не учитывают особенности распределения подземного стока, в частности его дискретность в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Кроме того, в них отсутствуют рекомендации по определению таких важных гидрологических характеристик, как водность и продолжительность периода истощения зимнего стока.

Практическое значение результатов исследований связано с применением разработанных методов расчета зимнего стока и перемер-

зания рек в пределах исследуемого региона при строительном и водохозяйственном проектировании. Результаты исследований могут быть использованы в различных отраслях народного хозяйства, в частности в водоснабжении, когда не допускается даже кратковременных перебоев в подаче воды. Зимой в районах распространения многолетнемерзлых пород возникают сложности в водоснабжении из-за перемерзания рек, наледеобразования и других криогенных явлений и процессов.

При изучении закономерностей изменения зимнего стока главное внимание в работе уделено:

- 1) установлению закономерностей формирования зимнего стока рек криолитозоны на основе анализа его режима и природных условий региона;
- 2) разработке методов расчета характеристик зимнего стока рек при различном объеме исходной гидрометеорологической информации и с учетом, где это возможно, влияния хозяйственной деятельности в их бассейнах.

Поставленные задачи решаются в регионе, где специфические особенности формирования зимнего стока проявляются с наибольшей интенсивностью и имеют широкое распространение. Площадь территории, на которой выполнены исследования, составляет 10,98 млн. км², или 65 % общей площади России.

Монография состоит из пяти глав. В первой главе приводится краткий обзор и анализ природных условий и факторов формирования зимнего стока рек региона. Рассматриваются вопросы формирования и распространения зажоров, наледей, криогенных "паводков", проявляющихся как результат сложного взаимодействия климат — реки — многолетняя мерзлота. Анализ физико-географических условий (рельефа и геологического строения, мерзлотногидрогеологических и климатических особенностей, озерности, заболоченности региона и др.) позволил выделить на исследуемой территории два района, резко различающиеся условиями формирования зимнего стока: относительно равнинный и горный.

Вторая глава посвящена обзору развития исследований водного режима рек в зимнюю межень, выполнен анализ существующих методов расчета зимнего стока рек мерзлой зоны. Основное внимание уделено причинам, ограничивающим возможности их при-

менения в условиях сплошного распространения многолетнемерзлых пород.

В последующих двух главах дается характеристика зимней межени, на основе анализа условий формирования зимнего стока установлены основные региональные закономерности процессов истощения стока и перемерзания рек. Анализ закономерностей изменения зимнего стока сопровождается конкретными рекомендациями по его расчету в условиях сплошного распространения многолетнемерзлых пород.

В пятой главе излагаются особенности хозяйственного освоения и использования водных ресурсов региона. Рассматриваются возможные изменения характеристик зимнего стока в результате ожидаемых изменений климатических условий и влияния хозяйственной деятельности на конкретных примерах.

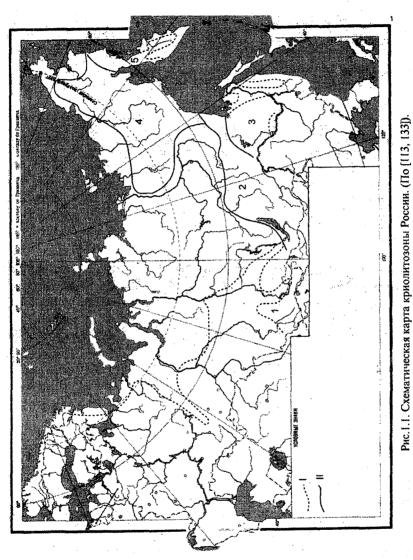
tan i sera deleta la fincia la capera l ment of the specific property and the property of en la 1940 de la la constator de terror de la la la filipe de la judición de la comparte de on a special period of the second of the sec The statement of the property of the statement of the sta The second of the state of the second 。 《中国》中"野花"的"红"等"自然或数数",他们现在这一点,而且一种说话,是这个理解 经数据 电电子通信 网络格兰 化动物 网络蛇鼠 医二十二氏 电路 计电视程序 医腹膜 and the constituent of a second control of the confidence of the c 为价值的证明,因此的现在分词,但是据自己的信息的。例如:1936年,但是最后的1993年中 The first term of a section with the section of the contract of the con-The administration and install a warped the complete with a particular segment. Contain the contains the containing pressure the law containing the A common factor of the common that is the common of the co rank in the secretary of the property of the contract of the c o en entre la districción de la compacta de la comp and the following the state of the property of the state aces 144 and the more on the efficiency fit is not be determined by

Глава 1

Условия и факторы формирования зимнего стока

1.1. Природные условия и факторы формирования зимнего стока рек криолитозоны

Исследуемый регион занимает территорию площадью 10,98 млн. км², большая его часть находится на азиатской территории России и почти половина – за Северным полярным кругом (рис. 1.1). Этот обширный регион располагается в области распространения многолетнемерзлых пород, причем 61.5% территории занимает сплошная мерзлота. На остальной части характер распространения многолетней мерзлоты довольно сложный, и большая ее доля относится к зоне прерывистой мерзлоты [113]. Прерывистый и островной характер распространения мерзлых пород способствует установлению тесной гидравлической взаимосвязи поверхностных и подземных вод через многочисленные талики, развитые как в речных долинах, так и на водораздельных участках. Кроме того, широкому распространению таликов способствуют более мягкие климатические условия, распространение здесь закарстованных карбонатных пород и хорошо фильтрирующих угленосных отложений. Все эти факторы усиливают инфильтрацию атмосферных осадков в подземные водоносные горизонты, дренируемые реками [36, 136, 156, 157]. Таким образом, гидрогеологические структуры прерывистой и островной криолитозоны практически не отличаются от аналогичных структур, расположенных вне мерзлой зоны, где высокая связь подземных и поверхностных вод зимний период нивелирует особенности гидрологического режима, свойственные зоне сплошной мерзлоты. В настоящей работе автор рассматривает условия и закономернос-



I - граница криолитозоны, II - граница горно-складчатой области. Горно-складчатые области: 1 - Алтае-Саянская: 2 - Байкальская: 3 - Амурская и Сихотэ-Алиньская; 4 - Верхояно-Чукотская; 5 - Камчатско-Корякская.

ти формирования зимнего стока рек, водосборы которых располагаются преимущественно в зоне сплошной многолетней мерзлоты, поскольку именно в ней особенности формирования зимнего режима рек проявляются с наибольшей интенсивностью и имеют широкое распространение. Обобщение гидрометеорологической информации по зимнему стоку рек прерывистой и островной криолитозоны выполнено в основном на основе анализа материалов, опубликованных в научной литературе за последние 100 лет.

Исследуемый регион простирается от побережий морей Северного Ледовитого океана на севере до горных районов Забайкалья и Приморья на юге, охватывает часть Кольского полуострова, север Малоземельской и Большеземельской тундр, Полярный Урал, большую часть Сибири и Дальнего Востока. По схеме природного районирования [133, 176] в пределах региона располагаются тундровая, лесная, лесостепная и степная зоны.

Территория криолитозоны отличается большим разнообразием природных условий, что определяется ее географическим положением и своеобразием атмосферных процессов. В климатическом отношении она является самой холодной и континентальной областью в северном полушарии. Резкая континентальность центральной части региона обусловливается значительной удаленизолированностью территории горными массивами от воздействия влажных и теплых воздушных масс со стороны Атлантического и Тихого океанов и соседством региона с холодными морями Северного Ледовитого океана. Прежде всего она проявляется в большом контрасте между зимними (до -50, -65 °C) и летними (до 25, 35 °C) температурами воздуха. Наибольшие годовые амплитуды колебания температуры воздуха отмечаются в Оймяконской, Верхоянской и Лено-Вилюйской впадинах, где они превышают 60°C по средним месячным и 100°C по абсолютным значениям.

Зима на большей части региона характеризуется резко выраженным антициклоническим режимом погоды: низкими температурами, большой продолжительностью (7 – 8 месяцев), малоснежностью, сухостью воздуха, малыми скоростями ветра, ясным состоянием

неба. Продолжительные зимы с исключительно низкими температурами воздуха и сравнительно малая высота снежного покрова (30—80 см) способствуют глубокому промерзанию почвогрунтов, а также широкому распространению низкотемпературных многолетнемерзлых горных пород.

По данным И.А. Некрасова [113], общая площадь сплошной криолитозоны на территории России составляет 6,75 млн. км². В пределах региона мощность мерзлых пород колеблется от 100 до 600 м и более, а их температура на подошве слоя годовых колебаний обычно ниже -2.5 °C. Наиболее суровые геокриологические условия наблюдаются в Забайкалье (Становое нагорье). где отмечаются наибольшая мощность (около 1300 м) и минимальная температура мерзлых пород (до −14 °C) [51]. К югу региона суровость геокриологических условий снижается: мощность мерзлой толщи сокращается до 50 м, а температура пород повышается до -1,0 °C. В горных районах основные параметры сплошной криолитозоны изменяются в зависимости от высотных отметок земной поверхности. Так, мощность мерзлых пород Северо-Востока под речными долинами составляет 200 - 300 м; под водоразделами, имеющими абсолютные отметки до 2200 – 2500 м -400 - 600 м. Температура пород колеблется в пределах от - 4.5 до - 12 °C [51, 79].

Следует отметить, что многолетняя и сезонная мерзлота являются важнейшими природными факторами, определяющими зимний сток рек, поскольку их распределение по площади и глубине на рассматриваемой территории носит весьма разнообразный характер и оказывает существенное влияние на формирование, особенности скопления и циркуляцию подземных вод, питающих реки в зимний период. В частности, сплошное залегание многолетнемерзлых пород затрудняет подземное питание рек, поскольку, с одной стороны, является водоупором для надмерзлотных вод, а с другой препятствует выходу подземных вод из более глубоких водоносных горизонтов. Взаимосвязь между поверхностными и подземными водами здесь осуществляется лишь через сквозные талики.

Исследуемый регион характеризуется чрезвычайно сложными гидрогеологическими условиями, что обусловливается ее геологоструктурными и мерзлотными особенностями. По данным О.Н. Толстихина [155, 156], многолетнее и сезонное промерзание и протаивание горных пород оказывает существенное влияние на свойства гидрогеологических структур, которое выражается в следующем: водоносные структуры переходят в качественно новое состояние. становясь криогенными водоупорами, т.е. превращаются в специфические мерзлотно-гидрогеологические структуры, многие из которых характерны только для мерзлой зоны. Это криогеологические массивы (КГМ), криогенные напорные бассейны (КНБ). криогеологические (КГБ) и криоартезианские бассейны (КАБ). Существование этих многолетних криогенных водоупоров обусловливает дифференциацию подземных вод на над-, меж- и подмерзлотные, уменьшает водоемкость гидрогеологических структур. затрудняет условия питания и разгрузки подземных вод, ухудшает их взаимосвязь с речными водами.

Согласно исследованиям [106, 123, 168], при промерзании горных массивов происходит отжатие части подземных вод в подрусловые таликовые зоны, которое сопровождается формированием участков повышенной трещиноватости и обводненности. Установлено, что в условиях чрезмерной неоднородности гидрогеологических структур по площади и разрезу, обусловленной существованием многолетнемерзлых горных пород, отличительной чертой водоносных структур является их линейность, т. е. локализация подземных вод в таликовых зонах речных долин. В этом случае долина реки является элементарной гидрогеологической структурой, в пределах которой подземные воды накапливаются в летний период и расходуются зимний. Емкостные характеристики таких структур, или, иначе, их водообильность, определяются как мощностью аллювиальных отложений и степенью трещиноватости подстилающих пород, так и уклоном речной долины и ее размерами в плане (длиной и шириной).

Обширность региона обусловливает многообразие ландшафтных зон в его пределах – от высокогорий до зоны тундры и степей.

Широтные зоны и зоны горных ландшафтов отличаются друг от друга определенным сочетанием физико-географических условий, что обусловливает различия и в увлажненности территории, а следовательно, и в водности зимней межени. Исходя из этого, а также из анализа мерзлотно-гидрогеологических, климатических особенностей, которые определяют подземный приток в реки, на первом этапе районирования в пределах исследуемого региона выделено два района, различающихся условиями формирования зимнего стока: район, с относительно равнинным рельефом и горный район (см. рис. 1.1). Границы районов проведены в соответствии с физико-географическим районированием территории России.

Общая характеристика природно-климатических условий региона достаточно подробно изложена в ряде работ [46, 49, 50 – 52, 133, 154, 176]. Ниже дается краткий обзор и анализ тех физико-географических факторов, которые определяют зимний сток рек в выделенных районах. К основным физико-географическим факторам, которые оказывают влияние на процессы формирования, режим и сток зимой относятся климатические факторы (температура возуха и почвы, осадки, высота снежного покрова) и факторы подстилающей поверхности (рельеф и геологическое строение, мерзлотно-гидрогеологические условия, озера, болота и др.) [40].

Район с относительно равнинным рельефом относится большей частью к Сибирской платформе, где преимущественно развиты плоскогорья, плато и равнины. Абсолютные отметки поверхности водоразделов не превышают 1000 м, глубина вреза речных долин составляет от 200 до 400 м.

На севере вдоль побережья морей Северного Ледовитого океана располагается тундровая зона — обширные приморские низменности, имеющие абсолютные высоты от 50 до 100 м. На их поверхности, сложенной четвертичными аллювиально-озерными и морскими отложениями, широко развиты термокарстовые озера и понижения, бугры (байджарахи, булгуняхи и другие формы криогенных явлений). Долины рек врезаны на незначительную глубину.

По характеру общей циркуляции воздушных масс район относится к территории, на которую основные влагоносные массы поступают с запада.

Зима здесь продолжительная, но более теплая. Например, в бассейне р. Вилюя крайне морозная погода отмечается лишь в 25 – 30 % случаев [133]. Отличается климат зимнего сезона тундровой зоны, в которой сказывается океаническое влияние, характерны долгие полярные ночи, пурга, метели, часты туманы.

В районе распространен платформенный тип сплошной мерзлой зоны. В вертикальном разрезе до глубины 200-500 м этот тип представляет собой рыхлые и скальные горные породы, сцементированные подземными льдами. В этих условиях подрусловые таликовые зоны носят в основном локальный характер и не образуют единой системы, гидравлически связывающей подмерзлотные воды с поверхностными. Таким образом, многолетнемерзлые породы изолируют глубокие подмерзлотные воды от поверхностных, снижая тем самым подземное питание рек зимой. Лишь встречающиеся под большими не перемерзающими реками сквозные таликовые участки являются путями связи подземных вод с речными.

Согласно гидрогеологическому районированию [168], район совпадает с Восточно-Сибирской артезианской областью и областью артезианских бассейнов арктического пояса, структуры которых характеризуются ограниченным взамодействием подземных вод с поверхностными. В этих условиях подземный сток формируется в основном регионально и локально за счет надмерзлотных подрусловых и подозерных таликовых вод. Наиболее неблагоприятные условия для формирования подземных вод существуют в Анабарском криогеологическом массиве, где подземные воды приурочены только к глубоким трещи-новатым зонам разломов. В целом по району модуль подземного стока изменяется от 0,001 до 0,066 м³ / (с км) [168].

На рассматриваемой территории наледи распространены повсеместно. Большинство наледей небольших размеров: их площадь обычно не превышает 1 км², а мощность наледного льда колеблется от 1,0 до 4,5 м. Чаще всего они образуются или от источников под-

земных вод, приуроченных к песчаным массивам долин, или от источников, часть которых питается водами траппов, а другая – водами в карбонатных породах.

Озера в пределах данного района распространены на низменных приморских (зона тундры) и центральных равнинах, для которых характерны затрудненные условия стока и широкое развитие подземных льдов. Так, на территории Якутии выделяются следующие обширные озерные районы: Лено-Вилюйский, Лено-Амгинский, Предверхоянский, Анабаро-Оленекский и Яно-Индигиро-Колымский. Наибольшую озерность (10 – 20 %) имеют водосборы рек Яно-Индигиро-Колымского района. Например, в бассейне р. Чукочьи коэффициент озерности превышает 40 %. Происхождение большинства озер связано с термокарстовыми явлениями: нарушением температурного режима мерзлых грунтов и вытаиванием заключенных в них льдов.

Болота и заболоченные земли распространены в основном в тех же районах, где и озера. Характерно, что на территории криолитозоны наиболее широко развиты не типичные болота, а сильно заболоченные земли, на которых слой торфянистой дернины не превышает 25 – 30 см, а ниже залегают многолетнемерзлые породы [133].

В районе в пределах Приленского плато располагается область сильного проявления карста: воронки, пещеры, пустоты, многодебитные источники, исчезающие летом водотоки.

Район с горным рельефом охватывает весьма обширную территорию. Его большая часть относится к Байкальской и Верхояно-Чукотской складчатым областям и представляет собой сочетание крупных плоскогорий, нагорий, горных цепей и хребтов. Наиболее высокие точки расположены в горных цепях Верхоянья и Черского (2200 — 3000 м). Рельеф сильно расчленен густой сетью речных долин с глубинами вреза 1000 м и больше.

Характерной особенностью геологических структур района является широкое развитие тектонических и криогенных трещин гор-

Российский государственный гидрометеорологический институт
ВИВЛИОТЕКА
195196, СПб, Малоохтинский пр., 98

17

ных пород, по которым происходит взаимосвязь поверхностных и подземных вод. По трещинам формируются многочисленные наледи, в том числе гигантские, занимающие площадь $50 - 90 \text{ км}^2$. Область интенсивной разрывной тектоники охватывает часть хребта Сунтар-Хаята и юг Яно-Оймяконского нагорья, для которых характерны трещиноватые верхнемеловые эффузивные породы [133]. Хорошо обводненные зоны тектонических разломов наблюдаются также в горных цепях Черского, кряжах Полоусный, Улахан-Тас и др. Следует отметить, что в данном районе многие речные долины нередко совпадают с направлением разрывных нарушений. Так, по данным А.И.Калабина [79], большинство рек Северо-Востока имеют тектоническое происхождение, в соответствии с которыми долины рек ориентированы на большом расстоянии вдоль крупных тектонических разломов. Отмечено, что на рассматриваемой территории наиболее интенсивная трещиноватость и наибольшая водообильность горных пород отмечается вдоль речных долин.

Зима в районе особенно суровая и продолжительная, зимние температуры воздуха достигают очень низких значений. Здесь находится полюс холода — Оймякон с абсолютным минимумом (—71 °C), а многолетние среднемесячные температуры в течение трех месяцев (декабрь — февраль) по данным метеостанций Верхоянск, Оймякон, Нера, Усть-Мома, опускаются ниже — 40 °C [133].

Одной из отличительных особенностей холодного периода является приземная инверсия (повышение температуры воздуха с высотой). Благодаря интенсивной и устойчивой инверсии в долинах и котловинах скапливаются и застаиваются холодные массы воздуха, в результате происходит сильное радиационное выхолаживание. Например, на горных хребтах Черского и Полоусный среднемесячные температуры в январе равны -36, -38 °C, тогда как в долинах -46, -49 °C.

Распределение осадков по территории зависит от орографических особенностей и циркуляции воздушных масс. Так, наименьшее количество осадков за зиму (25 – 45 мм) приходится на районы низ-

менностей, равнин и плато, в горных районах их выпадает больше (около 75 мм). Вследствие небольшого количества выпадающих осадков высота снежного покрова незначительна (25 – 60 см). Максимальной мошности снежный покров достигает обычно в марте.

Для горного района характерен горно-складчатый тип сплошной мерзлоты, особенностью которой является прерывание ее сплошности таликовыми участками и тектоническими разломами, где возникают более благоприятные условия для взаимодействия речных и подземных вод.

Район располагается в пределах Верхояно-Чукотской и Восточно-Сибирской гидрогеологических складчатых областей, которые представляют собой сложную систему глубоко промороженных гидрогеологических массивов и адмассивов, криоартезианских, адартезианских и вулканогенных бассейнов. На большей части этой территории подземный сток формируется локально за счет межмерзлотных таликовых зон, приуроченных к речным долинам или к трещиноватым зонам разломов. Благоприятные условия для формирования подземных вод через сквозные талики существуют в структурах с незначительными мощностями мерзлой зоны (до 150 м). Такие участки встречаются в адартезианских и вулканогенных бассейнах и в Полоусненско-Верхнеколымском массиве, где средний модуль подземного стока увеличивается до 0,030 м³/(с км) [168].

Рассматриваемый район характеризуется широким развитием наледных процессов. На основе комплексного физико-географического анализа В.Р. Алексеев выделил здесь две наледные области и девять регионов. Их краткая характеристика приводится в [1]. В целом по району наледность речных бассейнов повышается с юга на север, а также с увеличением абсолютных высот водосборов. Самые крупные наледи – площадь некоторых достигает 90 км² (наледь Улахан-Тарын) – сосредоточены в Северо-Восточной азиатской наледной области. По данным О.Н. Толстихина, суммарная площадь всех наледей здесь составляет более 5000 км², относительная наледность достигает 3 %.

1.2. Краткая характеристика речной сети

v Brit Marcon Chalada, i a leverna il rese aditi e i

Речная сеть региона относится к бассейнам морей Северного Ледовитого и Тихого океанов. Отличительной чертой речной сети является то, что примерно 80 % суммарного годового стока всех рек России сосредоточено в реках, впадающих в эти океаны. Кроме того, в пределах криолитозоны протекают реки, входящие в первую десятку крупных рек мира: Обь, Енисей, Лена, Амур. Большинство крупных рек протекает с юга на север, пересекая различные природные зоны: степную, лесную, тундровую. Исключение составляют реки Амур, Вилюй и Анадырь. Общие сведения об основных реках региона приводятся в табл. 1.1.

Территория криолитозоны характеризуется весьма неравномерным распределением речной сети. Густота речной сети в пределах плато, равнин и низменностей сравнительно низка и составляет 0,3 – 0,4 км/км², Наибольшие значения коэффициента густоты речной сети (до 0,7 км/км²) имеют горные районы, отличающиеся большей расчлененностью и увлажненностью. Самые низкие коэффициенты характерны для приморских низменностей (0,01 – 0,04 км/км²).

Значительная приподнятость водоразделов горных районов обусловливает глубокий эрозионный врез речной сети, достигающий 600 – 1000 м и больше, а также весьма существенные уклоны русел рек. Благодаря глубокому врезу и тектонической трещиноватости горных пород подземное питание отдельных горных рек Северо-Востока осуществляется за счет глубоких подмерзлотных вод [156]. В пределах плато, равнин и низменностей врез речных долин, составляет 150 – 300 м, уклоны русел рек снижаются до 0,0005 – 0,001 м/км.

Суровый климат, широкое распространение многолетнемерзлых пород, сложное геологическое и гидрогеологическое строение, своеобразное географическое расположение по отношению к направлению движения влагонесущих воздушных масс с океанов создают условия, при которых зимой формируется весьма сложный водный режим рек.

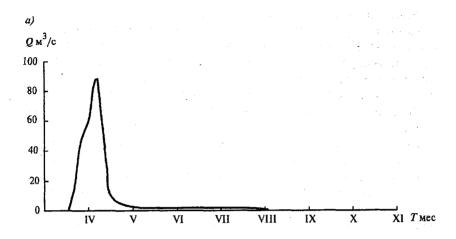
Таблица 1.1 Сведения об основных реках криолитозоны

Река	Место впадения	Длина реки, км	Площаль бассейна, тыс. км²	Средне- годовой расход, м ³ /с	Объем стока, км³/год	Площадь мерзлых пород, %	
						сплошная	прерывестая и островная
Обь	море	3650	2990	12300	404	•	30
Енисей	То же	5940	2580	18730	590	5.	60
Пясина	То же	818	182	2420	76	100	-
Лена	море Лаптевых	4400	2488	16600	523	80	20
Вилюй	р. Лена	2650	454	1520	48	100	-
Анабар	Лаптевых	897	121	370	12	100	-
Оленек	То же	2270	185	231	7	100	-
Алдан	р.Лена	2273	729	5200	164	60	40
Витим	То же	1978	225	1850	58	100	-
Олекма	То же	1436	210	1950	61	80	20
Хатанга	море Лаптевых	1640	364	3200	101	100	
Яна	То же	1490	238	1000	32	100	-
Индигирка	море	1977	360	1800	7	100	-
Алазея	То же	1590	74,7	270	9	100	-
Колыма	То же	2600	665	3900	123	100	-
Анадырь	море	1170	200	1400	44	100	-
Амгуема	Чукотское море	493	28,1	257	8	100	-
Амур	море	2850	1843	12500	394	100	40

1.3. Водный режим рек в зимний сезон

Зимний сезон на реках криолитозоны является самым маловодным сезоном, поэтому наиболее напряженные ситуации с водоснабжением возникают именно в этот период года. Водный режим рек зимой характеризуется весьма длительной и устойчивой меженью. поскольку с ее наступлением происходит постепенное истошение запасов подземных вод, интенсивность которого определяется емкостными характеристиками водовмещающих пород и их регулирующей способностью. В этот период на большинстве рек режим речного стока характеризуется резким спадом расходов воды, а затем и полным его прекращением. Продолжительность истощения зимнего стока не велика и составляет на малых реках примерно четвертую часть, на средних реках - третью часть зимнего сезона. Поэтому водность зимней межени большинства рек региона очень мала, в 5 – 10 раз меньше, чем летне-осенней межени [40]. Особенно низкая водность наблюдается на реках сплошной криолитозоны. Общее представление о водном режиме рек региона можно составить по рис. 1. 2, на котором приведены графики колебаний расходов воды в средние по водности годы.

Согласно классификации Б.Д. Зайкова, на территории распространения многолетнемерзлых пород по характеру водного режима реки можно разделить на западносибирский, восточносибирский, дальневосточный и тянь-шанский типы. Для региона характерно смешанное питание рек, однако в пределах плато, равнин и низменностей преобладает снеговое питание, а в горах - дождевое и ледниковое. Роль подземных вод в питании рек из-за распространения многолетнемерзлых пород незначительна, хотя в горных районах, геологические структуры которых характеризуются большой трещиноватостью, а также в районах активного проявления карста она довольно существенна (до 10 - 40 %). В последние годы в результате лабораторных экспериментов установлено, что дополнительным источником зимнего питания рек зоны многолетней мерзлоты может быть водоотдача в период промерзания песков, слагающих таликовые участки в поймах долин [27]. Однако в настоящее время данные этих экспериментов пока не подтверждены гидрометрическими измерениями.



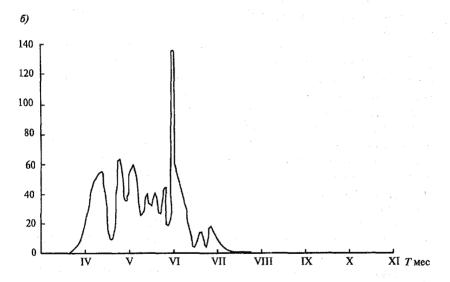


Рис.1.2. Графики колебаний расходов воды в средние по водности годы. a - равнинный район: р. Чилии у г.п. Чилии, 1980 г., F = 3850 км 2 ; δ - горный район: р. Мома у с.Сасыр, 1979 г., F = 2340 км 2 .

Реки западносибирского типа характеризуются относительно невысоким и растянутым весенним половодьем, повышенным летне-осенним стоком и низкой зимней меженью, что объясняется сезонной зарегулированностью стока болотными массивами и широким распространением озер. К этому типу относятся реки региона, расположенные в пределах территории Западной Сибири.

Водный режим рек восточносибирского типа отличается высоким весенним половодьем и паводками в теплое время года. Наличие сплошной мерзлоты препятствует инфильтрации весенних талых вод и способствует их интенсивному поверхностному стоку, вследствие чего половодье и паводки проходят сравнительно быстро $(1-2\,\text{месяца})$. В холодный период года отмечается устойчивая и продолжительная зимняя межень. В течение очень долгой и суровой зимы подземное питание малых и средних рек прекращается и реки промерзают и перемерзают на значительное время. К этому типу принадлежат реки, протекающие к востоку от Енисея до р. Лены и реки бассейна Амура.

На реках дальневосточного и тянь-шанского типа половодье растягивается на 2 – 4 месяца, что объясняется неодновременным таянием снегов, наледей и ледников на разных высотных поясах. Максимум половодья проходит обычно в конце июня – середине июля. Характерной особенностью водного режима рек является превышение максимальных расходов летних и осенних паводков над максимумами весеннего половодья, а также широкое распространение наледей и полыней в холодный период. Зимняя межень также продолжительная и маловодная, реки ежегодно перемерзают. Этот тип рек характерен для территории Дальнего Востока, Забайкалья и Камчатки.

Таким образом, все реки региона, относящиеся по классификации Б.Д. Зайкова к рекам западносибирского, восточносибирского, дальневосточного и тянь-шанского типа, характеризуются весьма низким стоком в период зимней межени. Промерзание и перемерзание рек является характерной особенностью водного режима рек зимой, причем наиболее распространены перемерзающие реки. Так, перемерзанию подвержены не только малые и средние реки, но и такие крупные как, Оленек, Яна, Индигирка, Колыма и др.

Устойчивый зимний сток наблюдается обычно на больших реках или реках с аномальными условиями их формирования (текто-

нические разломы, повышенная криогенная трещиноватость пород, карст и др.). Эти реки расположены в основном в горных районах региона.

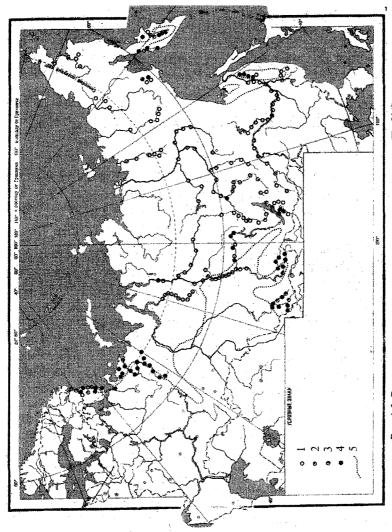
Зимняя межень является одной из фаз водного режима, поэтому характер водного режима рек в этот период, его особенности (зажоры, наледи, криогенные "паводки") оказывают определенное влияние на условия и закономерности формирования зимнего стока. В связи с этим ниже дается общая характеристика особенностей водного режима рек зимой.

1.3.1. Зажоры

Замерзание рек криолитозоны нередко сопровождается интенсивным шугообразованием и формированием зажоров. В настоящее время закономерности формирования и распространения зажоров изучены достаточно хорошо и теоретически, и экспериментально. Опубликованы материалы многолетних наблюдений в виде "Каталога заторных и зажорных участков рек СССР" и Р.В. Донченко [64] составлена карта зажоров льда на реках (рис. 1.3). Анализ имеющихся данных показывает, что число и размеры зажоров, сроки замерзания и разрушения зажорных скоплений на реках региона определяются комплексом гидротермических процессов, протекающих в областях с суровыми климатическими условиями.

Известно, что зажоры образуются на шугоносных реках на участках с повышенными уклонами и в местах стеснения русла островами, валунами, где образуются ледяные перемычки. Кроме того, развитие процессов зажорообразования наблюдается ниже обширных полыней в результате скопления шуги, вызывающего подъем уровня воды.

Следует отметить, что зажоры на реках криолитозоны наблюдаются не ежегодно. Их повторяемость и мощность значительно ниже, чем на реках, расположенных вне этой зоны, поскольку низкие температуры воздуха способствуют быстрому смерзанию шуги и формированию ледяного покрова [64]. Тем не менее на шугоносных реках, отличающихся повышенными уклонами, наличием порогов и перекатов, т.е. в горных районах, формирование ледяного покрова нередко сопровождается образованием зажоров. Повышенной зажорностью характеризуются устьевые участки рек Кольского полу-



1, 2, 3, 4 - зажоры повторяемостью соответственно: 0-40, 40-60, 60-80, 80-100 %; Рис. 1.3. Распространение зажоров на реках криолитозоны. (По [64]). 5 - граница криолитозоны.

острова, низовья Северной Двины и Печоры, а также реки Сибири и Дальнего Востока в пределах прерывистой и островной криолитозоны (см. рис. 1.3). Зажорные подъемы уровня воды на этих реках превышают 1,5-2,0 м. Наиболее интенсивным шугообразованием и формированием зажоров отличается р. Ангара, повторяемость зажоров на которой составляет 90-100%, а подъемы уровня 4-5 м. Зажорной активностью отличаются также притоки Верхней Лены (Витим и Олекма), где зажорные подъемы уровня в отдельные годы достигают 4,5 м.

Изучение закономерностей формирования зажоров на реках сводится прежде всего к определению зажорных уровней воды, что в свою очередь требует учета гидравлических и морфологических особенностей рек, а также физико-механических свойств льда зажорных скоплений. Решение этой задачи рассматривалось рядом исследователей. Наиболее полно методы расчета и прогноза зажорных уровней рассмотрены Р.В. Донченко [64] и В.А. Бузиным [31]. Рассмотрим их с позиций наибольшей применимости в районах распространения многолетнемерзлых пород.

В настоящее время для расчета и прогноза максимальных зажорных уровней воды H_{3*} используются общие для различных рек эмпирические зависимости, где основными аргументами являются гидроморфологические характеристики исследуемого участка реки: расход воды у перемещающейся вверх по течению кромки ледяного покрова, длительность шугохода и средняя за период замерзания реки температура воздуха [31], расход воды при замерзании реки и соответствующие ему значения глубины, ширины и уклона водной поверхности [64]. В практических целях наиболее часто используется способ, предложенный Р.В. Донченко, и основанный на применении связей от морфометрических характеристик русла реки:

$$H_{_{_{\mathbf{3}\mathbf{w}}}}=f(h_{_{\mathbf{3}\mathbf{w}}}),$$

$$h_{n\kappa} = A_{n\kappa} h_{n\kappa}$$

где $h_{_{3\%}}$ – глубина реки у верхней кромки зажорных скоплений, м; $h_{_0}$ – средняя глубина реки при открытом русле, м; $A_{_{3\%}}$ – коэффициент зажорности.

При наличии данных гидрометрических наблюдений для определения коэффициента $A_{_{3ж}}$ используется метод опорных кривых или график связи между $h_{_{3w}}$ и $h_{_0}$.

При отсутствии данных используется формула

$$A_{_{3\mathfrak{m}}}=I^{0,3}\,e^{\alpha},$$

где I – уклон водной поверхности; e – основание натурального логарифма; α - коэффициент, учитывающий форму русла реки. Для каждого исследуемого участка значение коэффициента α уточняется по мере накопления данных гидрофизических наблюдений, в общем случае $\alpha=3,30\pm0,10$.

1.3.2. Наледи

В литературе первые сведения о наледях на реках мерзлой зоны появились в XIX в. В это время широкое развитие получили комплексные географические исследования Сибири и Дальнего Востока в связи с сельскохозяйственным и промышленным освоением региона, переселенческим движением, строительством великой Транссибирской железной дороги. При изучении мерзлых пород большое значение имели результаты исследований ученых-путешественников Ф.П. Врангеля, А.Ф. Миддендорфа, Г.Л. Майделя. Ими же впервые описаны наледные явления, широко распространенные на реках мерзлой зоны.

Широкое изучение наледей мерзлой зоны было начато в конце XIX—начале XX в. в связи со строительством Транссибирской железнодорожной магистрали, когда строители впервые столкнулись с необходимостью учета наледных явлений. К этому времени относятся и первые научные обобщения, выполненные С.А. Подъяконовым [126] и А.В. Львовым [101].

Следует отметить, что изучению процессов наледеобразования и выяснению общих закономерностей режима и таяния наледей посвящено большое количество работ. Среди ранних исследований особое место занимают работы М.И. Сумгина, В.Г. Петрова, Б.В. Зонова, Н.И. Толстихина, В.П. Седова, П.Ф. Швецова и др.,

посвященные выяснению причин образования наледей и уточнению научных представлений о природе наледных процессов. Существенный вклад в изучение условий формирования наледей внесли А.М. Чекотилло, А.С. Симаков, А.А. Цвид, В.Н. Макаров, О.Н. Толстихин. В дальнейшем теория наледных процессов получила развитие в исследованиях В.Р. Алексеева. В результате многолетних исследований он обобщил обширные материалы о закономерностях проявления наледных процессов в различных областях земного шара, оценил их пространственно-временную изменчивость и роль в развитии элементов географической среды, а также рассмотрел методы изучения и картографирования наледной опасности и вопросы использования наледей в народном хозяйстве.

Большой вклад в исследование гидрологии наледей внесли Б.Л. Соколов [142, 144, 145, 147] и В.В. Кравченко [90 – 93], в трудах которых нашли отражение количественная характеристика развития наледных процессов, рассмотрены условия и закономерности формирования наледей, их режим в годовом и многолетнем циклах, закономерности их территориального распространения, роль наледей в формировании водного режима и водных ресурсов, разработаны методы расчетов наледного питания и наледного стока.

Таким образом, к настоящему времени условия и закономерности формирования наледей освещены в гидрологической литературе достаточно полно, составлены каталоги и схематические карты наледей [1, 42, 133, 141, 154]. На основе анализа имеющихся материалов ниже дается краткая характеристика распространения наледей в пределах исследуемого региона.

Согласно современным представлениям, наледи являются показателем сложной взаимосвязи поверхностных и подземных вод в условиях широкого распространения многолетнемерзлых пород. Наледи образуются в результате замерзания подземных и поверхностных вод, вытесненных через трещины на дневную поверхность льда вследствие промерзания путей их движения или уменьшения живого сечения подруслового и речного потока. В системе природных вод они занимают промежуточное положение между подземными и поверхностными водами, поскольку не относятся ни к категории подземных вод, хотя и образованы ими, ни к поверхностным водам, поскольку, еще не приняли участия в речном стоке и общем водообмене [Толстихин, 1966].

В настоящее время существуют различные классификации наледей: по условиям залегания (надземные и подземные), по отношению к редьефу местности (русловые, пойменные, террасовые, склоновые), по продолжительности существования (сезонные и многолетние) и т.д. С гидрологической точки зрения наибольший интерес представляют классификации по размерам (очень малые, малые, средние, большие, очень большие, гигантские) и по генезису наледеобразующих вод (наледи речных вод, наледи подземных вод, наледи смешанных вод).

Наледи на реках криолитозоны распространены повсеместно, т. е. встречаются практически на всех реках, за исключением закарстованных районов, где происходит поглощение речных вод. Речные наледи образуются при перемерзании рек, при закупорке русла шугой, донным льдом и твердыми наносами, при проседании ледяного покрова под давлением снега или транспорта, при торошении льда, при формировании криогенных "паводков" и т. п. [1, 18]. По времени развития и существования они относятся к категории сезонных наледей. Установлено, что они формируются на реках длиной до 500 – 700 км в 70 – 80 % зим и покрывают до 80 – 90 % протяженности реки [142].

Наиболее широко наледеобразование распространено на Северо-Востоке, где обнаружено около 10 тысяч наледей, общая площадь которых составляет примерно 14 тыс. км², а суммарный объем воды, аккумулированный в наледях, достигает 30 км³, или 60 % от общих запасов воды в наледях всей криолитозоны [142]. Здесь наибольшей наледностью характеризуются бассейны рек Яны, Индигирки, Колымы, Анадыря, Амгуэмы. В бассейне р. Индигирки ежегодно формируется самая крупная в России Момская наледь Улахан-Тарын. По данным А.И. Калабина [79], ее площадь в конце зимы достигает 150 км², а объем 400 млн. м³, О.Н. Толстихин отмечает, чт о в горных районах Северо-Востока в основном распространены крупные и гигантские наледи длиной от 1 до 5 км, шириной от 0,25 до 0,5 км и площадью от 0,5 до 2 км². В отличие от них для южных районов криолитозоны характерны очень малые, малые и средние наледи, более крупные встречаются редко. Например, в Забайкалье размеры наледей составляют от 20 до 240 тыс. м² [90], а в восточной части Станового нагорья средние наледи площадью до 1 км² составляют 66 % от их общего количества [42].

Таким образом, наибольшие размеры наледных массивов встречаются в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. В районах развития прерывистой и островной мерзлоты наледные процессы ослаблены, поэтому здесь размеры наледей значительно меньше. Однако в некоторых районах, в частности в зоне БАМ, общее количество их увеличивается, а относительная наледность речных бассейнов нередко превышает 4-5% [42].

1.3.3. Криогенные "паводки"

При исследовании зимнего стока рек криолитозоны большой интерес представляет изучение особенностей спада зимних расходов воды. Одна из этих особенностей заключается в том, что с наступлением зимнего сезона после установления ледостава изменяется обычный режим реки — наблюдается увеличение ее водности и формирование явления, напоминающего развитие паводка. В научной литературе это явление получило название зимнего "паводка" [Кусатов, Руднев, 1971]. Сущность этого явления в общем виде сводится к следующему.

В районах с суровыми климатическими условиями быстрое промерзание водонасыщенных горных пород и речных потоков под ледяным покровом снижает их водопропускную способность. Возникает дополнительное гидравлическое сопротивление – криогенный барраж [104]. При формировании криогенного барража на отдельных участках реки происходит подпор подземных вод и выход их в русло реки. В этот период на реке наблюдается повышение уровней и расходов воды. Поскольку формирование зимних подъемов уровней и расходов воды происходит преимущественно в результате отжатия подземных вод при промерзании водоносных горизонтов, это явление следует называть в отличие от зимних "паводков", образующихся в результате потепления погоды и последующего снеготаяния, криогенными "паводками".

Изученность вопроса. Криогенные "паводки" представляют собой сравнительно мало исследованное гидрологическое явление, что

объясняется прежде всего их формированием в основном на больших реках. Поэтому в течение длительного времени криогенные "паводки" оставались за пределами внимания многих исследователей, занимающихся изучением зимнего режима рек криолитозоны.

В научной литературе термин криогенные "паводки" впервые применил В.Н. Колотаев в 1986 г. При изучении условий водообмена речных и подземных вод он установил, что криогенная разгрузка бассейнов подземных вод "накладывается" на гравитационную с интенсивностью, в десятки раз превышающей последнюю, вызывая своеобразные криогенные "паводки". Они, по существу, являются второй зимней волной увеличения подземного притока в реки, характерной только для криолитозоны [84].

Однако основные представления о физической сущности явления и роли влияния природных факторов на условия формирования и развития криогенных "паводков" были заложены в более ранних исследованиях. Среди них особое место занимают работы, посвященные выяснению природы формирования криогенных "паводков". Благодаря анализу и обобщению данных стационарных наблюдений за зимним режимом рек, а также постановке лабораторных экспериментов первые исследователи дали объяснение физической сущности обнаруженного явления. Большой вклад в изучение процесса формирования криогенных "паводков" внесли экспериментальные исследования, выполненные А.В. Бойчук и А.Д. Голодовкиной [27]. Они впервые показали роль процесса "отжатия" воды из грубодисперсных грунтов подрусловых таликов при их промерзании в формировании зимнего стока рек мерзлой зоны. Физическую сущность "отжатия" они объясняют объемным расширением замерзающей воды, в результате чего подземные воды вытесняются под действием внутрипоровой компрессии от фронта промерзания, а капиллярная влага превращается в гравитационную. Установлено, что объемная водоотдача песков в зависимости от температуры воздуха может достигать 20 - 35 л/м³.

Значительный интерес представляют исследования В.Р. Алексеева [1], которые в некоторой мере подтверждают результаты экспериментов Бойчук и Голодовкиной. Так, при изучении наледей на реках Якутии и Амурской области он установил, что по мере промерзания водоносных отложений речных долин происходит отжа-

тие подземных вод или в русло реки, или в крупнообломочные отложения склонов террас, при этом наблюдается повышение уровней подземных вод. В качестве примера он приводит схему формирования наледи (рис. 1.4), составленную С.С. Осадчим. Из этой схемы видно, что в процессе промерзания аллювиальных отложений под влиянием криогенного напора уровень подземных вод постепенно поднимается вверх. Рисунок 1.4 показывает, что в случае промерзания реки до дна очагами разгрузки подземных вод являются рыхлосложенные отвалы склонов речных долин. По данным В.Р. Алексеева, рассмотренные процессы широко развиты в долинах горных рек длиной до 50 – 70 км в Саянах, Забайкалье, Якутии, на Северо-Востоке и в ряде районов часто являются основной причиной наледеобразования. Представляется, что на реках с устойчи-

Setamore etacking to be a face of with

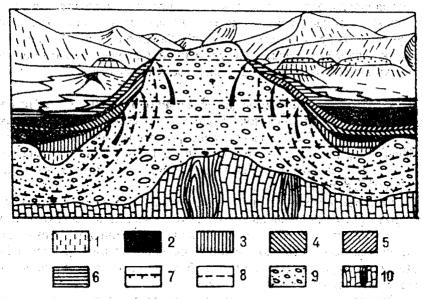


Рис.1.4. Схема формирования наледи на промерзающих реках. (По [1]). 1 – лед речной; 2 – 6 – слои наледного льда, последовательно формировавшиеся в результате криогенного напора; 7 – граница сезонной мерзлоты на соответствующем этапе наледеобразования; 8 – уровень подземных вод в различные моменты зимнего сезона; 9 – аллювиальные отложения; 10 – коренные горные породы.

вым зимним стоком развитие аналогичных процессов приводит к формированию криогенных "паводков".

Изучение закономерностей формирования криогенных "паводков" получило дальнейшее развитие в исследованиях Кусатова, Руднева (1971 г.), Аржаковой, Кусатова, Поповой (1998 г.) которые позволили получить ряд выводов, существенно уточняющих имевшиеся представления о закономерностях формирования зимних подъемов уровней воды. Установлено, что между максимальными уровнями воды и уровнями в начале формирования криогенного "паводка" существует прямая зависимость. Закономерность, выявленная путем обобщения большого количества исходных данных, позволяет определить максимальные уровни воды при отсутствии гидрометрических данных.

Таким образом, изучению процессов формирования криогенных "паводков" на реках посвящено весьма малое количество работ. В настоящей работе предпринята первая попытка систематизировать результаты исследований криогенных "паводков" – одного из мало изученных гидрологических явлений. Основной задачей этих исследований является разработка рекомендаций по учету зимних подъемов уровней и расходов воды для практических целей.

Формирование и распространение криогенных "паводков" на реках. Криогенный "паводок" представляет собой зимний подъем уровней и расходов воды в реке непосредственно на участке формирования криогенного барража. Выше и ниже участка отмечается обычное понижение уровней и расходов в результате сокращения подземного питания реки.

На территории сплошного распространения многолетнемерзлых пород криогенные "паводки" формируются в основном на больших реках, для которых характерны развитие пойменных таликов и значительная мощность рыхлых аллювиальных отложений (рис.1.5). На малых и средних реках они не наблюдаются вследствие перемерзания рек в самом начале зимнего сезона.

В районах прерывистой и островной мерзлоты зимние подъемы уровней воды отмечаются почти на всех реках. Согласно исследованиям М.Л. Маркова [104], на реках этой зоны в течение всго зимнего периода происходит сработка запасов как подрусловых, так и

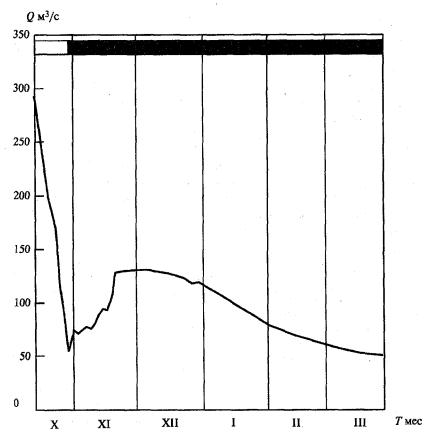


Рис.1.5. Гидрограф криогенного "паводка" на р. Алдане у г. Томмот, 1965-1966 г.

прирусловых подземных вод, но криогенный барраж проявляется в большей мере на малых водотоках, поэтому у них интенсивность сработки подземных вод ослабевает. Во второй половине зимы, с конца февраля, процесс промерзания воды в таликах и руслах сменяется процессом оттаивания. Криогенный барраж на малых реках ослабевает и увеличивается приток подземных вод, вызывая зимние подъемы уровней и расходов воды иногда уже в марте, протягиваясь до апреля.

Криогенные уровни воды. Масштабы развития криогенных "паводков", их формирование и количественные характеристики определяются комплексом природных факторов. Их можно разделить на три группы:

- гидрометеорологические, к ним относятся особенности циркуляции воздушных масс зимой, гидравлические характеристики русла и предшествующий водный режим реки;
- мерзлотно-гидрогеологические, определяющие характер распространения многолетнемерзлых пород, динамику емкостных запасов подземных вод, глубину промерзания деятельного слоя, геологические особенности строения русла реки и т.д.;
- антропогенные, т. е. различные гидротехнические сооружения, изменяющие условия залегания, питания и разгрузки подземных вод, а также способствующие увеличению интенсивности промерзания водоносных структур и т. д.

Из всего многообразия факторов главными являются:

- мощность и водообильность подрусловых и прирусловых таликовых зон, определяющие условия формирования криогенных подъемов уровней воды;
- погодные условия зимы, определяющие интенсивность и масштабы формирования "паводков";
- водность реки в начале формирования "паводка", определяющая высоту подъема зимних уровней воды.

Совокупное влияние этих факторов формирует различные по своей высоте и продолжительности криогенные "паводки".

В настоящее время непосредственные измерения мощности подрусловых таликов и запасов подземных вод в них не производятся из-за отсутствия необходимых гидрометрических средств измерения, а также из-за трудоемкости осенне-зимних работ. Емкостные характеристики таликов определяются косвенным путем. В качестве показателя, косвенно характеризующего мощность и водообильность таликов, принимают расход воды Q [114], длину реки L [14, 15] или представляют в виде произведения коэффициента водоотдачи μ на мощность H_{ν} и площадь F_{ν} водоносного комплекса или горизонта [93].

Значительное влияние на ход криогенных повышений уровня оказывает резкое понижение температуры воздуха. В качестве количественного показателя суровости зимы исследователи часто ис-

пользуют сумму зимних температур воздуха (Σt_3).

Зимний подъем зависит также от водности реки в начале зимнего сезона Q_0 и начального уровня воды H_0 , определяющего высоту "паводка". Установлено, чем больше водность реки перед формированием криогенного "паводка", тем больше расход "паводочной" волны и тем выше криогенный подъем $H_{\rm un}$. Следовательно,

$$H_{KP} = f(Q_0, H_0, L, \mu, H_r, F_r, \Sigma t_3).$$
 (1.1)

В данном случае амплитуда подъема криогенного уровня воды $H_{\rm kp}$ является интегральной характеристикой мощности и интенсивности "паволка".

Задача определения роли и значения отдельных составляющих подъема довольно проста и может быть решена путем факторного анализа. Так, в результате анализа криогенных уровней воды на р. Лене [18] была выявлена зависимость, аналитическое выражение которой представлено в виде

$$H_{\rm gp} = aH_0 + b, \tag{1.2}$$

где H_0 – уровни воды в начале формирования криогенного "паводка", см; a и b – расчетные параметры формулы.

Зависимостей $H_{\rm kp} = f(L, \mu, H_{\rm r}, F_{\rm r}, \Sigma t_3)$ расчетного характера не получено.

С помощью формулы (1.2) можно определить криогенные подъемы уровня воды для участков рек, не освещенных данными зимних наблюдений; кроме того, она может быть использована для прогноза максимальных уровней воды зимой для обоснования устройства ледовых переправ на реках мерзлой зоны. В качестве исходных данных используются данные о расходе воды Q_0 и соответствующее ему значение H_0 .

Таким образом, условия и факторы формирования зимнего стока рек, расположенных в областях развития многолетнемерзлых пород, весьма сложны и разнообразны. Их суммарное влияние проявляется в своеобразии режима стока рек региона, а именно в широком распространении явлений промерзания и перемерзания, которые вне этого региона практически не наблюдаются.

Изученность зимнего стока

2.1. Развитие научных представлений и знаний о водном режиме рек криолитозоны в зимний период

Познание закономерностей формирования водного режима рек криолитозоны в зимний меженный период года издавна привлекало внимание исследователей. Обзор литературы показывает, что представления о водном режиме рек мерзлой зоны формировались на протяжении длительного времени, поскольку издревле люди селились по берегам рек и озер мерзлой зоны. Жизнь и деятельность жителей севера самым тесным образом были связаны с их водным режимом. Местным жителям, несомненно, были известны такие особенности зимнего режима рек, как прекращение их стока вследствие перемерзания, наледи, полыньи и т. д. Людям приходилось сталкиваться с ними при смене мест кочевий, во время охоты и рыбной ловли, при использовании речного льда и снега для питьевых и бытовых целей.

Накопление знаний о водном режиме рек криолитозоны происходило одновременно с накоплением гидрографических сведений. Многочисленные сведения о реках и их режиме поступали от русских землепроходцев по мере их продвижения на север и восток.

Начало изучения северных рек относится к XI и XII вв. и связано с расширением торговых отношений Великого Новгорода по реке Печоре. В работе Б.Д. Зайкова отмечается, что И.Д. Беляев, изучая историю развития географических открытий в Древней Руси, указывает на то, что в XI и XII вв. русские "так далеко заходили на север, как в то время не заходил ни один европейский народ." [69, с. 14]. Таким образом, речная сеть Печоры сыграла исключительную роль в освоении сибирских рек, поскольку по ней был найден водный путь в Сибирь на р. Обь.

Освоение речных систем Сибири было начато во второй половине XIV в., когда русским землепроходцам стали известны низовья

р. Оби. В XVI в. усилились поиски северного морского пути из России в Китай, Индию, началось активное продвижение русских в Сибирь. В освоении обширных пространств Сибири огромное значение имел поход Ермака, начавшийся осенью 1581 г. Его путь шел по рекам Каме, Чусовой в глубь Западной Сибири. В 1582 г., достигнув Иртыша, Ермак покорил Сибирское царство казахского князя Кучума. Поход Ермака положил начало быстрому овладению Сибирью и Дальним Востоком и освоению великих сибирских рек. К концу XVI в. р. Обь была пройдена землепроходцами и использована ими для дальнейшего продвижения в бассейны Енисея и Лены, а затем Колымы, Анадыря.

В литературе первые сведения о Енисее появились в 1598 г. в донесениях Федора Дьякова. Известный исследователь Сибири А.Ф. Миддендорф пишет, что "русские проникли на Енисей, следуя от устья Таза вверх по реке, они переправились потом на Турухан, текущий к востоку". [111, с. 81]. Затем сведения об освоении Енисея поступали от землепроходцев Кондратия Курочкина (1610 г.), Петра Албычева и сотника Рукина (1618 г.), Максима Перфильева (1627 г.), Андрея Дубенского (1628 г.). В 1628 г. основанием г. Красноярска завершается освоение большей части Енисея и Ангары.

Начало освоения р. Лены связано с именем десятника Василия Бугра, который в 1628 г. по Южно-Ленскому водному пути достиг Лены и спустился по ней до устья Чаи. В те годы самое длительное путешествие (1620 — 1630 гг.) совершил туруханский промышленник Пенда. Он со своими людьми поднялся вверх по р. Нижней Тунгуске, затем проплыл по Лене до того места, где впоследствии был основан г. Якутск, и вернулся обратно в г. Туруханск.

В 1628 — 1630 гг. были открыты более короткие водные пути на Лену — Северо-Ленский и Ленский, и в 1632 г. сотник Петр Бекетов на Лене основал острог Якутск. Впоследствии г. Якутск стал отправным пунктом дальнейших походов землепроходцев, открывших реки Оленек, Яну и Индигирку (Иван Ребров, 1633 г.; Елисей Буза, 1636 г.; Илья Перфильев, 1638 г.; Иван Постников, 1639 г.), пролив между Азией и Америкой (Семен Дежнев, 1640 — 1648 гг.), реки Чукотки (Михаил Стадухин, 1641 — 1651 гг.), р. Амур (Василий Поярков, 1643 — 1646 гг.; Ерофей Хабаров, 1649 — 1653 гг.).

В 1675 г. Николай Спафарий во время своего путешествия в Китай много внимания уделил описанию рек Иртыша, Оби, Кети, Енисея, Ангары, Лены, Амура и рек, впадающих в оз. Байкал.

В 1697 г. Владимир Атласов отправился из Анадырского острога на юг и был первым землепроходцем, совершившим путешествие по Камчатскому полуострову. В двух отчетах, записанных с его слов, приводятся подробные сведения о гидрографии, географии и этнографии Камчатки.

К концу XVII в. большая часть сибирских рек была освоена. В своих многочисленных донесениях землепроходцы сообщали о водном и ледовом режиме рек, рыбных богатствах, сплавных качествах и т. д. Несмотря на то, что эти сведения были не полными и не точными и носили самый общий познавательный характер, во второй половине XVII в. появилась первая карта, отражающая состояние гидрографического изучения Сибири — "Чертеж Сибирской земли", составленный в 1667 г. П.И. Годуновым. В 1701 г. С.У. Ремезов издал первый русский географический атлас из 23 карт "Чертежная книга Сибири".

В истории развития гидрологии XVIII в. занимает особое место. В это время большое развитие получили экспедиционные исследования, а вторая половина XVIII в (1768 – 1774 гг.) впоследствии была названа эпохой академических экспедиций. В XVIII в. реки мерзлой зоны изучали:

- экспедиция под руководством Д.Г. Мессершмидта в 1719 –
 1727 гг. (реки Обь, Енисей, Нижняя Тунгуска, Ангара, Лена и др.);
- Первая (1725 1730 гг.) и Вторая (1733 1743 гг.) камчатские экспедиции В. Беринга. Особенно большое значение в изучении рек имела Вторая камчатская (Великая северная) экспедиция, организовавшая сеть станций для наблюдения за замерзанием и вскрытием рек. Участники экспедиции В. Прончищев, Д.Я. Лаптев, Х.П. Лаптев, С.И. Челюскин, Г. Миллер, С.П. Крашенинников и др., изучая природу Сибири и Камчатки, много внимания уделили гидрографическим исследованиям и описанию течения рек;
- экспедиция П.С. Палласа (1768—1774 гг.), представившая описание рек Сибири и Забайкалья. При описании рек указывались скорость и направление течения, протяженность, ширина и глубина реки, строение берегов и дна, сроки замерзания и вскрытия, степень мутности;

- экспедиции И.Г. Георги (1768 1771 гг.) и И.В. Фалька (1769 1773 гг.) по Западной Сибири и Прибайкалью;
- экспедиция Биллингса из губы Святого Лаврентия через Чукотку к р. Большой Анюй (1791 1792 гг.).

Академические экспедиции собрали огромный фактический материал по гидрографии и гидрологии рек мерзлой зоны, но исключительное значение XVIII в. состоит в том, что это было время первых научных обобщений о реках и "замерзлой земле" [Ломоносов, 1757, с. 170].

Первый русский академик М.В. Ломоносов в "Сочинениях" высказал ряд положений, касающихся основ гидрологической науки. Он указал на существование различных источников питания рек, наличие у рек водосборной площади и водораздела, взаимосвязь поверхностных и подземных вод, имел правильное представление о круговороте воды на земном шаре. Ломоносов в своих трудах большое внимание уделил выяснению общих закономерностей замерзания воды и образования ледяного покрова на реках, вскрытию рек и деятельности льда, впервые обратил внимание на особенности формирования зимнего режима рек в суровых мерзлотно-климатических условиях. В частности, свои представления об этом он выразил следующим образом: "И когда студеной зимний воздух поверхность океана знобит морозами, тогда верхняя вода становится студенее исподней, следовательно, пропорционально тяжелее; отчего по гидростатическим законам по разной тягости верхняя по дну опускается, нижняя встает к верху..." [Ломоносов. Сочинения, т. 5, 1902, с. 330]; "Пресная вода замерзает с веръху к низу, и чем мороз сильнее и далее действует, тем лед становится толще. В Сибири малые реки нередко до дна промерзают" [Ломоносов. Сочинения, т. 7, 1934, с. 337]. Несомненно, теоретические представления М.В. Ломоносова имели огромное значение в познании сложной взаимосвязи климат - реки - многолетняя мерзлота.

В XIX и в начале XX вв. продолжается накопление знаний о водном режиме рек мерзлой зоны, связанное в основном с деятельностью Русского географического общества (1845 г.) и Главной геофизической обсерватории (1849 г.). Под их руководством, а также Академии наук России и других ведомств были организованы экспедиции Ф.П. Врангеля и Анжу по Восточной Якутии (1820 – 1823 гг.);

Эрмана из Якутска в Охотск (1829 г.); А.Ф. Миддендорфа по рекам Енисею, Пясине, Хатанге, Верхней и Нижней Таймыре, бассейну Амура (1842–1846 гг.); А.А. Кейзерлинга по Печорскому краю (1843–1846 гг.); Э.К. Гофмана по рекам Северного Урала (1847–1848, 1950 гг.); Ахтэ по Забайкалью (1849–1952 гг.); Д. Юрьева, изучавшего в 1852 г. реки обоих склонов Северного Урала; Р.К. Маака по Вилюю, Оленьку, Амуру и другим рекам Восточной Сибири (1855–1859 гг.); Шварца по Сибири (1855 – 1858 гг.); И.А. Лопатина по Витиму, Енисею (1865–1866 гг.); Г.Л. Майделя по Северо-Востоку России (1869–1870 гг.); А.Л. Чекановского по рекам Нижней Тунгуске, Майеро, Оленеку, Лене (1873–1875 гг.); П.И. Крузенштерна по р. Печоре (1874, 1876 гг.); Бунге и Толля (1885–1886 гг.); Э.Б. Штеллинга по Ангаре (1886–1887 гг.); И.Д. Черского по Яне и Индигирке (1891–1892 гг.); Д.Д. Руднева по р. Адзьве (1904 г.); И.П. Толмачева по р. Хатанге (1905 г.).

Материалы, собранные экспедициями, и обобщение данных систематических метеорологических наблюдений позволили уже к концу XIX в. составить правильные представления о водном режиме рек криолитозоны и его особенностях зимой. В эти годы впервые были выполнены важные научные обобщения.

В 1817 г. Н.В. Семивский, наблюдая за ледовыми явлениями на р. Ангаре, описал процесс замерзания этой реки: "Иногда не видно ни одной на поверхности ее льдины, как вдруг всплывающих изпод воды появляется их множество, которые, приставая к прочим льдинам, соединяются и одна к другой примерзают, ..." [139, с. 9].

Крупный вклад в познание зимнего режима рек мерзлой зоны внесли исследования А.Ф. Миддендорфа [111], он впервые описал наледные явления, широко распространенные на реках мерзлой зоны. В его работе приводятся сведения о том, что под влиянием сильных морозов реки Якутии, промерзая на перекатах, представляют собой цепочки озер, а многие малые реки промерзают до дна на значительные расстояния; о существовании на реках в местах выхода теплых ключевых вод участков, свободных от ледяного покрова в течение всей зимы.

А.Ф. Миддендорф проявлял большой интерес к процессу ледообразования на реках. По его мнению, при замерзании рек Сибири большую роль играет донный лед, поднимающийся со дна большими массами и образующий ледовые явления на реке. Он также счи-

тал, что образование донного льда в водном потоке связано с переохлаждением дна вследствие проникновения туда "сильного зимнего холода". Таким образом, А.Ф. Миддендорф обратил внимание на определяющую роль климатических факторов (температуры воздуха) в образовании ледовых явлений на реках.

Исключительное значение в формирование основ гидрологии имеют труды выдающегося климатолога и географа А.И. Воейкова. Основополагающее значение его трудов [Воейков, 1884, 1887] состоит в том, что в них сформулированы фундаментальные положения гидрологии о тесной взаимосвязи климата и водного режима рек. По климатической классификации А.И. Воейкова реки мерзлой зоны (Обь, Енисей, Лена и др.) принадлежат к типам Д и В, т. е. к рекам, на которых наблюдается половодье вследствие таяния снега весной или в начале лета от таяния снега в горах, при этом значительную часть воды реки получают от дождей.

В 1886 г. выходит в свет труд М.А. Рыкачева "Вскрытия и замерзания вод в Российской империи", в котором собраны и обобщены данные наблюдений по 921 пункту, причем впервые для Сибири приводятся средние многолетние данные по вскрытию и замерзанию рек. Результаты обобщений представлены в виде карт сроков вскрытия и замерзания рек, продолжительности ледостава. Примечательно, что на основе анализа климатических условий весны и осени в разных регионах М.А. Рыкачев впервые сделал вывод о том, что для расчета средних многолетних дат вскрытия и замерзания северных рек требуется менее длительный ряд наблюдений (30 лет), чем для южных (50 лет). В своей работе он большое внимание уделил анализу особенностей вскрытия и замерзания рек, имеющих различные по размерам бассейны. Им было установлено, что малые реки вскрываются и замерзают раньше, чем большие.

Интересные и разнообразные сведения, касающиеся особенностей зимнего режима рек мерзлой зоны приводит Г.Л. Майдель, изучая северо-восточные районы Сибири [102]. По его данным, в осенне-зимний период на реках Сибири наблюдаются следующие явления.

1. Понижение уровня воды в начале зимы, обусловленное сокращением запасов воды в речном бассейне: "ввиду того, что почва на известной глубине большей частью остается постоянно мерзлою, и

приток воды зимой очень слаб, ... уровень воды как в реках, так и в бесчисленных озерах должен заметно понижаться" [102, с. 356].

- 2. Формирование многочисленных наледей и полыней. Г.Л. Майдель дает подробное описание встреченных им наледей и полыней, указывает на особенности их формирования на реках Якутии: "река Кыры берет начало из болотистого озера, находящегося в седловине Тас-Хаяхтаха. Вверху на водоразделе и на некотором расстоянии книзу от него все воды уже замерзли, по всей вероятности, до самого дна. Но к середине восточного склона р. Кыры получает два притока, очевидно текущих под землей. Река разом становится многоводной и с большой силой стремится вперед, так что в течение всей зимы на ней не может образоваться постоянного ледяного покрова" [102, с. 372]. Г.Л. Майдель впервые описал гигантскую Кыра-Нехаранскую наледь и определил занимаемую ею площадь в 100 км². Позднее П.Ф. Швецов и В.П. Седов [Швецов, Седов, 1941] уточнили размеры Кыра-Нехаранской наледи: ее площадь равна 25 км², а объем образующегося за зиму льда составляет 38 млн. м³.
- 3. Ежегодные подъемы уровня воды в верхнем течении р. Ангары, наблюдающиеся после установления ледостава и вызывающие наводнения. Установлено, что указанное явление вызывается закупоркой живого сечения реки всплывающим донным льдом.

Кроме того, исследуя промерзающие до дна реки Якутии, Майдель обнаружил наличие у них таликовой зоны и отметил, что только тогда, когда промерзает подрусловой талик, образуются наледи на этих реках. Им также описаны так называемые водяные забереги, наблюдающиеся на реках Енисее, Оби, Иртыше, Яне.

В 1898 г. В.И. Йохельсон обратил внимание на существование на реках незамерзающих участков. Он пишет о полыньях следующим образом: "Коркодон замерзает в некоторых местах только в конце декабря или в январе. Это интересное явление надо объяснить не одной быстротой течения, а также подземными ключами, которые встречаются как по Коркодону, так и на других притоках верховьев Колымы" [Йохельсон, 1898, с. 282].

Большое значение для формирования представлений о водном режиме рек в маловодный период года имели работы **Я.В.** Стефановича [151] и Ф. Шперка [175].

В конце XIX в. на крупных судоходных реках мерзлой зоны по-

явились первые водомерные посты, ведущие наблюдения за уровнем воды в основном в период навигаци. В их создании большая заслуга принадлежит Навигационно-описной комиссии (НОК), созданной в 1874 г. Министерством путей сообщения. В отдельных случаях водомерные наблюдения производились на постах, установленных другими ведомствами (Главное управление землеустройства и земледелия и др.) и частными лицами.

Одновременно с организацией стационарных наблюдений Министерство путей сообщения приступило к систематическому исследованию всех судоходных рек России. За 1875—1916 гг. был выполнен огромный объем изыскательских и съемочных работ по изучению водного режима рек бассейна Печоры и рек Сибири. Результаты исследований были опубликованы в виде серии изданий "Материалы для описания русских рек и истории улучшения их судоходных условий" (73 выпуска) и отдельных монографий по бассейнам рек Селенги, Лены, Зеи, Нижнего Амура, Енисея. Полный перечень выпусков и монографий приводится в работе Б.Д. Зайкова [69].

Исключительную роль в развитии знаний о водном режиме рек мерзлой зоны сыграла организация стационарной сети водомерных пунктов. В связи с этим ниже весьма кратко рассматривается история развития сети гидрологических станций и постов на реках региона.

Начало водомерных наблюдений на реках мерзлой зоны относится к 1894 г., когда на р. Амуре у с. Покровка был открыт первый водомерный пост. В 1899 г. на р. Лене у населенных пунктов Олекминск и Якутск частновладельческими компаниями пароходств были открыты первые водомерные посты [38]. В 90-х годах водомерные наблюдения начались и на наиболее крупных реках Западной Сибири (Обь, Иртыш, Бия, Томь) [87].

В начале XX в. сеть водомерных постов постепенно расширялась. Ленской описной партией под руководством С.А. Васильева и А.Н. Лагутина были созданы посты на реках Алдане (1911 г.), Лене (1913 г.), и Вилюй (1914 г.) и первые гидрометрические створы на Верхней Лене. В Западной Сибири первые инструментальные измерения расходов воды были произведены под руководством Е.В. Близняка на р. Енисее в 1911 г. и р. Кети в 1912—1914 гг. К 1917 г. в Западной Сибири действовало около 50 водомерных постов и не более 15

гидростворов с эпизодическими измерениями расходов воды. В 1901-1910 гг. гидрометрические наблюдения были начаты на реках Сунгари, Шилке, Амуре, Зее, Селенге, Енисее, Ангаре. В этот период в Амурской области под руководством П.П. Стакле были открыты 25 водомерных постов, в Приморском крае под руководством А.И. Булгакова – 44 водомерных поста и одна гидрометрическая станция на р. Имане [159]. Всего в дореволюционный период на реках мерзлой зоны действовало около 130 водомерных постов и 20 гидрометрических станций, т. е. сеть наблюдений охватила почти все судоходные реки России, не было водомерных постов лишь на реках Крайнего Севера и Северо-Востока страны. Однако в этот период стационарные наблюдения в большинстве случаев велись лишь эпизодически, в навигационный период, сведения об уровнях воды не были увязаны с современными данными, поэтому в настоящее время значительная часть существующих данных наблюдений утратила свою ценность.

С 1917 г. сеть водомерных пунктов быстро расширяется. Исключительным событием в развитии гидрологических исследований является организация в 1919 г. центрального научно-исследовательского Государственного гидрологического института и в 1920 г. крупнейшего специализированного учреждения по исследованию природных условий полярных областей земного шара Арктического и антарктического научно-исследовательского института (с 1994 г. Государственного научного центра Российской Федерации – ААНИИ).

В 1924 г. на I Всероссийском гидрологическом съезде были рассмотрены конкретные предложения о принципах создания сети станций и постов на территории СССР. В 1929 г. создается Единая гидрометеорологическая служба СССР, происходит объединение сети гидрологических и метеорологических станций и постов, находившихся в подчинении различных ведомств и организаций. С этого времени начинается интенсивный рост сети станций и постов. Развитие сети гидрологических станций и постов на реках мерзлой зоны показано на примере рек Якутии (табл. 2.1).

На 1 января 1985 г. на реках мерзлой зоны насчитывался 1061 пункт наблюдений. Их распределение по региону является крайне неравномерным. Один пункт наблюдений приходится в среднем на 8000 –

10 000 км² территории, в то время как в целом по России один пункт освещает площадь, равную примерно 3000 км². Особенно редка сеть станций и постов на севере региона (тундровая зона).

Таблица 2.1 Развитие сети гидрологических станций и постов на реках Якутии

Год	Общее число пунктов	Год	Общее число пунктов	Год	Общее число пунктов
1899	2	1945	96	1980	280
1914	4	1950	130	1990	237
1917	-	1955	150	1992	224
1927	16	1962	169	1995	207
1933	31	1967	193	1997	182
1940	66	1970	238	1998	177

Таким образом, гидрологическая изученность территории, отличающейся весьма суровыми и сложными природными условиями, где наблюдаются практически все возможные опасные гидрометеорологические явления и процессы, остается все еще крайне низкой. Совершенно не развита сеть воднобалансовых станций, а наблюдения за наледными явлениями прекратились еще в середине 80-х годов. Всего на территории мерзлой зоны были открыты только две стоковые станции – Бомнакская (1934–1968 гг.) и Пиканская (1934-1949 гг.). В настоящее время действует одна Колымская станция, открытая в 1949 г. На стоковых станциях велись исследования по изучению механизма формирования стока рек в сложных мерзлотно-климатических условиях, поэтому наблюдения включали широкий комплекс микроклиматических, водно- и теплобалансовых, снегомерных и других измерений. Результаты исследований, выполненных на станциях, позволили значительно углубить представления о влиянии индивидуальных особенностей водосборов (характер рельефа, растительного и почвенного покрова, криогенных явлений и процессов и др.) на формирование водного режима рек мерзлой зоны. К сожалению, эти экспериментальные исследования так и не получили дальнейшего развития.

В начале XX в. публикуются результаты исследований В.Б. Шостаковича, автора большого числа работ по климату, мно-

голетней мерзлоте, ледовому и термическому режиму рек азиатской части России. Многие положения, высказанные Шостаковичем в своих работах, легли в основу современных методов краткосрочных прогнозов ледовых явлений на реках.

Наиболее крупным исследованием Шостаковича является "Вскрытие и замерзание вод Азиатской России" [174], где обобщены данные по 947 пунктам исследуемой им территории. В.Б. Шостакович впервые рассмотрел различные факторы, определяющие вскрытие и замерзание рек, и выявил, что главную роль в процессе замерзания рек играет температура воздуха. Дополнительными факторами, влияющими на замерзание рек, являются водоносность реки, температура воды, скорость и направление течения реки. Таким образом, Шостакович показал сложность механизма вскрытия и замерзания рек, обусловленную как климатическими, так и механическими факторами. Он сопоставил построенные им карты сроков вскрытия и замерзания рек с картами дат перехода средней суточной температуры воздуха через 0 °С весной и осенью и установил, что существует более тесная связь указанной температуры воздуха со сроками вскрытия, чем со сроками замерзания.

Анализируя временную изменчивость исследуемых характеристик, Шостакович подтвердил предположение А.Ф. Миддендорфа о том, что на севере Сибири даты вскрытия и замерзания более устойчивы, чем на ее юге. Кроме того, Шостаковичем дальше были развиты представления М.А Рыкачева о механизме вскрытия и замерзания рек. В своих исследованиях на конкретных материалах он показал, что зависимость между вскрытием и замерзанием рек и температурой воздуха может быть более точной, если использовать суммы положительных и отрицательных температур воздуха. Шостакович также раскрыл физическую сущность явлений замерзания и вскрытия рек.

Он проявлял большой интерес к особенностям формирования зимнего режима рек Восточной Сибири. Им было установлено, что в связи с малой высотой снежного покрова в Забайкальской и Амурской областях часто наблюдается промерзание рек до дна на перекатах, а в омутах и ямах подо льдом остается вода. Иногда на отдельных участках отмечается подрусловой сток, однако в большинстве случаев эти участки оказываются совершенно изоли-

рованными со всех сторон мерзлыми грунтами. В.Б. Шостакович также обратил внимание на то, что на р. Ангаре осенние ледовые явления появляются значительно позже, а весенние – раньше по сравнению с другими реками данного района. Исследователи Сибири уже давно указывали на эту особенность замерзания Ангары, однако причину этого явления они видели в очень больших скоростях течения реки. А.Ф. Миддендорф указал главную причину этого явления – поступление теплых вод из оз. Байкал, поверхность которого покрыта мощным слоем льда.

В начале XX в. большой интерес исследователей вызывают полыньи, наблюдающиеся зимой на тех участках рек, где существуют выходы теплых подземных источников и быстрое течение рек [Подъяконов, 1903; Близняк, 1916; Сумгин, 1927 и др.].

В послеоктябрьский период гидрологические исследования районов многолетней мерзлоты получили интенсивное развитие. Интересы дальнейшего развития страны требовали всестороннего изучения природных, в том числе и водных, богатств Сибири и Дальнего Востока. В 1925 г. Академией наук СССР была организована крупная комплексная экспедиция по изучению производительных сил Якутии. В работе экспедиции принимали участие многие молодые исследователи, впоследствии ставшие видными советскими учеными (Б.Д. Зайков, П.К. Хмызников, С.И. Коплан-Дикс). Научными исследованиями были охвачены бассейны рек Алдана, Вилюя, Яны и Колымы. Гидрологические отряды экспедиции собрали исключительно ценный материал о водном режиме рек республики, причем исследования, выполненные в те годы, не утратили своей ценности и в настоящее время. Так, монография П.К. Хмызникова [1934] до сих пор является единственной научной публикацией по гидрологии бассейна р. Яны.

Большие съемочно-описные гидрографические и гидрологические исследования велись в 20-х – 30-х годах Главэнерго, Наркомземом, Водоканалпроектом, Гипроводтрансом в Западной и Восточной Сибири в бассейнах рек Верхнего Енисея и Ангары, Томи, Селенги и др.

В 30-е годы Академия наук СССР совместно с Географическим обществом провела экспедиционные исследования рек севера Западной Сибири. В эти же годы аналогичные работы велись Амурской

экспедицией ГГИ на Нижнем Амуре, экспедицией Всесоюзного арктического института (ГНЦ РФ – ААНИИ) на реках Пясине, Анабаре, Индигирке, Колыме. Результаты научных исследований были опубликованы в Трудах СОПС АН СССР (серия Якутская, вып. 19 и 25), Всесоюзного арктического института (т. 25, вып. 105, 106 и 128), в работах по гидрологии верхнего Алдана [Зайков, 1938], по кадастровому описанию рек Колымско-Индигирского района [Зонов, 1934], а также в виде многочисленных навигационных карт и атласов

В связи с открытием Северного морского пути от Белого моря до Берингова пролива в 1933 г. на мысе Шмидта было создано Бюро погоды, реорганизованное затем в 1973 г. в Певекское управление гидрометслужбы. Организация Певекского управления явилась важным этапом в изучении гидрометеорологического режима Арктического региона. С этого времени начинается систематическое изучение водного режима рек Чукотского полуострова.

В советский период одновременно с ростом числа пунктов наблюдений, дающих все больший объем гидрометрической информации, появились публикации Д.И. Кочерина, М.Э. Шевелева, В.А. Урываева, Н.Д. Антонова, А.М. Норватова, заложившие основу развития одного из важнейших направлений гидрологической науки — исследования минимального и меженного стока рек. В эти же годы проводятся аналогичные исследования в районах распространения многолетнемерзлых пород [Однодворцева, 1938; Зонов, 1942; Антонов, 1957].

Начало активного изучения водного режима рек мерзлой зоны относится к 60-м годам, когда под руководством ГГИ по всей стране были развернуты обширные гидрологические исследования. Необходимость исследований была обусловлена задачами интенсивного освоения природных богатств Западной Сибири и Северо-Востока страны. К этому времени в ГГИ был накоплен достаточный опыт изучения режима рек как на основе обобщения гидрометрических наблюдений, так и по результатам работ научных экспедиций. Для гидрологических исследований этого периода характерен большой интерес к особенностям формирования водного режима рек в сложных мерзлотно-климатических условиях, в частности, к изучению закономерностей формирования минимального

зимнего стока как основной гидрологический характеристики, широко используемой в водохозяйственном и строительном проектировании.

Под научным и организационным руководством ГГИ проводились комплексные гидрологические исследования на крупных новостройках Сибири и Дальнего Востока - в районе оз. Байкал, на трассах нефте- и газопроводов Западной Сибири, в зоне Байкало-Амурской магистрали. Сложные природные условия районов распространения многолетнемерзлых пород и слабая гидрологическая изученность региона в значительной мере затрудняли решение иженерно-гидрологических задач, возникающих при проектировании и строительстве нефте - и газопроводов, железных и шоссейных дорог, мостовых переходов, населенных пунктов, промышленных предприятий. В этих условиях научное обобщение имеющейся информации о гидрологическом режиме, доведенное до конкретных рекомендаций по расчету водообеспеченности отдельных районов и по определению расчетных гидрологических характеристик, было особенно важным. В результате многолетних исследований в ГГИ сложилась своя школа специалистов-гидрологов по мерзлой зоне, основным представителем которой являлся Б.Л. Соколов. В трудах института освещаются вопросы формирования стока, ледового режима, русловых процессов и других элементов гидрологического режима рек мерзлой зоны.

Открытие крупнейших запасов угля, нефти и газа в бассейнах рек Северного края и Западной Сибири положило начало интенсивному хозяйственному освоению севера Западно-Сибирской низменности. В 1964 г. в ГГИ были начаты экспедиционные гидрологические исследования региона. Программа работ Западно-Сибирской экспедиции включала широкий комплекс исследований, в том числе изучение зимнего режима водных объектов. Одним из важнейших результатов работ Западно-Сибирской экспедиции является публикация технической записки "Водные ресурсы и режим рек Западной Сибири и Крайнего Севера в зоне прохождения магистральных газопроводов" [43].

В начале 70-х годов большое внимание уделяется вопросам гидрометеорологического обеспечения проектирования и строительства Байкало-Амурской магистрали. Усилия ученых в этот период были

направлены на разработку практических рекомендаций по определению основных гидрологических характеристик, сведения о которых использовались бы в практике строительного проектирования в зоне БАМа. Для выполнения этой задачи была организована Комплексная гидрометеорологическая экспедиция Госкомгидромета (КГМЭ БАМ), в состав которой входили экспедиции и отряды ГГИ, КазНИИ, ДВНИИ, Иркутского, Забайкальского, Дальневосточного и Якутского управлений гидрометслужбы. Были созданы экспериментальные полигоны, программы которых предусматривали детальное изучение гидрологических явлений и процессов в условиях мерзлой зоны: тепловоднобалансовый полигон "Могот" на севере Амурской области, наледные полигоны "Мурурин" в Северном Забайкалье, "Синий камень" в Восточных Саянах, гидрологический полигон в бассейне р. Киренги. Итоги научных и экспедиционных исследований опубликованы в виде монографии "Водные ресурсы рек зоны БАМ" [42] и "Практических рекомендаций по расчету гидрологических характеристик в зоне хозяйственного освоения БАМа" [131].

Большие территориальные исследования проводятся и рядом научно-исследовательских и учебных институтов Владивостока, Якутска, Иркутска, Томска и других городов Сибири и Дальнего Востока.

Обширные гидрологические исследования на Северо-Востоке страны ведутся Дальневосточным научно-исследовательским гидрометеорологическим институтом (ДВНИГМИ) – работы В.Н. Глубокова, И.А. Некрасова, А.И. Калабина, А.С. Кузнецова и др.

На территории Якутии водный режим рек изучает Институт физико-технических проблем Севера ЯНЦ СО РАН. Так, лабораторией гидроэнергетики и водного хозяйства Института проводились гидрографические исследования северных рек Якутии, с участием автора выполнялись исследования по оценке водных ресурсов и водного режима рек в различных районах республики, при этом были охвачены разные геокриологические условия: сплошная, прерывистая и островная мерзлота [11, 17]. Помимо научных исследований автор участвовала в полевых экспедиционных работах по изучению водного режима рек и закономерностей перемерзания и промерзания рек зимой. В течение ряда лет автор являлась руководителем и

исполнителем полевых работ по изучению водного режима рек Приморского и Хабаровского краев.

Исследования мерзлотно-гидрогеологических условий формирования стока рек Якутии проводит в Институт мерзлотоведения СО РАН. Вопросы формирования речного и подземного стока, их взаимосвязь в условиях глубокого промерзания водоносных структур отражены в работах В.М. Пигузовой [123, 124]. Вопросами наледного регулирования стока рек и использования наледей как критерия оценки подземного стока, а также вопросами исследования полыней занимались О.Н. Толстихин [155 – 158] и В.В. Шепелев [167].

Региональные гидрологические исследования осуществляет Якутское территориальное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЯУГМС): В.В. Кильмянинов [1988, 1992], К.И. Кусатов [1971, 1984], А.С. Руднев [1971, 1974], А.В. Шестаков [1976], Р.Н. Шпакова [1997] и др.

На территории Сибири в связи с подготовкой второго издания Водного кадастра широкие экспедиционные, методические и теоретические исследования проводились учреждениями системы Гидрометслужбы СССР: Государственным гидрологическим институтом, ГНЦ РФ – ААНИИ, территориальными управлениями гидрометслужбы и региональными научно-исследовательскими гидрометеорологическими институтами (ЗапСибНИГМИ, ДВНИГМИ). Большое значение в изучении водного режима рек территории юга Сибири, где распространены прерывистая и островная мерзлота, имело создание в конце 50-х годов ряда научно-исследовательских институтов естественного профиля: Института географии Сибири и Дальнего Востока СО РАН в г. Иркутске, Сибирского НИИ гидротехники и мелиорации в г. Красноярске, Института естественных наук Бурятского филиала СО РАН в г. Улан-Удэ и др.

В этот период задача гидрологических исследований заключалась в основном в разработке методов определения расчетных характеристик неизученных рек, поскольку развитие наблюдательной сети и продолжительность гидрометрических наблюдений были ниже необходимой. Так, расчетам минимального зимнего стока посвящены работы А.М. Владимирова [1964, 1967], В.М. Евстигнеева [1965], А.М. Догановского [1968], З.И. Петерсен [1968], К.Г. Тихоцкого [1968], И.А. Зильберштейна [1969], В.П. Герасименко [1973] и др.

Из современных работ необходимо отметить работы, проводимые кафедрой гидрологии суши Томского госуниверситета. В частности, под руководством проф. Д.А. Буракова разрабатывались методы расчета минимального зимнего стока рек лесной зоны Западно-Сибирской низменности. В Омском сельскохозяйственном институте под руководством проф. В.С. Мезенцева проводились гидроклиматические исследования по уточнению элементов водного и теплового баланса Западной Сибири.

Детальные исследования особенностей замерзания и вскрытия рек Сибири проводились под руководством В.В. Иванова в ГНЦ РФ – ААНИИ, под руководством Б.М. Гинзбурга в Гидрометцентре РФ, Центральном институте прогнозов и др.

Итогом обширных гидрологических исследований явились публикации в 1967—1974 гг. фундаментального издания второго Водного кадастра, монографий "Водные ресурсы и водный баланс СССР", "Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли" и "Атласа мирового водного баланса." В этот период, как выше было отмечено, появляется ряд региональных работ, в которых авторы обращают внимание на условия формирования минимального и меженного стока в сложных мерзлотно-гидрогеологических условиях Северо-Востока, Западной и Восточной Сибири, Забайкалья и др. Региональные методы расчета низкого стока рек были разработаны также при составлении серии справочных изданий "Ресурсы поверхностных вод СССР".

В 70-е годы особенно важным событием в научных исследованиях явилась публикация монографий А.М. Владимирова [39, 40], которые имеют исключительное значение в развитии исследований низкого стока рек нашей страны. В них обобщено все, что было известно о низком стоке рек к тому времени. Владимиров на основе анализа гидрометрических данных по 3000 пунктам наблюдений разработал методы расчета низкого стока рек для случаев наличия и отсутствия гидрологических данных с учетом влияния хозяйственной деятельности в речных бассейнах. Разработки Владимирова по минимальному стоку вошли в нормативные документы СН 346-66, СН 435-72 и СНиП 2.01.14-83, широко используемые в практике гидрологических расчетов при строительном и водохозяйственном проектировании.

Основные результаты исследований зимнего стока рек криолитозоны, выполненные в 1961—1988 гг., были представлены на трех научных конференциях, посвященных проблемам гидрологии рек региона и организованных ДВНИГМИ.

Можно считать, что в 70-х – 80-х годах были заложены основы теоретических представлений о закономерностях формирования зимнего стока рек в различных природных условиях, разработаны методы его расчета при различном объеме исходной гидрометеорологичекой информации, что нашло отражение в нормативных документах, имеющих общесоюзный законодательный характер. Несмотря на некоторые недостатки, указанные нормативы сыграли исключительно важную роль в области развития инженерно-гидрологических расчетов и ознаменовали собой завершение целой "эпохи" в развитии научного познания о водном режиме рек криолитозоны в маловодный период года.

2.2. Существующие направления в исследованиях зимнего стока

Основные направления исследований низкого стока рек в зимний период как в СССР, так и в других странах наиболее полно изложены в работах [3, 39, 40]. Установлено, что результаты обобщений по низкому стоку послужили основой для составления официальных нормативных документов, в которых приведены основные методы и практические приемы расчета меженного и минимального стока.

Первый нормативный документ по минимальному стоку рек (СН 346-66) был создан в 1966 г. Затем в ГГИ аналогичные нормативы были подготовлены по максимальному стоку, другим гидрологическим характеристикам и в 1972 г. были созданы "Указания по определению расчетных гидрологических характеристик" (СН 435-72). В последующем рост изученности стока рек, а также возрастающие объемы водохозяйственного проектирования и строительства требовали дальнейшего совершенствования методов расчета гидрологических характеристик. Поэтому в течение последующего десятилетия велась работа по совершенствованию расчетных методов, но

уже с привлечением большого дополнительного материала организаций разных министерств и ведомств. Все дополнительные разработки, существенно уточняющие расчеты минимального стока, особенно на перемерзающих и пересыхающих реках, были учтены при составлении нового СНиПа 2.01.14-83.

Обзор результатов анализа по практическому применению рекомендаций, приведенных в СНиПе, показал, что рекомендуемые методы не всегда обеспечивают достаточную точность результатов расчета минимального стока [Амусья, Ратнер, Соколов, 1991; Владимиров, Иманов, Сакович, 1994]. Невысокая точность расчетов обусловлена в основном относительно малым объемом данных гидрометрических наблюдений, использованных при разработке расчетных методов. Поэтому начиная с середины 80-х годов дальнейшие научные исследования были нацелены на повышение точности и надежности гидрологических расчетов при отсутствии данных наблюдений на водных объектах. В настоящее время эти исследования ведутся по следующим основным направлениям.

Первое направление заключается в разработке и совершенствовании методов расчета, основанных на использовании многолетних данных гидрометрических наблюдений за зимними расходами воды (эмпирическое моделирование). Обзор научных исследований в данном направлении показывает, что эмпирическое моделирование в течение вот уже более 80 лет является единственным положительно зарекомендовавшим себя направлением. В.Е. Водогрецкий [1992], подчеркивая это обстоятельство и характеризуя положительные аспекты его использования и дальнейшего развития, отмечает, что методы, разработанные на основе эмпирического моделирования прежде всего весьма просты в практическом применении и хорошо зарекомендовали себя в практике гидрологических расчетов. Так, ошибки при определении гидрологических характеристик по эмпирическим формулам находятся в большинстве случаев в допустимых пределах и незначительно превышают ошибки измерений расходов воды.

Второе направление научных исследований заключается в разработке методов математического моделирования процессов формирования минимального речного стока, в частности в более широком использовании факторно-регрессионных моделей. Факторно-регрессионный анализ использован в исследованиях В.П. Герасименко [54], А.З. Амусья, В.Г. Гутниченко, В.А. Шелутко [2], В.В. Кравченко, А.М. Гизетдинова [93] и др., которых объединяет стремление математизировать процесс формирования речного стока зимой, т. е. составить математические уравнения, описывающие взаимосвязь зимнего стока с определяющими его факторами. Авторы исследований подчеркивают ограниченность традиционных подходов и отмечают, что факторно-регрессионные модели наиболее полно раскрывают механизм формирования зимнего стока и в первую очередь его гидрогеологическую природу.

В настоящее время крупномасштабными разработками в области моделирования процессов речного стока занимаются в Гидрометцентре РФ, Институте водных проблем РАН, Государственном гидрологическом институте, Томском государственном университете, Институте географии СО РАН и др. В Институте водных проблем под руководством Л.С. Кучмента ведется большая работа по созданию системы физико-математических моделей гидрологического цикла, включающих ряд расчетных схем, учитывающих формирование снежного покрова и снеготаяния, процессы тепло- и влагопереноса в почвогрунтах, инфильтрацию талых вод в мерзлую и оттаявшую почву, испарение и транспирацию, склоновое и русловое стекание вод, поверхностный и подземный сток. В ГГИ исследования по математическому моделированию речного стока проводятся под руководством Ю.Б. Виноградова. В настоящее время из серии моделей модифицируется модель формирования стока "Гидрограф".

Анализ существующих работ показывает, что на современном этапе научных исследований, несмотря на достигнутые успехи в области математического моделирования, физико-математическое описание гидрологических процессов еще не доведено до практического применения по ряду причин/

Во-первых, ошибки в расчетах не меньше ошибок при вычислении по эмпирическим формулам.

Во-вторых, отсутствуют экспериментальные исследования по более глубокому изучению закономерностей формирования мини-

мального стока, таких как процессы тепло- и водообмена речных вод и дренируемых водоносных горизонтов, накопления и сработки запасов подземных вод, фазовых переходов сезонного оледенения и т. д. В результате при составлении математических уравнений из литературных источников заимствуется вся недостающая информация: фильтрационные характеристики почв; водно-физические, гидрогеологические и мерзлотные характеристики почвогрунтов бассейна; характеристики рельефа и тектонического строения территории; климатические характеристики для расчета испарения и др. Иными словами, существующая гидрометеорологическая информация обеспечивает расчеты лишь на 50 %.

Тем не менее, как уже упоминалось выше, в практике расчетов все более широко используется метод множественной корреляции, позволяющий учитывать многофакторность процесса формирования зимнего стока. В отличие от однофакторных связей регрессионный анализ позволяет количественно оценить не только влияние всего комплекса факторов, определяющих зимний сток, но и степень их связанности между собой и "вклад" каждого из них. Указанный анализ позволяет отобрать наиболее эффективные факторы и получить уравнение регрессии для определения расчетных характеристик зимнего стока. При применении метода следует иметь в виду, что с увеличением числа факторов, включаемых в анализ, увеличивается погрешность расчетного уравнения. Это обстоятельство вынуждает относиться к многофакторным связям весьма осторожно.

Как отмечают авторы [3], разработка факторно-регрессионных моделей требует решения следующих задач, связанных с методикой их применения:

- 1) выбора оптимальной структуры и вида моделей в разных природных условиях;
- 2) оценки устойчивости параметров моделей и определения их оптимальных значений;
 - 3) оценки качества уравнений регрессии.

Третье направление заключается в разработке методов расчета, основанных на использовании кратковременных или эпизодических гидрометрических наблюдений вплоть до единичного измерения расхода воды. Методология подобных расчетов рассмотрена

Б.Л. Соколовым, Н.С. Ратнер, А.В. Рождественским, В.Н. Колотаевым и др. Сущность метода заключается в следующем.

Теоретически утверждается, что за какой-либо промежуток времени τ практически равен сток (Q) двух рек x и y, сформированный в бассейнах с однородными природными условиями и с примерно одинаковыми гидрографическими характеристиками. Из этого утверждения следует равенство отношений характеристик стока за интервалы времени τ_1 и τ_2 , τ_3 . е.

$$(Q \tau_1/Q \tau_2)x = (Q \tau_1/Q \tau_2)y = K,$$

где $\tau_{1} > \tau_{2}$; K – коэффициент пропорциональности.

Пусть водоток y является рекой-аналогом, в этом случае сток реки x за период τ_1 можно определить по формуле

$$(Q\tau_1)x = K_y(Q\tau_2)x,$$

где K_y – коэффициент пропорциональности, определенный поданным реки-аналога.

Рассмотренный метод В.Н. Колотаевым назван методом многократных соотношений. Определение расчетных характеристик выполняется по следующим трем схемам:

$$Q'_{\scriptscriptstyle A} \stackrel{'}{ o} Q_{\scriptscriptstyle A} \rightarrow Q_{\scriptscriptstyle M},$$
 $Q'_{\scriptscriptstyle A} \rightarrow Q_{\scriptscriptstyle A} \rightarrow Q_{\scriptscriptstyle M},$ $Q_{\scriptscriptstyle T} \rightarrow Q_{\scriptscriptstyle T} \rightarrow Q_{\scriptscriptstyle C},$

где $Q_{_{\rm A}}^{\prime}$ — измеренный расход воды во время гидрометрической съемки на дату Д; $Q_{_{\rm M}}$ — средний суточный расход на дату Д; $Q_{_{\rm M}}$ и ' $Q_{_{\rm M}}$ — средние расходы воды соответственно за меженный период конкретного года и за многолетний период; $Q_{_{\rm T}}$ — средний расход воды на посту за τ суток; $Q_{_{\rm T}}$ и ' $Q_{_{\rm T}}$ — средние расходы воды соответственно за конкретный год и многолетний период.

Результаты исследований [Соколов, 1974, 1978; Ратнер, 1977, 1978, 1991; Рождественский, 1987; Колотаев, 1988, 1991] показали, что

метод многократных соотношений существенно повышает точность расчетов, поскольку учитываются особенности формирования речного стока в створе гидрометрических наблюдений. При этом метод позволяет значительно снизить большие случайные погрешности, имевшие место до его применения.

В настоящее время существуют разные подходы для реализации отмеченных направлений. Например, в работе [3] отмечается сложность разработки расчетных методов минимального стока рек в условиях распространения многолетнемерзлых пород и предлагаются два подхода по учету мерзлотно-гидрогеологических факторов, в частности сезонного оледенения. Первый подход основан на введении поправочных коэффициентов к значениям параметров кривых распределения вероятностей, второй подход - на определении минимального зимнего стока по разности между полным объемом дренируемых реками подземных вод и объемом воды в сезонном оледенении с учетом интенсивности его формирования в зимний период. Наиболее интересны в этом плане исследования, проводимые В.В. Кравченко и А.М. Гизетдиновым, которые впервые построили устойчивую регрессионную модель путем объединения исходных аргументов в комплексы, отражающие все разнообразие мерзлотно-гидрогеологических условий речных бассейнов. Расчеты по уравнению регрессии показали довольно высокие результаты. Для 43 речных бассейнов Ангары, Верхней Лены и оз. Байкал средняя квадратическая ошибка расчета среднего многолетнего зимнего подземного притока в реки составила 18,3 %. В настоящее время в ГГИ ведутся исследования по апробации использованного метода на массовом материале.

Другой путь научных исследований – это использование традиционных гидрологических методов обобщения: карт изолиний и эмпирических формул.

Изложенные направления легли в основу существующих методов расчета зимнего стока рек. Ниже дается в общих чертах их критический анализ.

2.3. Критический анализ методов расчета зимнего стока

В настоящее время в гидрологической практике в зависимости от наличия исходной информации используются следующие методы расчета зимнего стока.

- 1. При наличии гидрометрических наблюдений вероятностностатистические методы. В этом случае расчетные значения зимнего стока определяются по кривой обеспеченности, описываемой тремя параметрами: средним многолетним стоком Q, коэффициентом изменчивости C_v и коэффициентом асимметрии C_s . Для сглаживания и экстраполяции эмпирической кривой обеспеченности применяются трехпараметрическое гамма-распределение, биномиальная кривая распределения, при неоднородности ряда гидрометрических наблюдений используются усеченная и составная кривые распределения ежегодных вероятностей превышения.
- 2. При недостаточности данных наблюдений определение расчетных минимальных расходов воды производится путем приведения параметров кривых распределения к многолетнему периоду, если соблюдаются следующие условия:

$$n^1 > 10; R > 0.7; k/\sigma_{\kappa} > 2;$$

где n^1 – число лет совместных наблюдений; R – коэффициент корреляции между минимальными расходами воды исследуемой реки и реки-аналога; k – коэффициент регрессии; k/σ_{κ} – средняя квадратичная ошибка коэффициента регрессии.

- 3. При отсутствии данных гидрометрических наблюдений расчет обеспеченных значений зимнего стока производится по двум вероятностно-статистическим схемам: по полной схеме (метод параметризации) и методу переходных коэффициентов. Для определения параметров аналитической кривой обеспеченности Q, C_{ν} и C_{S} применяются следующие методы:
- метод географической интерполяции, использующий карты стока, построенные по данным наблюдений на изученных реках;
- метод районных расчетных зависимостей параметров низкого стока от определяющих факторов.

Подробная характеристика этих методов приводится в [41, 110, 134, 166]. В настоящей работе существующие методы расчета анализируются в двух направлениях: в зависимости от эффекта использования того или иного метода в условиях распространения многолетнемерзлых пород и в зависимости от полноты учета в них факторов глубокого промерзания гидрогеологических структур, поскольку именно эти факторы определяют подземный приток в реки.

Конечной целью расчетов зимнего стока является определение зимних расходов воды различной вероятности превышения (обеспеченности), а также расчетных характеристик промерзания рек. При наличии материалов наблюдений решение этой задачи в условиях распространения многолетнемерзлых пород также осуществляется путем вероятностно-статистического анализа имеющегося ряда наблюдений. В случае отсутствия гидрометрической информации степень применимости существующих методов может быть различной.

В исследованиях низкого стока рек, протекающих в районах распространения многолетнемерзлых пород, наиболее широкое применение получил метод географической интерполяции (изолиний), который используется преимущественно на равнинных территориях. Карты позволяют определить с достаточной точностью расчетные характеристики неизученных рек. Обычно они составляются для модуля минимального стока 80%-ной обеспеченности и для определенного диапазона площадей водосборов.

Метод географо-гидрологического обобщения, реализуемый в виде карт основных параметров функции распределения вероятностей, или так называемый метод трех параметров, используется в практике гидрологических расчетов сравнительно редко. Как отмечает А.М. Владимиров, это вызвано тем, что использование данного метода предусматривает наличие трех расчетных способов, позволяющих определить норму стока, коэффициент вариации C_{ν} и коэффициент асимметрии C_{s} . Причем каждый из способов обладает некоторой ошибкой, что в сумме отражается на точности метода трех параметров.

В исследованиях зимнего стока метод параметризации был использован А.М. Комлевым [86]. Расчет зимних расходов воды раз-

личной обеспеченности на большей части территории Западной Сибири он предложил проводить по биномальной кривой обеспеченности при $C_S=2C_\nu$, а в зоне недостаточного увлажнения — по кривой трехпараметрического гамма-распределения при $C_S=1,5\,C_\nu$ с определением нормы стока и коэффициента C_ν по карте. Позднее анологичный прием использовали Э.И. Гаррисон, В.М. Евстигнеев, А.В. Христофоров для территории Забайкалья [48]. По мнению этих авторов, параметры функций распределения вероятностей речного стока имеют отчетливую географическую природу, поэтому принципы географо-гидрологического обобщения на основе параметризации могут быть применены и при построении расчетных схем низкого стока рек зимой.

Способ использования переходных коэффициентов был предложен А.М. Владимировым в 1970 г. и в настоящее время является официально принятым способом, широко используемым в практике расчетов минимального стока. Расчетные значения зимнего стока неизученных рек устанавливаются по переходным коэффициентам от минимального стока 80 %-ной обеспеченности, определяемого по карте. Коэффициенты весьма устойчивы по районам и дают возможность переходить от расхода воды 80 %-ной обеспеченности к расходам воды 75, 85, 95 и 97 %-ной обеспеченности.

Можно высказать следующее соображение в отношении использования рассмотренных методов расчета зимнего стока в районах распространения многолетнемерзлых пород. Повышенная дискретность подземного стока в этих районах, обусловленная глубоким промерзанием гидрогеологических структур, исключает их применение в практических расчетах из-за полного отсутствия стока воды на реках зимой, т. е. картирование зимнего стока в виде изолиний возможно лишь в тех районах, где нет многолетней мерзлоты.

Метод гидрологической аналогии предусматривает определение многолетнего стока и его изменчивости путем сопоставления водности изучаемой реки и рек-аналогов за зимний сезон и многолетний период. Для повышения точности расчетов рекомендуется проводить гидрометрические наблюдения хотя бы в течение 2–3 лет [130]. При наличии более продолжительных рядов наблюдений на изучаемой реке расчеты зимнего стока проводятся графическим сравнением данных или методом парной или множественной кор-

реляции. Объективность и точность определения расчетных характеристик зимнего стока при применении методов аналогии во многом зависит от того, насколько удачно подобрана река-аналог. В условиях слабой взаимосвязи речных и подземных вод, характерной для территорий многолетнемерзлых пород и в особенности для ее горных районов, выбрать надежную реку-аналог сложно, поэтому метод гидрологической аналогии используется в научных исследованиях весьма осторожно. При приведении рядов наблюдений к многолетнему периоду по аналогам методом парной и множественной корреляции рекомендуется контролировать их графически [130].

При обобщении данных по низкому стоку рек зимой широко используется метод районных расчетных зависимостей. Характеристики зимнего стока, связываемые с показателями природных условий, обычно устанавливаются по районам с однородными физико-географическими условиями. Выделение однородных районов производится прежде всего на основе анализа геолого-гидрогеологических условий, которые определяют подземный сток в реки зимой.

В соответствии с классификацией природных факторов [40, 41], определяющих условия формирования зимнего стока, существуют три типа расчетных зависимостей.

Первый тип отражает связь зимнего стока и промерзания рек с условными факторами, к которым относятся гидрографические характеристики (площадь бассейна и длина реки, средняя высота водосбора и его уклон, глубина эрозионного вреза русла, густота речной сети и др.). Для территории мерзлой зоны наиболее часто используются связи зимнего стока с площадью бассейна [40, 41, 70, 86, 133, 138] и средней высотой водосбора [34, 68, 133]. В некоторых исследованиях к ним прибавляются такие факторы, как площадь, занятая моховым покровом [Папернов, 1965], густота речной сети, заболоченность, лесистость, наледность [Догановский, 1968, 1969; Ветошкина, 1973; Герасименко, 1973; Романова, 1983]. В большинстве случаев эти связи не линейны. Принято считать, что размер речного водосбора отражает бассейновую зарегулированность стока, являясь косвенным показателем полноты дренирования водоносных комплексов. Чем значительнее размеры речного бассейна, тем больше подземное питание.

Площадь водосбора не всегда является эффективным показателем условий формирования зимнего стока рек, расположенных в районах распространения многолетнемерзлых пород [39]. Опыт исследований [11, 14, 39, 40, 99] показывает, что в качестве эффективного показателя условий питания рек подземными водами может служить глубина эрозионного вреза русла, однако авторы в своих исследованиях четкого подтверждения этого фактора не нашли.

На наш взгляд, использование площади речного водосбора в качестве основного параметра при расчетах зимнего стока рек зоны многолетней мерзлоты не достаточно корректно, поскольку на территориях, где отмечается развитие многолетнемерзлых пород, создаются специфические условия формирования подземных вод и их дренирования речными долинами. Исследованиями, выполненными в Институте мерзлотоведения СО РАН, установлена чрезвычайная неоднородность промерзания гидрогеологических структур по площади и профилю: распространение подземных вод носит здесь дискретный, локальный характер, а основное питание и разгрузка их происходят в таликовых зонах речных долин. Таким образом, в зоне многолетней мерзлоты формирование зимнего стока происходит не равномерно со всего бассейна, а лишь сосредоточенно за счет таликовых вод речных долин и вод аллювиальных речных отложений. Поэтому при расчетах зимнего стока точнее использовать не площадной, а линейный показатель, отражающий зависимость водности рек зимой от мощности рыхлых отложений и водообильности подрусловых таликов. Исследования И.А. Некрасова [114] и В.Е. Афанасенко [21] подтверждают сказанное, так как показали, что основным фактором, определяющим размеры подрусловых таликов, является мощность (расход) водотока и что между ними существует взаимосвязь: чем больше расход воды, тем больше объем подрусловых таликов, а следовательно, тем меньше река подвержена промерзанию и перемерзанию. Таким образом, для более достоверной оценки зимнего стока малых и средних рек целесообразно использовать связь зимнего стока с длиной реки, а не с площадью водосбора.

Второй тип зависимостей показывает связь параметров зимнего стока и перемерзания рек с различными стоковыми характеристиками: средним многолетним годовым стоком, летне-осенним

минимальным стоком рек и другими. В этих зависимостях стоковые характеристики используются в качестве косвенных показателей общей увлажненности территорий. Примером использования этого методического приема являются исследования [9, 70, 86 и др.], где за показатель летне-осенней увлажненности территории приняты минимальный летне-осенний и средний многолетний модули годового стока. Однако, по мнению А.М. Владимирова, этот способ в расчетах многолетних характеристик зимнего стока неизученных рек применять не целесообразно, поскольку исходные стоковые значения для этих рек приходится определять косвенным путем, что снижает эффективность метода.

В третьем типе зависимостей используются характеристики зимнего стока и климатические факторы: атмосферные осадки, температура воздуха и почвы, глубина промерзания почвогрунтов и др. В практике расчетов использование связей стока с зимними осадками и температурой воздуха встречается, например, в [34, 80, 86]. Однако исследованиями [40, 86] было установлено, что теснота связей зимнего стока с указанными факторами весьма слабая. Это объясняется тем, что выпавшие зимой осадки, а также зимние температуры воздуха практически не участвуют в формировании зимней водности рек. Как правило, заметное влияние этих факторов отмечается или в конце зимы, или в следующие за ней сезоны.

Длительное время в эмпирических зависимостях не учитывались факторы многолетнего промерзания недр, что связано в основном с отсутствием во многих случаях количественных характеристик промороженности гидрогеологических структур. Так, единственным обобщением, учитывающим сезонное промерзание почвогрунтов, является исследование И.М. Папернова [1965], в котором показана связь расходов воды с глубиной промерзания почвогрунтов. Зависимости, полученные Паперновым, отражают закономерное снижение зимних расходов воды по мере увеличения промерзания почвогрунтов и их постепенного смыкания с толщей многолетнемерзлых пород.

Анализ методов расчета зимнего стока рек зоны многолетней мерзлоты позволил установить, что в настоящее время они не позволяют оценить ряд важнейших гидрологических характеристик зимней межени. Так, в существующих методах практически от-

сутствуют рекомендации по расчетам меженного стока, объема и продолжительности истощения зимних расходов воды.

Таким образом, критический анализ существующих методов расчета зимнего стока рек приводит к следующим основным выводам.

- 1. Существующие методы расчета зимнего стока рек разработаны на основе как эмпирического, так и математического моделирования. При отсутствии данных гидрометрических наблюдений ошибки в расчетах по обоим методам отличаются друг от друга незначительно и отвечают требованиям, предъявляемым в практике гидрологических расчетов. Поэтому преимущество того или иного метода определяется главным образом степенью гидрологической изученности исследуемого региона, а также степенью изученности не только самой исследуемой характеристики, но и определяющих ее физико-географических факторов.
- 2. В настоящее время гидрологические исследования ведутся в основном в двух направлениях: обобщение гидрометрических данных выполняется в виде карт изолиний стока, а также путем районирования исследуемых территорий и установления районных параметров эмпирических зависимостей характеристик зимнего стока рек от определяющих их физико-географических факторов.
- 3. Практически отсутствуют работы, связанные с исследованиями зимнего стока с учетом факторов многолетнего и глубокого промерзания гидрогеологических структур. Поэтому в настоящее время отсутствуют различия в методах, применяемых для оценки зимнего стока рек, расположенных как в пределах зоны многолетней мерзлоты, так и вне этой зоны. Большинство расчетных схем не учитывают дискретность подземного стока во времени и по площади речного бассейна, поэтому в них в качестве основного интегрального показателя условий формирования зимнего стока и промерзания рек используется площадь бассейна реки. Отмеченная особенность в распределении подземного стока осложняет использование существующих методов? в частности метода географической интерполяции (изолиний) применительно к расчетам зимнего стока рек исследуемой территории. Недостаток расчетных схем усугубляется также отсутствием четких рекомендаций о критериях деления рек на малые, средние и большие. Отсутствие такого критерия затрудняет разработку практических рекомендаций по расчетам зимнего стока рек в данном регионе.

Приведенный обзор экспедиционных, стационарных, экспериментальных и теоретических исследований в области изучения зимнего стока рек криолитозоны показывает развитие представлений и знаний о водном режиме рек региона и о его неразрывной, тесной связи с климатом и многолетней мерзлотой. Правильное практическое понимание режима рек мерзлой зоны началось в России одновременно с их освоением в XI и XII вв., но первые научные обобщения были выполнены лишь в середине XVIII в. Во второй половине XVIII—первой половине XX вв. продолжается накопление знаний о водном режиме рек мерзлой зоны и к концу 70-х годов XX в. были сформулированы основные теоретические положения о закономерностях формирования низкого стока рек, разработаны методы его расчета при различном объеме исходной гидрометеорологической информации, что нашло отражение в нормативных документах, имеющих обязательный характер.

Современный этап исследований характеризуется более углубленным изучением низкого стока рек зимой. Основные усилия гидрологов направлены на повышение точности измерений зимних расходов воды, более детальное изучение закономерностей изменения зимнего стока во времени и пространстве, усовершенствование методов расчета зимнего стока за счет более полного учета влияния естественных природных факторов и факторов хозяйственной деятельности. Получены конкретные результаты гидрологических исследований, выполненных на территории распространения многолетнемерэлых пород, которые позволили существенно расширить и углубить представления о зимнем стоке рек региона. Так, в Институте мерзлотоведения СО РАН создана мерзлотно-гидрогеологическая карта Восточной Сибири, дающая возможность установить условия формирования и распространения подземных вод при многолетнем промерзании гидрогеологических структур. Кроме того, в последние годы выполнена количественная оценка потерь зимнего стока на образование речного льда и наледей речных вод, которые до недавнего времени совершенно не учитывались. Расчеты объемов воды, содержащихся во льдах различного происхождения, свидетельствуют о существенном их влиянии на зимний сток рек зоны многолетней мерзлоты [91, 147, 162].

Таким образом, в настоящее время возникла реальная возможность в обобщении имеющихся исследований с целью дальнейшего

изучения процессов формирования зимнего стока рек и разработке на этой основе надежных количественных методов его расчета и прогноза. Поэтому актуальность исследований, направленных на совершенствование имеющихся методов расчета зимнего стока рек криолитозоны не вызывает сомнений.

2.4. Краткий анализ статистической структуры рядов зимнего стока

Для изучения условий формирования и закономерностей изменения зимнего стока рек сплошной криолитозоны на основании предварительного качественного анализа из 378 гидрометрических пунктов отобрано 182 пункта, сток которых является естественным и где период наблюдений составляет более 9 лет. Все реки относятся к категории средних, малых и очень малых. Площади водосборов изменяются от 8,2 км² (руч. Кривуля – устье) до 50 100 км² (р. Колыма – г. п. Дусканья).

Для анализа использованы данные по стоку 25 рек с устойчивым зимним стоком и данные 157 гидрологических пунктов, расположенных на ежегодно и периодически перемерзающих реках. При этом по 57 рекам использованы материалы многолетних наблюдений по 1995 г. включительно (реки Якутии), по остальным рекам – по 1988 г. Средняя по всем рекам продолжительность рядов составляет 20–25 лет. На долю рядов продолжительностью 30 лет и более приходится 51 %.

Следует отметить, что в качестве основных характеристик зимнего стока рек в анализ включены не только основные принятые его характеристики (меженные и минимальные расходы воды, продолжительность перемерзания), но и дополнительные, позволяющие значительно расширить объем исходной информации: минимальные средние 10-суточные, декадные и наименьшие суточные значения расхода воды в пределах выбранной декады, а также объем и продолжительность истощения зимнего стока.

Известно, что точность расчета гидрологических характеристик прежде всего определяется качеством исходной информации. В связи с этим с помощью статистических критериев ряды зимнего стока

٠ ١

исследованы на случайность и независимость их формирования, стационарность и внутрирядную связанность.

Проверка гипотезы о случайности и независимости формирования многолетних рядов зимнего стока производилась с помощью критериев общего числа и максимальной длины серий [134, 166]. Указанная проверка основана на нулевой гипотезе об отсутствии внутрирядных связей. Анализ результатов расчета показал, что примерно 10 % рядов зимнего стока не отвечают условию случайности при 5 %-ном уровне значимости.

Анализ статистической однородности и стационарности исходной информации выполнен с помощью критериев Стьюдента и Фишера. В результате проверки гипотезы об однородности данных оказалось, что для всех анализируемых рек только менее $10\,\%$ рядов являются нестационарными как по средним, так и по дисперсиям при $a=5\,\%$.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для большинства рек ряды зимнего стока являются однородными совокупностями, состоящими из случайных и независимых величин. Однако имеется небольшая группа рек, для которых гипотезы об однородности и случайности опровергаются. Эти реки расположены в основном в горных районах Северо-Востока, где наблюдается высокая тектоническая трещиноватость горных пород. Представляется, что основной причиной неслучайности рядов, а также их повышенной внутрирядной связанности является то, что зимний сток этих рек формируется главным образом за счет подмерзлотных вод, характеризующихся значительной инерцией во времени. Одной из вероятных причин неоднородности рядов зимнего стока является хозяйственная деятельность, поскольку отдельные случаи опровержения гипотезы об однородности и стационарности встречаются в тех районах, где ведется интенсивная разработка месторождений полезных ископаемых (р. Норилка и др.).

Для изучения многолетних колебаний зимнего стока рек и выделения маловодных и многоводных групп лет по всем гидрометрическим пунктам построены разностные интегральные кривые. В разных районах исследуемого региона продолжительность группировок маловодных и многоводных лет колеблется от 4 до 15 лет. Наиболее низкая водность рек зимой наблюдалась в 1930 – 1940 годы.

Комплексный анализ статистической структуры рядов зимнего стока и интегральных кривых позволяет более обоснованно выбрать теоретическую функцию при обобщении гидрометрических данных. Для большинства пунктов наблюдений (около 70 %) функция трехпараметрического гамма-распределения более точно описывает эмпирические кривые по сравнению с другими законами распределения. Только для временных характеристик зимнего стока для описания их многолетней изменчивости рекомендуется использовать нормальное распределение [19].

По результатам расчета параметров теоретических кривых обеспеченности определены переходные коэффициенты для определения расчетных характеристик зимнего стока низкой обеспеченности. Осредненные по районам значения переходных коэффициентов могут быть использованы для расчета характеристик зимнего стока неизученных рек районов сплошного распространения многолетнемерзлых пород.

Таким образом, формирование представлений и знаний о водном режиме рек криолитозоны в зимний меженный период года происходило на протяжении многих веков. От простейшего описания рек до количественных гидрометрических измерений и обобщения опыта многолетних наблюдений, а также детального изучения особенностей водного режима рек региона – таков путь научного познания связи климат – реки – многолетняя мерзлота.

Сток рек криолитозоны в зимнюю межень

Зимняя межень наступает на реках криолитозоны в конце летнеосеннего сезона, когда приток поверхностных вод в речную сеть прекращается и реки переходят на подземное питание. Сток малых и средних рек в этот период характеризуется резким его снижением, а затем и полным прекращением. Закономерности развития процесса истощения и прекращения зимнего стока рек определяются прежде всего в зависимости от климатических и мерзлотно-гидрогеологических условий речных бассейнов.

В главе рассматриваются закономерности режима зимнего стока в условиях повсеместного распространения многолетнемерзлых пород. Приступая к анализу процесса истощения и прекращения зимнего стока, сначала необходимо рассмотреть вопросы выделения границ меженного зимнего периода и дать краткую характеристику межени на реках исследуемого региона.

3.1. Зимняя межень на реках криолитозоны

Сроки начала и конца зимней межени, когда реки питаются исключительно подземными водами, весьма тесно связаны с климатическими процессами. Зимняя межень на реках наступает после перехода средних суточных температур воздуха через 0 °С к отрицательным значениям, что ведет к образованию ледовых явлений, промерзанию почвогрунтов, прекращению поверхностного стока на водосборах и переходу рек на подземное питание. Заканчивается зимний период перед началом притока весенних талых вод, который совпадает обычно с датой устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С к положительным значениям. Поэтому в гидрологической практике установление границ зимней межени производится путем анализа гидрографов стока с учетом прежде

всего хода температуры воздуха осенью и весной, а также по отдельным фазам ледового режима реки.

Определение сроков начала и конца зимней межени на реках сплошной криолитозоны выполнено автором путем анализа гидрографов стока, построенных в средние по водности годы по всем гидрометрическим створам. Первоначально, согласно [130], за начало зимней межени была принята дата появления ледяных образований на реках. Оказалось, что эта дата в 75 % случаев наблюдается в период спада летне-осенних паводков, в остальных случаях она совпадает с датой начала зимнего истощения расходов воды на гидрометрическом створе.

Дата перехода рек с поверхностного питания на подземное определена по перелому линии кривой истощения зимнего стока по способу, предложенному Б.Л. Соколовым [145]. Анализ кривых истощения (рис. 3.1) показывает, что в 71 % случаев отмечается совпадение дат перехода рек на подземное питание со сроками появления ледяных образований, а в 29 % случаев происходит более ранний переход рек на подземное питание. Ранний переход может быть обусловлен разными причинами. В основном он связан, видимо, с

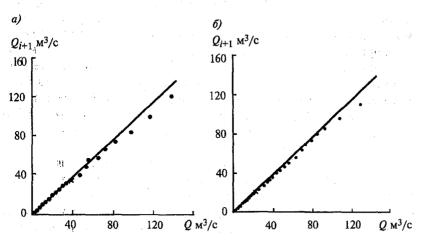


Рис. 3.1. Связь расходов воды за предыдущие (Q_{i} , и последующие (Q_{i+1} сутки в период осенине-зимнего спада расходов воды р. Дэрбэки за 1959 г. (a) и р. Чаркы в 3,5 км от устья за 1977 г. (a). 1– дата появления ледяных образований.

условиями увлажнения предшествующего летне-осеннего сезона. Совпадение времени перехода рек на подземное питание со сроками появления ледовых образований обусловлено природными особенностями зоны сплошной многолетней мерзлоты. С началом осенних заморозков (после перехода средних суточных температур воздуха через 0 °С к отрицательным значениям) поверхность почвы быстро промерзает. Снежный покров, как правило, образуется уже на мерзлой почве. Приток воды в речную зону за счет осадков прекращается, и питание рек начинает осуществляться за счет подземных вод: происходит совпадение дат начала ледообразования и перехода рек на зимний режим. В соответствии с этим на территории сплошного распространения многолетнемерзлых пород за начало зимней межени принята дата появления ледяных образований на реках.

В пределах районов прерывистого и островного распространения многолетнемерзлых пород подземное питание рек имеет весьма сложный характер. Большая часть этой территории расположена в зоне влияния теплых воздушных масс, поступающих с Центральной Азии и Тихого океана. Поэтому здесь из-за более мягкого климата осени, по сравнению с северными районами, формируются высокие летне-осенние паводки, нарушающие генетическую однородность формирования зимнего стока, если за начало зимней межени принимать дату появления ледяных образований. В этой связи в гидрологических исследованиях за начало зимней межени принимается либо дата установления устойчивого ледостава [100], либо дата устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 0 °С [85], либо назначается на основе сопоставления дат перехода температуры воздуха через 0 °С и окончания последнего дождевого паводка [92].

Следует отметить, что генетический подход при выделении меженных периодов имеет исключительно важное значение, поскольку позволяет с единых позиций анализировать закономерности формирования речного стока в этот период. Поэтому если рассматривать зимнюю межень как генетически однородную фазу, то первый подход при установлении границы начала зимнего меженного периода является, безусловно, более обоснованным, поскольку в условиях более мягкого климата и тесной гидравлической связи между по-

верхностными и подземными водами из-за прерывистости многолетней мерзлоты полный переход рек на подземное питание происходит только при установлении на них устойчивого ледостава. В этой связи в пределах прерывистой и островной мерзлоты при выборе границ начала зимней межени целесообразно ориентироваться на дату образования устойчивого ледяного покрова.

Развитие ледовых явлений на реках определяется главным образом особенностями атмосферных циркуляций. На большинстве рек сплошной криолитозоны сроки появления ледяных образований обусловлены формированием и развитием восточносибирского антициклона и вторжением холодных воздушных масс с севера и северо-запада. На реках Северо-Востока на появление ледовых явлений определенное влияние оказывает также формирование зимнего тихоокеанского муссона. Весенние климатические процессы, определяющие окончание зимнего меженного периода и начало весеннего половодья на реках, также обусловлены особенностями атмосферной циркуляции. Установлено, что раннее вскрытие рек отмечается при ослаблении развития Восточносибирского антициклона [55, 64]. При этом происходит вынос теплых воздушных масс с Японского моря и Манчжурии, а также перемещение циклонов из Средней Азии на центральную часть Сибири. В результате окончание зимней межени наблюдается в более ранние сроки. Поздний конец зимней межени и позднее вскрытие рек отмечается в годы с частыми вторжениями холодных арктических воздушных масс, способствующих значительной задержке перехода температуры воздуха через 0 °C в сторону положительных значений.

Анализ данных многолетних наблюдений показал, что из-за суровых природных условий региона зимняя межень наступает почти одновременно на малых, средних и больших реках. В средние по климатическим условиям годы зимняя межень на реках тундровой зоны начинается в последних числах сентября и длится до первой декады июня. На реках остальной части территории криолитозоны зима устанавливается в течение первой половины октября.

Зимний меженный период на реках заканчивается, как выше было отмечено, перед началом весеннего притока талых вод. Конец зимней межени обычно рекомендуется определять по дате резкого увеличения расходов воды на гидрографе [130]. Анализ построенных

гидрографов, а также результаты аналогичных исследований вне зоны сплошной мерзлоты [85, 92, 100] показали хорошее совпадение дат конца зимней межени, установленных по рекомендованному способу, с датами перехода средней суточной температуры воздуха через 0 °С в сторону положительных значений. Разница между этими датами находится в пределах трех суток. Отмеченная особенность объясняется тем, что весной вследствие быстрого роста температуры воздуха происходит интенсивное таяние снега, вызывая начало дружного половодья почти на всех реках региона. Интенсивное развитие весенних климатических процессов обусловливает и сравнительно небольшие различия в сроках конца зимней межени по всему региону. Установлено, что зима на реках заканчивается в течение 1,5 месяцев. Раньше всего зимой заканчивается в южных районах (конец апреля - начало мая), что находится в соответствии с широтной зональностью распределения радиационного тепла. В течение мая конец зимней межени отмечается на большинстве рек региона. Самые поздние сроки наблюдаются в зоне тундры (первая декада июня).

Отличительной чертой водного режима рек криолитозоны является весьма длительная и устойчивая зимняя межень. Продолжительность меженного периода на реках тундры составляет в среднем 220 – 230 дней, затем она постепенно уменьшается с севера на юг от 220 до 160-170 дней. Изменение длительности зимней межени зависит от достаточно устойчивых дат ее наступления и окончания, поэтому она также характеризуется низкими значениями C_{ν} (C_{ν} <0,2–0,3). Слабая изменчивость сроков меженного периода не позволила выявить зависимость их от осадков, а также от площади и средней высоты водосборов.

В практике гидрологических расчетов расчетные характеристики зимней межени определяют для лет различной водности. Однако на территории криолитозоны под влиянием суровых климатических условий ледообразование происходит почти одновременно на большей части рек, поэтому четко выраженной зависимости сроков зимней межени от водности рек не прослеживается. Незначительная изменчивость их во времени как на малых, так и на средних реках (C_V < 0,15) позволяет ограничиться в расчетах одним средним по водности годом (табл. 3.1).

Таблица 3.1 Временные характеристики зимней межени

Характеристика	Номер района по рис. 3.7								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Дата начала зимней межени:									
средняя	05.X	26.IX	24.1X	03.X	02.X	08.X	29.IX	02.X	30.1X
ранняя	29.1X	22.JX	14.IX	28.IX	28.IX	01.X	24.IX	22.1X	19.IX
поздняя	11.X	02.X	05.X	08.X	05.X	14.X	02.X	12.X	07.X
Дата конца зимней межени:									
средняя	27.V	26.V	24 V	07.V	30.IV	29.IV	13.V	12.V	19.V
ранняя	18.V	_18.V_	15.V	30.IV	25.IV	17.IV	03.V	03.V	11.V
поздняя	18.VI	06.VI	05.VI	15.V	07.V	07.V	23.V	18.V	27.V
Продолжитель- ность зимней межени:									·
средняя	235	242	243	217	211	204	228	225	231
наибольшая	260	255	252	230	218	216	237	240	249
наименьшая	223	231	233	206	204	190	223	215	220

Изучению закономерностей ледового режима рек посвящено большое количество работ. Среди них важное значение имеют работы, касающиеся географического обобщения дат ледовых явлений, поскольку в гидрологической практике время наступления отдельных фаз ледового режима рек используется в качестве характеристик для установления границ зимнего меженного периода. Таковыми являются исследования Б.М. Гинзбурга [55, 56], получившие развитие в работах М.И. Сильницкой [140] и И.И. Солдатовой [148]. Результаты исследований Гинзбурга представлены в виде карт средних сроков появления ледяных образований и дат начала ледостава. Им установлено, что на реках Сибири и Дальнего Востока наблюдается почти одновременность появления ледяных образований из-за суровых климатических условий региона. Эта особенность зимнего режима рек подтверждается исследованиями пространственной и временной изменчивости сроков и продолжительности зимней межени, выполненными автором. Как видно из табл. 3.1, различие между сроками начала зимней межени на реках северных и южных районов региона в среднем составляет около одного месяца (конец сентября – конец октября), окончания – около 1,5 месяцев (начало мая - первая декада июня). Кроме того, наблюдается незначительная изменчивость временных характеристик межени, коэффициенты вариации C_{ν} не превышают 0,20 для большинства рек.

Таким образом, наиболее ранние сроки наступления зимней межени (конец сентября) и наибольшая ее продолжительность (250—260 дней) наблюдаются на реках тундровой зоны. На реках остальной части территории сплошной криолитозоны начало зимней межени отмечается в первой половине октября, конец — в первой половине мая. Следует отметить, что реки прерывистой и островной мерзлоты, несмотря на их южное расположение, имеют также весьма длительную и устойчивую межень, по срокам лишь немного отличающуюся от межени на реках сплошной мерзлоты. Здесь зимний меженный период начинается во второй половине октября и заканчивается в конце апреля.

3.2. Промерзание и перемерзание рек

Зимний сток рек криолитозоны формируется в сложных природно-климатических условиях и обладает рядом особенностей, учет которых имеет существенное значение прежде всего при разработке вопросов бесперебойного водоснабжения, поскольку большая часть народнохозяйственных объектов не допускает даже кратковременного перерыва в подаче воды. Одна из этих особенностей заключается в том, что с наступлением зимнего сезона по мере установления низких отрицательных температур воздуха изменяется режим рек – наблюдается резкий спад расходов воды, а затем и полное прекращение речного стока из-за промерзания рек до дна. Промерзание рек до дна на перекатах или на большом их протяжении наблюдается практически во всех холодных регионах Земли, но особенно широкое распространение это явление имеет в пределах криолитозоны. В дальнейшем в монографии для краткости вместо термина "промерзание до дна" будет употребляться термин "промерзание".

Изучение промерзания рек началось еще в начале XVIII в., когда отрывочные сведения о промерзающих до дна реках Сибири поступали от участников академических экспедиций. В это же время в научной литературе на промерзание рек обращает внимание М.В. Ломоносов. В XIX в. появились публикации А.Ф. Миддендорфа и Г.Л. Майделя. Затем в середине XX в. А.М. Норватов ис-

следует явление прекращения речного стока в масштабах всей территории СССР. Дальнейшее развитие эти исследования получили в трудах А.М. Владимирова. Количество научных работ, посвященных изучению промерзания рек, весьма невелико, основная их часть опубликована в 70-е — 80-е годы в связи с интенсивным хозяйственным освоением северных и восточных районов страны.

В настоящее время изучению процессов истощения и прекращения зимнего речного стока, а также разработке методов расчета характеристик промерзания рек не уделяется должного внимания, хотя за последние 10–15 лет значительно расширились и углубились научные представления о взаимодействии поверхностных и подземных вод в условиях сурового климата и многолетней мерзлоты. Недостаточная разработанность вопроса о промерзании рек криолитозоны проявляется прежде всего в неопределенности понятий "промерзание" и "перемерзание". Так, многие авторы не учитывают их смысловое и генетическое различие, поэтому часто употребляют эти термины как синонимы или дают им разное толкование.

Неопределенность основных понятий и путаница в терминах осложняют обобщение материалов наблюдений за явлениями отсутствия речного стока зимой. До недавнего времени отсутствовали разработки по типизации рек, учитывающие такие генетические признаки явлений промерзания и перемерзания, как причины их развития и взаимосвязь между ними, слабо были изучены закономерности истощения и прекращения зимнего стока и их связь с факторами глубокого промерзания гидрогеологических структур. В существующих работах не учитывается дискретность подземного стока во времени и по площади речного бассейна. Например, в серии монографий "Ресурсы поверхностных вод СССР" в пределах криолитозоны выделены области ежегодно промерзающих, эпизодически промерзающих и не промерзающих рек, что до некоторой степени является весьма условным. В нормативных документах отсутствуют рекомендации по определению таких важных для строительного проектирования характеристик промерзания и перемерзания, как их начало и конец.

Учитывая изложенное, автором предпринята попытка обобщить данные гидрометрических наблюдений за явлениями промерзания и перемерзания рек в районах распространения многолетнемерзлых

пород и на этой основе разработать методы расчета характеристик промерзания малых и перемерзания средних рек региона при различном объеме исходной гидрометеорологической информации. В соответствии с поставленной целью задачи исследования состоят в следующем:

- 1) разработать элементы теории промерзания рек, представив ее, как это принято, прежде всего в виде совокупности определенных понятий, принципов типизации и физических моделей;
- 2) изучить условия и факторы, вызывающие отсутствие речного стока в зимнюю межень, и исследовать закономерности процесса его истощения и прекращения;
- 3) установить зависимости характеристик промерзания и перемерзания от определяющих факторов в виде расчетных формул и уравнений.

Разработанные методы могут быть использованы при решении широкого круга научных и практических задач, связанных с оценкой водных ресурсов, разработкой инженерных мероприятий по рациональному их использованию, при создании нормативных документов, а также при разработке различных водохозяйственных проектов.

3.2.1. Понятия и термины

Известно, что научные представления и знания формируются в результате длительных и сложных исследований и зависят прежде всего от содержания основных понятий и терминов, раскрывающих сущность объекта исследований. Обзор научной литературы показывает, что до сих пор отсутствуют достаточно четкие определения терминов "промерзание" и "перемерзание" рек, хотя они широко используются в практике гидрологических исследований.

Термин "промерзание" появился в литературе в XVIII в. Участники академических экспедиций применяют его в своих многочисленных сообщениях и описаниях зимнего и ледового режима рек Сибири, понимая под этим термином прежде всего нарастание ледяного покрова до дна. В это же время он встречается также у М.В. Ломоносова в его Сочинениях (см. гл. 2). В дальнейшем

вплоть до середины XX в. именно в таком понимании используется этот термин в публикациях, посвященных описанию или изучению водного режима рек [Миддендорф, 1860; Майдель, 1894 – 1896; Поляков, 1946 и др.].

В 1950 г. А.М. Норватов впервые связывает промерзание рек с явлением прекращения стока в их руслах и дает следующее определение: "под промерзанием рек понимается явление прерывности руслового стока в течение годового цикла или в многолетнем разрезе, независимо от наличия или отсутствия подруслового скопления и потока вод. ... явление промерзания представляет гидрологический процесс, приводящий к прекращению руслового стока, обусловленному истощением запасов грунтовых вод, способных питать реки." [115, с. 56].

И.А. Зильберштейн, изучая промерзание рек Забайкалья, определения термина не дает, однако раскрывает содержание понятия, отмечая, что в районах распространения многолетнемерзлых пород малые реки промерзают на всем их протяжении, а средние – на перекатах, при этом река сначала промерзает на наиболее мелководных участках, а затем только наблюдается полное промерзание плесовых участков [72].

Г.Н. Петров предлагает такое определение промерзающих рек: "промерзающие реки – в холодное время года не имеют постоянного водотока, который прерывается участками русла, промерзшего до дна, и они обычно сопровождаются образованием наледей, наслуда и т. д.", подчеркивая при этом необходимость уточнения терминологии, поскольку в исследованиях применяются различные выражения: промерзание, перемерзание, перемерзание до дна, частичное перемерзание, перемерзание местами и т. д. [122, с.167].

К.Г. Тихоцкий дает следующее определение: "под перемерзанием подразумевается прекращение руслового стока зимой на некоторый промежуток времени. Перемерзание может быть местным, когда выше и ниже перемерзшего участка сток осуществляется (перемерзание аллювиального переката), и общим, когда сток прекращается по всей реке. Во втором случае река может перемерзнуть до дна на всем ее протяжении или только на мелководных участках, плесы же заполнены водой всю зиму." [152].

К научным терминам и понятиям, как правило, предъявляются определенные требования, основными из которых являются: 1) оп-

ределение должно содержать генетические признаки изучаемого объекта и подчеркивать специфические особенности, отличающие его от других явлений; 2) определение должно исключать возможность произвольных толкований, т. е. должно четко и ясно выражать смысл понятия. В большей степени удовлетворяют этим требованиям определения, предложенные А.И. Чеботаревым в Гидрологическом словаре: "Промерзание рек - промерзание всей толщи воды до дна на большом протяжении реки. На реках наступлению промерзания способствует полное истощение и промерзание подземных вод, доступных для дренирования. Но чаще на реках наблюдается перемерзание, т.е. образование на отдельных участках реки по всему живому сечению ледяных перемычек за счет нарастания ледяного покрова до дна... Иногда понятия промерзание и перемерзание рек применяют как синонимы." [161, с. 211]. Следует заметить, что большинство исследователей придерживаются этих определений.

А.М. Владимиров также дает близкие определения, раскрывая их физическую сущность и различая эти понятия по их генезису. Так, изучая условия и факторы, определяющие развитие явлений перемерзания, он указывает на невозможность при этом полного истощения подземных вод, питающих реку. Однако, как и другие исследователи, он под явлениями промерзания и перемерзания рек понимает прежде всего периоды отсутствия стока в их руслах в зимний сезон.

А.В. Шестаков [1976] придерживается определений, данных А.И. Чеботаревым, но отмечает неправомерность отождествления понятий "промерзание" и "перемерзание" рек.

Как видно из изложенного, о терминах нет четкого и ясного суждения. Так, одна группа исследователей понимает под промерзанием рек явление нарастания ледяного покрова до дна, другие — явление прекращения речного стока зимой. Кроме того, неопределенность и неточность понятий приводит к тому, что в гидрологических исследованиях эти термины часто применяют как синонимы. Поэтому в настоящее время возникла необходимость уточнения терминологии при изучении явлений промерзания и перемерзания рек.

По своему смысловому значению понятие "промерзание рек" обозначает прежде всего нарастание толщины ледяного покрова до

дна. Это связано с тем, что применительно к воде структура и этимология термина "промерзание", в частности его корень мерзлый, предполагает замерзание воды, т. е. превращение воды в лед, а приставка про- предполагает превращение воды в лед полностью. В отличие от него термин "перемерзание" вообще не применим к воде и характеризует обычно состояние реки зимой, поскольку приставка пере- в этом термине в понимании автора обозначает чередование промерзших и не промерзших до дна участков реки. Таким образом, промерзание рек есть процесс нарастания толщины ледяного покрова до дна. Развитие процесса нарастания толщины льда на реках определяется многими факторами и их различным сочетанием. Например, интенсивность роста льда зависит от суровости зимы, интенсивности притока подземных вод в ее русло, скоростей течения, режима замерзания и размеров реки, толщины снега на поверхности ледяного покрова и др. В районах распространения многолетнемерзлых пород при промерзании рек до дна главную роль играют прежде всего сокращение и истощение запасов подземных вод, накопленных в таликовых зонах речных долин, а также климатические условия зимы, от которых зависит рост льда в русле. Нарастание толщины ледяного покрова до дна приводит к прекращению речного стока зимой.

Суровый климат, глубокое промерзание водоносных структур и малое количество зимних осадков способствуют тому, что промерзание рек до дна наблюдается не только на малых и средних, но и на больших реках. Результаты воздействия этих факторов являются настолько существенными, что в пределах сплошной криолитозоны малые реки промерзают, например, на всем своем протяжении, средние реки — на значительном расстоянии. В областях островного и прерывистого распространения мерзлых пород это явление на малых и средних реках встречается редко, чаще наблюдается чередование промерзших и непромерзших участков. Это связано с тем, что здесь условия водообмена между речными и подземными водами благоприятны для формирования постоянного зимнего стока рек. В общем случае в зимнем режиме средней реки промерзание до дна может наблюдаться на разных ее участках по длине:

-- верхней части верховья, в результате полного истощения и промерзания подрусловых таликовых вод;

- в нижней части верховья и среднем течении, в результате сокращения запасов подземных вод в подрусловых и пойменных таликах. В этом случае нарастание льда, заполняющего русло до дна, охватывает и мелководные, и плесовые участки реки;
- преимущественно в среднем течении, в результате тех же причин, что и выше. В этом случае нарастание ледяного покрова до дна наблюдается только на перекатах. В холодные и маловодные зимы промерзание рек на перекатах может наблюдаться в их нижнем течении.

Исходя из изложенного, автор попыталась дать свое представление о содержании ключевых терминов и понятий, используемых при изучении явлений промерзания и перемерзания рек.

Промерзание рек — это явление промерзания всей толщи воды в русле до дна. Промерзание реки может наблюдаться на отдельных ее участках за счет нарастания толщины ледяного покрова до дна. При этом периоды отсутствия речного стока могут быть кратковременными или длительными. Участки промерзания обычно незначительны по длине. Однако в районах сплошного распространения мерзлых пород промерзание всей толщи воды в русле может происходить на значительное расстояние. Например, в результате полного истощения и промерзания подземных вод, участвующих в питании рек, наблюдается их промерзание на некотором протяжении от истока, при этом русловой и подрусловой сток отсутствуют.

Перемерзание рек – это явление чередования промерзиих и непромерзиих их участков. В этом случае сток рек и их подземное питание полностью не прекращаются, поскольку образование ледяных перемычек на отдельных участках реки способствует переходу руслового стока в подрусловой или его выходу на поверхность ледяного покрова и формированию наледи. Зимой на реках криолитозоны чаше наблюдается их перемерзание.

Таким образом, промерзание и перемерзание рек представляют собой гидрологические явления, различные по масштабам и характеру своего развития. Следовательно, эти понятия не могут быть отождествлены друг с другом и применяться как синонимы.

3.2.2. Физическая сущность процесса промерзания и перемерзания рек

Зимний сток малых и средних рек криолитозоны наблюдается лишь в сравнительно короткий период их зимнего спада из-за сокращения и прекращения притока подземных вод в русло. Остальную часть зимы реки находятся в промерзшем и перемерзшем состоянии. Так как явления промерзания и перемерзания тесно связаны с отсутствием стока в руслах рек, в данной работе под физической сущностью этих явлений понимается прежде всего развитие процессов истощения и прекращения зимнего речного стока и их взаимосвязь с подземными водами. Чтобы раскрыть характер развития этих процессов, необходимо иметь представление о влиянии многолетнего промерзания пород на условия формирования подземными водами в условиях глубокой промороженности гидрогеологических структур.

Современные гидрогеологические условия региона сформировались в течение длительного периода времени под влиянием сложного комплекса физико-географических факторов, главными из которых являются факторы криогенеза. Известно, что начало многолетнего промерзания горных пород относится к плиоцену. В это же время началось формирование гидрогеологических структур криолитозоны. Наибольшее влияние факторов криогенеза на общие гидрогеологические условия наблюдалось в четвертичное время, когда под влиянием криогенных процессов произошел переход значительного количества воды из жидкой фазы в твердую, существенно изменились характер водопроницаемости пород, условия питания, стока и разгрузки подземных вод.

Влияние многолетнего глубокого промерзания пород на формирование подземных вод гидрогеологических структур весьма многообразно [79, 106, 114, 136, 156, 168]. Общие, наиболее важные черты такого влияния известны, известны и результаты воздействия на условия питания рек подземными водами. Роль криогенных процессов при формировании подземного питания рек криолитозоны заключается в следующем.

- 1. Промерзание верхних горизонтов литосферы приводит к превращению водопроницаемых водоносных пород в криогенные водоупоры и соответственно к резкому снижению ресурсов подземных вод.
- 2. Развитие криогенных водоупоров расчленяет гидрогеологический разрез на над-, меж- и подмерзлотные воды, что затрудняет участие подземных вод в формировании речного стока. Как правило, реки получают подземное питание в основном из зоны активного водообмена, расположенной выше местного базиса эрозии. В районах сплошного распространения мерзлых пород эта зона охватывает лишь сезоннопромерзающие надмерзлотные воды весьма маломощного деятельного слоя, а подмерзлотные воды залегают под толщей мерзлых пород на 100 – 600 м ниже вреза русел рек, поэтому зимой питание рек осуществляется преимущественно за счет межмерзлотных подземных вод, сосредоточенных в таликовых зонах речных долин. По данным И.А. Некрасова [114], в пределах сплошной криолитозоны распространены в основном гидрогенные (подрусловые и пойменные) талики. В районах прерывистой и островной мерзлоты зона свободного водообмена охватывает водоносные горизонты примерно до тех же глубин, что и в немерзлотных районах. В этих условиях подземные (над-, меж- и подмерзлотные) и речные воды представляют единую гидродинамическую систему, между ними существует тесная взаимосвязь, т. е. наличие мерзлых пород практически не сказывается на схеме циркуляции подземных вод и их режиме. Кроме того, данные геокриологических исследований показывают, что здесь, в отличие от сплошной криолитозоны, встречаются все виды таликов (радиационные, гидрогенные, гилрогеогенные, хемогенные, вулканогенные, гляциогенные, техногенные). В речных бассейнах наблюдается слияние таликовых отложений, занимающих русло и пойму с радиационными таликами террас и склонов долин [136]. Поэтому условия питания рек подземными водами являются здесь более благоприятными. По данным В.Н Колотаева [84], в пределах прерывистой и островной криолитозоны реки с площадью водосбора 1000 - 3000 км² полностью дренируют водоносные комплексы.
- 3. Промерзание верхней части литосферы в сочетании с новейшими геотектоническими процессами приводит к формированию

гидрогеологических структур особого типа, так называемых криогеологических массивов, криогенных бассейнов напорных трещинных вод, криоартезианских и криогеологических бассейнов. Их отличительной чертой является локализация подземных вод в таликовых зонах, в основном в пределах речных русел и пойменных террас. Именно подрусловые и пойменные талики в условиях сплошного распространения многолетнемерзлых пород являются единственными путями питания и разгрузки подземных вод, по ним происходит взаимосвязь поверхностных и подземных вод. Зимой питание рек региона осуществляется исключительно за счет подземных вод, заключенных в таликовых зонах речных долин. Другой характерной чертой гидрогеологических структур является чередование по долине реки таликов различного происхождения (сквозных, несквозных, водовыводящих и водопоглощающих), что создает весьма сложные условия формирования зимнего речного стока. В верховьях рек сплошной криолитозоны обычно таликов не наблюдается [114, 136, 156]. Только на некотором расстоянии от истока реки появляется сезонный подрусловой талик, затем ниже по течению устойчивый подрусловой талик, а еще ниже по течению располагаются пойменные несквозные или сквозные (водовыводящие или водопоглощающие) талики. На горных реках нередко наблюдается чередование сквозных и несквозных таликовых зон. Запасы подземных вод в такого рода таликах определяют режим и зимий сток рек. Так, сезонное промерзание таликовых отложений и развитие наледных процессов зимой приводят к резкому сокращению и истощению подземных вод, и в результате на реках наблюдается спад зимних расходов воды, а затем и полное прекращение речного стока вследствие их промерзания на перекатах. С течением времени реки промерзают до дна на значительном расстоянии.

Таким образом, длительное и глубокое промерзание водоносных горных пород и формирование специфических гидрогеологических структур — одни из главных факторов, определяющими промерзание и перемерзание рек. Однако наличие мерзлых пород и глубоко промороженных водоносных структур не является непосредственной причиной прекращения стока рек, а только способствует развитию таких криогенных явлений и процессов, как наледеобразование, сезонное промерзание таликов, открытых и закрытых

водоносных систем, приводящих к промерзанию рек до дна. Весьма важным фактором промерзания рек является такой климатический фактор, как температура воздуха, поскольку характер развития процесса нарастания толщины льда на реках в значительной степени зависит от метеорологических условий зимы. В холодные зимы весьма низкие отрицательные температуры воздуха вызывают интенсивное охлаждение водных масс и быстрый рост льда, т. е. в такие зимы на реках наблюдается наибольшая интенсивность нарастания толщины ледяного покрова, а соответственно и быстрое промерзание рек до дна. В теплые зимы процесс промерзания всей толщи воды до дна значительно удлиняется. Данные многолетних наблюдений показывают, что климатические и криогенные факторы обычно проявляются в комплексе друг с другом, они тесно взаимосвязаны между собой и в совокупности определяют как интенсивность истощения и прекращения стока рек региона, так и продолжительность периода его отсутствия зимой.

Развитие процесса промерзания рек до дна, обусловливающего прекращение стока воды в их руслах, определяется тремя главнейшими причинами: 1) сокращением и истощением запасов подземных вод в речном бассейне; 2) интенсивностью нарастания толщины ледяного покрова на мелководных участках рек; 3) развитием наледных явлений, аккумулирующих значительную часть зимнего речного стока. Все эти процессы развиваются в основном при сезонном промерзании почвогрунтов и речных аллювиальных отложений.

Известно, что криогенные процессы, происходящие в речных бассейнах, сопровождаются, как правило, резким сокращением и истощением запасов подземных вод. Поскольку сток рек региона формируется зимой исключительно за счет подземных вод, интенсивность их притока в речное русло находится в прямой зависимости от состава, строения и теплофизических свойств пород, тектонической и криогенной их трещиноватости, степени водообильности, рельефа местности, погодных условий зимы и пр. Кроме того, интенсивность притока подземных вод в реки в значительной мере определяется степенью промороженности пород, слагающих речной бассейн.

В областях сплошного распространения многолетнемерзлых пород

развитие процесса промерзания рек до дна происходит следующим образом. С наступлением зимы по мере установления низких отрицательных температур воздуха и по мере интенсивного промерзания почвогрунтов происходит резкое сокращение бассейновых запасов воды. Одновременно происходят потери речного стока на наледеобразование и формирование ледяного покрова. В этот период режим стока рек характеризуется резким спадом расходов воды. После установления ледостава под действием сильных морозов на всех реках наблюдается максимальная интенсивность нарастания толщины льда, которая составляет, по средним многолетним данным, 2,5 – 3,5 см/сут. В этот период живое сечение водных потоков сужается, чему способствует также смерзание шуги и внутриводного льда. Прохождение водной массы под ледяным покровом затрудняется, увеличивается гидравлический напор, и в результате почти по всей длине реки формируются многочисленные наледи, в которых аккумулируется значительная часть зимнего речного стока. В это же время на отдельных участках рек происходит нарастание ледяного покрова до дна, сток рек прекращается. Процесс нарастания льда происходит таким образом, что сначала река промерзает до дна на участках с небольшими глубинами (перекаты, отмели, разветвления русла), а затем только промерзают более глубокие плесовые участки. Промерзание плесовых участков происходит в основном под влиянием криогенных процессов. Так, весьма низкие зимние температуры воздуха вызывают смыкание промерзших почвогрунтов деятельного слоя с толщей мерзлых пород. С течением времени промерзают и таликовые зоны речных долин. Приток подземных вод в русла рек прекращается, и в результате не только малые, но и средние реки промерзают до дна на значительном расстоянии. Обобщение материалов гидрометрических наблюдений показало, что в течение зимы малые реки промерзают ежегодно на всем своем протяжении, средние реки – на большом их протяжении.

В зоне прерывистого и островного распространения многолетнемерзлых пород условия питания рек подземными водами являются более благоприятными и стабильными, поэтому промерзание рек до дна на большом расстоянии встречается редко. Значительно чаще наблюдается образование ледяных перемычек на перекатах рек,

имеющих небольшие по размерам бассейны. Это связано с тем. что явления перемерзания развиваются здесь под влиянием прежде всего низких температур воздуха, определяющих развитие процесса нарастания толшины ледяного покрова. Нарастание толшины льла до дна наиболее интенсивно происходит обычно на малых и некоторых средних реках, отличающихся незначительной водностью и медленным течением. Кроме того, на реках с небольшой плошалью бассейна запасы полземных вол весьма незначительны и полностью истощаются уже в начале зимы. Реки, имеющие значительные размеры бассейна, получают большее подземное питание за счет дренирования более глубоких водоносных горизонтов. Для них характерны повышенная водность и значительные глубины зимой, а также медленное истощение подземных вод с бассейна. Поэтому на таких реках нарастания толщины ледяного покрова до дна не происходит. На основе анализа материалов наблюдений выявлено, что в пределах прерывистой и островной мерзлоты перемерзают ежегодно практически все малые реки и средние реки с площадями водосборов до 5000 км²[133].

Вне зоны многолетней мерзлоты в областях с умеренным и теплым климатом зимой наблюдается кратковременное и неглубокое сезонное промерзание почвогрунтов. В этих условиях реки перемерзают сравнительно редко. Обычно это происходит при изменениях погодных условий зимы, т. е. после резкого понижения температуры воздуха, обусловливающего такое же резкое увеличение толщины ледяного покрова и нарастание его до дна на перекатах.

Таким образом, промерзание рек сплошной криолитозоны происходит под преобладающим влиянием криогенных факторов, вне этой зоны — под преобладающим влиянием климатических факторов.

3.2.3. Типизация рек по характеру промерзания

В гидрологических исследованиях весьма важное значение имеет классификация и систематизация изучаемых явлений и процессов. Между тем в научной литературе, посвященной изучению явлений промерзания и перемерзания рек, практически отсутствуют рабо-

ты, связанные с классификационными построениями. Лишь в работе И.А. Некрасова рассматриваются эти вопросы, но в основном в связи с изучением закономерностей распространения таликов речных долин. В основу его типизации положены два признака: тип и продолжительность существования таликов. Так, в бассейне Анадыря он выделяет: 1) полностью промерзающие реки ($F < 1000 \text{ км}^2$), под руслами которых развиты сезонные талики; 2) частично промерзающие реки ($1000 < F < 6000 \text{ км}^2$), на дне долины которых существуют устойчивые подрусловые талики; 3) не промерзающие реки $(F > 6000 \text{ км}^2)$ с пойменными таликами. Таким образом, типизация, предложенная И.А. Некрасовым, не учитывает прежде всего генетические признаки объекта исследования, т. е. причины и факторы развития явлений промерзания и перемерзания рек. С целью типизировать реки на генетической основе, а также для изучения закономерностей развития процессов, ведущих к прекращению речного стока зимой, рассмотрим общие условия промерзания рек до дна в условиях сплошного распространения многолетнемерзлых пород.

Процесс промерзания рек начинается с образования ледовых явлений. Развитие этого процесса определяется в основном погодными условиями зимы. При ледоставе когда происходят значительные потери речного стока на формирование больших массивов льда: ледяного покрова и наледей. В этот период увеличение толщины льда на реках региона составляет в среднем в октябре 10 - 30 см, в ноябpe-20-60 см, в декабре -20-50 см [64]. Данные многолетних наблюдений показывают, что образование ледяных перемычек на перекатах наблюдается раньше всего на малых реках длиной до 100 км, поскольку в их питании большое значение имеют грунтовые воды деятельного слоя, испытывающего наибольшее воздействие отрицательных температур воздуха. Перемерзание малых водотоков начинается в начале второй декады октября. С наступлением устойчивых холодов перемерзанию подвергаются водотоки все более высоких порядков. Так, перемерзание средних рек начинается в начале ноября. К этому моменту большинство малых рек промерзают до дна на всем их протяжении. В последующие месяцы перемерзают реки, на водосборах которых частично развиты карст (р. Черепаниха) или тектонические разломы (реки Ольчан, Эльги), а также высокоминерализованные подземные воды (реки бассейна Вилюя).

В январе и феврале на большинстве средних рек и даже на некоторых больших реках (Оленек, Яна, Индигирка и др.) наблюдается явление перемерзания.

Анализ частоты промерзания и перемерзания позволил установить, что в равнинных районах перемерзают каждую зиму реки длиной в среднем от 100 до 500 км, в горных областях — от 100 до 700 км (табл. 3.2).

Таблица 3.2 Размеры реки с различной степенью промерзания

Характер промерзания рек	Удаленность створа от истока реки, км	Площадь водосбора, тыс.км ²	
Равнинные	районы		
Ежегодное промерзание	< 100 < 2		
Ежегодное перемерзание и перемерзание	and the second second		
с частотой 70 % = P < 100 %	< 500	< 20	
Перемерзание с частотой $P < 70 \%$,	500-800	20-75	
Горные р	айоны		
Ежегодное промерзание	< 100	< 2	
Ежегодное перемерзание, Р=100 %	< 500	< 20	
Перемерзание с частотой 70 % = P < 100 %	500-700	20-50	
Перемерзание с частотой Р < 70 %	700-800	50-75	

Как видно из таблицы, реки длиной более 500 – 700 км перемерзают эпизодически. Не подвергаются перемерзанию реки длиной более 800 км и площадями водосборов более 75 тыс. км². Данные таблицы показывают, что по сравнению с равнинными районами в горных районах ежегодно перемерзают реки более крупные. Отмеченная особенность, по-видимому, связана с более интенсивным процессом наледеобразования в горах, в результате которого на формирование наледей и ледяного покрова горных рек расходуется значительно большая часть зимнего стока, чем на равнинных.

Таким образом, на реках сплошной криолитозоны по характеру промерзания и режиму стока выделяются участки трех типов: промерзание реки на некотором ее протяжении от истока, чередование промерзших и не промерзших участков и, наконец, ниже по реке осуществляется постоянный сток. Существование участков с различным режимом стока и промерзания по длине реки обусловлено прежде всего различиями в мощности и водообильности таликов,

питающих зимой реки.

Известно, что формирование и существование таликов речных долин связано с отепляющим действием водотоков и инфильтрацией речных вод в аллювиальные отложения, поэтому размеры водоносных таликов в значительной мере зависят от водности рек. Именно по этой причине, а также из-за больших уклонов в долинах малых рек длиной 25 – 30 км талики не образуются [114]. Только в местах пересечения долиной тектонического разлома или в случае ее расположения в закарстованных областях под руслами малых рек наблюдаются устойчивые водоносные талики [21, 79, 136].

При изучении закономерностей распределения наледей Северо-Востока О.Н. Толстихин установил, что не только наледи, но и генетически связанные с ними водоносные талики приурочены к определенным интервалам высот. Согласно его исследованиям, талики под руслами рек появляются на высотах ниже средней линии водораздела на 400-600 м, т. е. в долинах притоков первого и второго порядка. На притоках более высоких порядков происходит расширение речных долин, увеличение толщи аллювиальных отложений, интенсивнее происходят процессы инфильтрации речных вод в аллювий, соответственно вниз по долине реки постепенно увеличиваются мощность и водообильность таликов. В результате на реках по мере удаления от истока появляются сперва несквозные подрусловые, затем несквозные и сквозные пойменные талики.

А.И. Калабин и И.А. Некрасов отмечают, что емкостные характеристики подрусловых таликов зависят от размеров и режима реки, от состава, строения и мощности аллювиальных отложений. Так, отсутствие таликов в верховьях рек они объясняют прежде всего их малой водностью, а также большими уклонами, способствующими быстрому стеканию речных вод и не успевающими отдать свое тепло. При увеличении длины реки и уменьшении ее уклона возрастает водность водотока, повышается его отепляющее воздействие, поэтому размеры таликов соответственно увеличиваются. Кроме того, Н.Н. Романовский [136] выявил следующую закономерность. Чем больше мощность аллювиальных отложений, меньше их дисперсность и выше водно-фильтрационные свойства, тем больше емкостные характеристики таликов. По его данным, в речных долинах Селенняхского хребта подрусловые несквозные талики наблюдаются

на участках увеличения мощности гравийно-галечного аллювия до 5-10 м и отсутствуют там, где их мощность сокращается до 1-2 м. В пределах исследуемого региона мощность водоносных таликов под руслами малых рек составляет обычно 1,5-2 м [79], средних рек – первые десятки метров [136]. О степени их водообильности свидетельствуют данные таблицы 3.3, составленной $B.\Phi$. Шишкиной и заимствованной из работы O.H. Толстихина [156].

Данные геокриологических исследований показывают, что в vcловиях сплошного распространения многолетнемерзлых пород таликовые отложения являются преимущественно водопоглошаюними [21, 136]. Поглошение речных вод таликами происходит, как правило, летом. В холодный период года подземные воды разгружаются через талики в реки. В пределах прерывистой и островной мерзлоты практически на всех реках наблюдается чередование водопоглощающих и водовыводящих таликов. Так, по данным В.Н. Колотаева [83.84] летом на 55 % суммарной длины обследованных рек происхолит приток подземных вод, на 43 % — отток речных вод в подрусловые талики, на 25% — водообмен отсутствует. Согласно его исследованиям, характер водообмена зависит от площади водосбора реки. На реках с площадью водосбора меньше 3 км² наблюдается только приток подземных вод, до 100 км² – приток отмечается на 60 % длины реки, до 10 000 км2 - всего на 40 %. Зимой приток подземных вод наблюдался только на участках с водовыводящими таликами.

Зимой в условиях сурового климата подрусловые отложения речных долин разобщаются на систему изолированных таликовых "ванн". Дальнейшее их промерзание приводит к тому, что снижение уровня подземных вод в таликах достигает 10—20 м, а в таликах, развитых в местах сильнотрещиноватых разрывных зон или закарстованных карбонатных пород, — нескольких сотен метров [136]. В этот период сток рек региона полностью определяется запасами подземных вод в этих замкнутых бассейнах и интенсивностью их сработки.

Запасы вод подрусловых таликов в конце зимнего сезона в бассейне р. Индигирки

Река	Длина реки, км	Суммарная длина таликов, км	Суммарные статические запасы воды, тыс. км ³
Тихон-Юрях	105	45	14 770
Учча	50	7,65	473
Еченка	47	40	40 130
Хатыннах	20	20	4 500
Малый Куобах-Бага	24	7.	3 080
Большой Куобах-Бага	55	47	8330

Таким образом, реки сплошной криолитозоны по характеру промерзания до дна в зависимости от причин, определяющих формирование и режим зимнего стока, подразделяются на три типа:

- 1) промерзающие, к которым относятся малые реки длиной до 100 км и площадями водосборов до 2000 км²;
- 2) перемерзающие, к которым относятся реки длиной от 101 до 800 км и площадями водосборов от $2001 \text{ до } 50\ 000 75\ 000\ \text{км}^2$;
- 3) с устойчивым зимним стоком или не перемерзающие реки, к которым относятся реки длиной более 800 км и площадями водосборов более 50 000–75 000 км².

Следует особо отметить, что в пределах этой зоны малые и средние реки с устойчивым зимним стоком встречаются редко. Эти реки расположены в основном в горных районах Северо-Востока, где наблюдается высокая тектоническая и криогенная трещиноватость горных пород. Их зимний сток формируется главным образом за счет глубинных подмерзлотных вод, питающих реки по тектоническим разломам и трещиноватым породам. Устойчивый зимний сток наблюдается также на реках, протекающих в зоне влияния теплых воздушных масс, формирующихся над Атлантическим океаном (европейская часть исследуемого региона, низовья Оби и Енисея), и на реках, бассейны которых расположены в зоне распространения закарстованных карбонатных пород, обладающих высокой инфильтрационной способностью (Средняя Лена).

При анализе условий формирования и развития явлений промерзания и перемерзания было отмечено, что в областях прерывистого и островного распространения многолетнемерзлых пород условия питания рек подземными водами являются более благоприятными и стабильными, поэтому здесь наиболее распространены перемерзающие реки. Данные гидрометрических наблюдений показывают, что размеры рек с явлениями перемерзания варьируют в значительных пределах: от 1000 до 5000 км² (табл. 3.4).

Из таблицы следует, что наименьшие размеры рек наблюдаются в районах, где зимой ощущается влияние Атлантического океана, а наибольшие — в горных районах Байкальской складчатой области, где мерзлотно-гидрогеологические условия формирования зимнего стока являются наиболее сложными и суровыми.

Размеры рек с явлениями ежегодного перемерзания в пределах прерывистой и островной мерзлоты

Таблица 3.4

Район	Площадь водосбора, км ²	Источник сведений
Северный край	< 1000	Ресурсы, т. 3
Бассейн р. Енисея	< 2000	Ресурсы, т. 16, вып. 1,2
Бассейн оз. Байкал	< 5000	Ресурсы, т. 16, вып. 3
Верхний и Средний Амур	< 5000	Ресурсы, т. 18, вып. 1
Нижний Амур	< 2000	Ресурсы, т. 18, вып. 2

Таким образом, в пределах прерывистой и островной криолитозоны реки подразделяются на два типа:

- 1) перемерзающие, к которым относятся реки длиной до 200 км и площадями водосборов до 5000 км²;
- 2) с устойчивым зимним стоком, к которым относятся реки длиной более 200 км и площадями водосборов более 5000 км².

3.2.4. Физическая модель процесса истощения стока промерзающих и перемерзающих рек

Решение задачи моделирования процесса истощения и прекращения зимнего стока рек предусматривает изучение закономерностей спада зимних расходов воды и выбор адекватных моделей для их описания. Ниже приведены результаты решения этой задачи в условиях распространения многолетнемерзлых пород.

Анализ гидрографов промерзающих и перемерзающих рек региона позволяет выяснить общую физическую закономерность развития процесса истощения и прекращения их зимнего стока. Данные гидрометрических наблюдений показывают, что гидрограф зимнего речного стока имеет максимум в начале зимы и характеризуется постоянным спадом расходов воды по мере истощения бассейновых запасов подземных вод, причем общая тенденция спада сохраняется в течение всего холодного периода.

Интенсивность и продолжительность спада зимних расходов воды находится в прямой зависимости прежде всего от температуры воздуха и развития процессов ледообразования, аккумулирующих значительную часть зимнего речного стока. В предыдущих разделах показано влияние температуры воздуха на развитие процесса промерзания рек до дна, обусловливающего прекращение стока в их руслах. Как было показано, погодные условия зимы являются одним из основных факторов, влияющих на интенсивность нарастания толщины речного льда.

Важным фактором, определяющим весьма низкую водность рек, является наледеобразование. Представления об участии наледей в формировании зимнего стока рек криолитозоны наиболее полно сформулированы в работах Б.Л. Соколова и В.В. Кравченко, частично — в работах О.Н. Толстихина и В.Р. Алексеева. Согласно этим представлениям, влияние наледей на режим стока рек зимой заключается в следующем.

Водный режим рек, на которых имеются наледи, существенно отличается от режима рек без наледей. В значительной мере это зависит от того, пересекает наледь гидрометрический створ или нет [146]. В случае, когда наледи расположены в некотором удалении выше гидроствора, они перераспределяют в течение года речной

сток, уменьшая его зимой и увеличивая летом. Во-втором случае искажающее водный режим воздействие наледи, пересекающей гидроствор, проявляется по-разному.

1. На реках с устойчивым зимним стоком, где развиты речные наледи, колебания уровня воды в реке в течение зимы иногда не соответствуют закономерному процессу истощения стока, а связаны с изменением гидродинамического напора подо льдом из-за ледообразования, его возрастанием и снижением в результате прорывов воды на поверхность льда.

Исследования О.Н. Толстихина показали, что на промерзающих и перемерзающих реках наледеобразование является основным показателем степени обводненности талых подрусловых отложений. Наблюдения за наледями показывают, что в первое время после перемерзания рек подрусловой талик в плане представляет собой непрерывную полосу различной ширины, а затем по мере снижения температур воздуха разобщается промерзшими перегородками на цепь замкнутых изолированных участков [21, 114]. По данным О.Н. Толстихина и Б.Л. Соколова, размеры и продолжительность формирования наледей зависят от запасов подземных вод в каждом из этих таликов, их взаимосвязи с водами глубоких водоносных горизонтов, а также от скорости промерзания путей движения подземных вод. Так, при малых запасах формируется наледь, размеры которой определяются дебитом подземных источников.

2. При развитии наледей подземных вод изменения зимнего режима происходят аналогично режиму рек с наледями речных вод. Различия обусловлены в основном типом наледного питания и отличаются более крупными размерами и большей шириной наледных полян, а также прерывистостью процессов формирования наледей этого типа. Наблюдения за наледями показали, что после замерзания воды, излившейся на поверхность льда, наступает период временного затишья, в течение которого внутренние полости заполняются водой, гидродинамический напор увеличивается и прорывает ледяной покров в его наиболее слабом месте. Наледи этого типа формируются в течение всей зимы, достигая максимальных размеров в конце марта, апреля.

Необходимо отметить, что до недавнего времени считалось, что при образовании наледей происходят потери речных вод в объеме,

равном суммарному объему наледей в бассейне. Исследования Б.Л. Соколова показали, что при оценке влияния наледей на зимний сток наибольший интерес представляют лишь потери на образование речного льда и наледей речных вод, поскольку формирование наледей подземных вод не оказывает существенного влияния на речной сток зимой. Объемы воды, аккумулируемые в речном льду и наледях речных вод, и динамику потерь зимнего стока в течение зимы можно определить по методу, разработанному Б.Л. Соколовым [147] на примере рек Северо-Востока в условиях сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Аналогичные исследования были выполнены в пределах прерывистой и островной мерзлоты В.В. Кравченко и Г.А. Любимовым. Результаты их исследований показали, что потери воды на ледообразование достигают десятков и сотен процентов объема зимнего стока. Например, в бассейнах рек Яны, Индигирки и Амгуэмы на образование речного льда и наледей речных вод расходуются объемы воды, превышающие объемы зимнего стока в устьевых створах соответственно в 10,4; 2,5 и 1.8 раза. По данным В.В. Кравченко, увеличение потерь воды на ледообразование вызывает резкое снижение водности рек зимой. Им также установлено, что наибольших значений потери зимнего стока достигают в январе и феврале, когда на ледообразование затрачивается около 80 % суммарного подземного питания.

Таким образом, наледные процессы играют существенную роль в формировании зимнего стока рек исследуемого региона. При наличии на водосборе рек значительного количества наледей последние, аккумулируя речные воды, снижают зимний сток рек, вплоть до его полного прекращения.

Кроме воздействия отрицательных температур воздуха и потерь стока на ледообразование большое влияние на спад расходов воды оказывает сезонное промерзание почвогрунтов, в частности его глубина, которая является косвенной характеристикой подземного притока в реки. На рис. 3.2 показано изменение зимних расходов воды на реках в соответствии с постепенным промерзанием почвогрунтов деятельного слоя. Для наглядности представлены часть гидрографа за сентябрь, октябрь, ноябрь и ход осадков за эти месяцы. Глубина промерзания почвогрунтов дается по данным метеостанции Якутск. Как видно из рисунка, кривые истощения зимнего

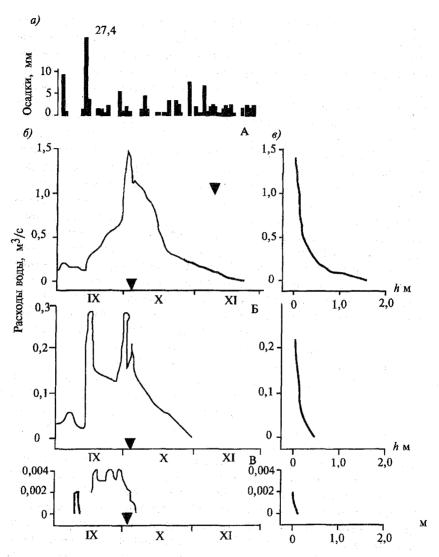


Рис. 3.2. Комплексный график осадков (a), ежедневных расходов воды (б) и их истощения в зависимости от глубины промерзания деятельного слоя (в) за 1978 г. А – р. Тамма – местн. Ыатыраха, F = 4250 км²; Б – р. Шестаковка - местн. Камырдагыстах, F = 170 км²; В – р. Мархинка - с. Большая Марха, F = 408 км²; \blacksquare - дата начала зимней межени.

стока имеют крутую форму из-за быстрой сработки русловых запасов и наиболее динамичных грунтовых вод деятельного слоя. Отмечено, что в годы с малыми запасами воды в момент начала промерзания почвогрунтов продолжительность истощения не длительная, и только в годы, отличающиеся значительными запасами грунтовых вод, истощение растягивается и наблюдается при большей глубине промерзания. Необходимо иметь в виду, что полученные связи являются предварительными, проработки в этом направлении требуют длительных наблюдений за температурой почвы на разных глубинах.

Суровые климатические условия и широкое распространение многолетнемерзлых пород определяют сложный характер взаимодействия речных и подземных вод, что находит свое отражение в колебаниях водности рек зимой. Так, данные гидрометрических наблюдений показывают, что в отдельные годы на фоне общего постоянного спада зимних расходов воды наблюдаются его кратковременные подъемы, связанные с формированием зажоров и криогенных "паводков" (рис. 3.3). Водность рек в этот период возрастает. Однако эти повышения водности непродолжительны, так как по мере еще большего истощения запасов подземных вод и по-

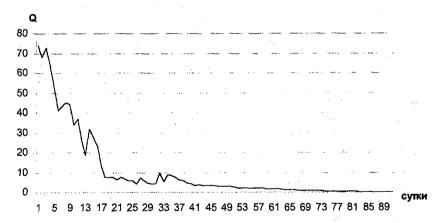


Рис.3.3.Гидрограф зимнего стока р.Бытантай у с.Асар за 1987год, L=566 км.

нижения температуры воздуха происходит дальнейшее снижение речного стока. Затем наступает момент, когда или сток реки вовсе прекращается, или река переходит на устойчивый зимний режим.

Давно замечено, что формирование зажоров, полыней и криогенных "паводков" почти всегда сопровождается развитием наледных процессов [1, 18, 73, 156, 167]. Приуроченность наледей к полыньям, зажорам и криогенным "паводкам" является характерной чертой зимнего режима большинства рек криолитозоны. В Восточной Сибири, например, длина наледи, сформировавшейся в 1964 г. на р. Тимптоне ниже полыньи, составила около 8 км при ширине 150–200 м [1]. Аналогичные явления отмечены многими исследователями [79, 90, 97, 102, 111, 142 и др.]. В Якутии на отдельных участках р. Лены формирование криогенных "паводков" сопровождается выходом речных и подземных вод на поверхность у кромки ледяного покрова. Особенно сложные ледовые условия наблюдаются у г. Якутска, что значительно осложняет ледовую переправу через реку.

Выше было отмечено, что наледеобразование является показателем сложной взаимосвязи поверхностных и подземных вод в районах распространения многолетнемерзлых пород и свидетельствует о чрезвычайно активных процессах, происходящих при промерзании водоносных структур. В последние годы эти процессы стали предметом многочисленных исследований, среди которых выделяются работы О.Н. Толстихина, В.Р. Алексеева, Б.Л. Соколова, В.В. Кравченко. Механизм развития наледных явлений при формировании полыней и зажоров происходит следующим образом.

С наступлением холодов начинается процесс замерзания воды в реках. В зависимости от условий перемешивания водных масс кристаллизация воды происходит либо в поверхностном слое, либо по всей глубине и на дне водного потока. В результате замерзание рек сопровождается интенсивным шугообразованием. С течением времени скопления поверхностного льда и шуги, внутриводного и донного льда, смерзаясь, резко стесняют прохождение водной массы под ледяным покровом. При этом возможны два случая формирования наледных явлений. В первом случае на участках с небольшими уклонами в результате остановки и смерзания скоплений шуги ледяной покров формируется быстрее и образуются ледяные перемычки. С увеличением уклонов наблюдается закономерное повы-

шение скоростей течения, что способствует появлению открытых участков русла реки. Интенсивное охлаждение воды в полыньях вызывает увеличение количества шуги, которая скапливаясь в нижних частях полыней стесняет живое сечение водного потока и вызывает подъем уровня воды. При этом формирование наледи происходит путем постепенного наползания шуги на речной лед и его последующего намораживания на поверхности ледяного покрова. Во-втором случае наледь образуется в результате прорыва ледяной перемычки, возникающей при зажорах. Приуроченность наледей к полыньям и зажорам показывает рис. 3.4, составленный В.В. Кравченко и заимствованный из работы В.Р. Алексеева [1].

Наледеобразование при формировании криогенного "паводка" зависит от высоты зимнего подъема уровня воды и механических свойств ледяного покрова. Обычно криогенное увеличение водности рек приводит к деформации ледяного покрова. В результате по трещинам, через полыньи и проруби происходит выход речных вод на поверхность и образуется наледь.

Таким образом, процессы формирования и развития зажоров и криогенных "паводков" завершаются наледеобразованием. Формирование большинства наледей на реках начинается, как правило, в октябре — ноябре и в течение зимы они достигают своих максимальных размеров. При этом процесс их формирования может быть прерывистым или непрерывным. Отмечено, что на большинстве рек в начале зимы наблюдается развитие наледей речных вод, затем в декабре — январе вследствие перемерзания рек рост наледей прекращается на короткий период. С течением времени по мере нарастания толщины ледяного покрова и создания гидродинамических условий процесс наледеобразования возобновляется и не прекращается уже до конца зимней межени. Этот процесс наблюдается в начале марта и дальнейшее развитие наледи происходит за счет крупнодебитных источников подземных вод, приуроченных, как правило, к зонам повышенной трещиноватости горных пород.

Как видим, условия и факторы формирования зимнего стока в условиях многолетнего и глубокого промерзания гидрогеологических структур сложны и многообразны. Их совокупное воздействие создает в отдельные годы сложный характер спада зимних расходов воды. Колебания водности рек в период зимней межени обус-

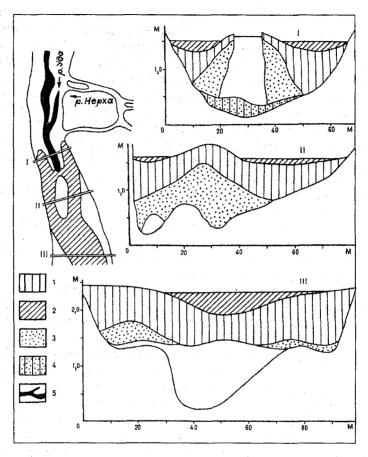


Рис. 3.4. Схема образования наледи при формировании полыней и зажоров. (По [1]).

1 – речной лед; 2 – наледь; 3 – шуга; 4 – донный лед; 5 – полынья.

ловлены прежде всего чрезвычайно сложным взаимодействием поверхностных и подземных вод, которое проявляется через формирование осенних зажоров, наледей, криогенных "паводков". Перечисленные гидрологические явления воздействуют на формирование зимнего стока не обособленно, а в комплексе, отражаясь только на интенсивности и длительности спада зимних расходов. Основной

причиной спада, как уже отмечалось выше, является сокращение запасов подземных вод и наледеобразование. Поэтому можно сделать вывод о том, что влияние зажоров и криогенных "паводков" затушевывается более мощными факторами, определяющими истощение и прекращение зимнего стока, а именно сокращением запасов подземных вод и наледными процессами. Только на отдельных больших реках высокие и длительные подъемы уровней, возникающие при формировании зажоров и криогенных "паводков", отражаются на характере спада зимних расходов воды.

Указанные выводы нашли подтверждение в исследованиях автора, выполненных на территории Якутии, занимающей почти половину (41,5%) общей площади сплошной криолитозоны. Для исследования закономерностей спада зимних расходов воды были проанализированы гидрографы рек по 138 гидрометрическим пунктам и выделены типовые кривые спада для каждого конкретного створа. За типовую кривую спада принималась средняя линия, характеризующая общие черты спада зимних расходов воды за многолетний период.

Изучение закономерностей спада зимних расходов воды показало, что линии спада расходов воды рек различных градаций длин несколько отличаются друг от друга (рис. 3.5). На малых реках, дренирующих сезонные грунтовые воды весьма маломощного деятельного слоя, сокращение бассейновых запасов воды происходит наиболее интенсивно, спад расходов воды резкий и непродолжительный и представляет в большинстве случаев прямую линию. На средних реках на гидрографе выделяются две ветви спада, различающиеся по своей интенсивности. Как правило, средние реки характеризуются большими глубинами эрозионного вреза русла, и большими запасами подземных вод, чем у малых рек, что и определяет различия в характере их истощения. На средних реках рассматриваемой территории сразу же после наступления зимы так же, как и на малых реках, происходит резкое сокращение запасов воды в бассейне, обусловленное установлением низких отрицательных температур воздуха и интенсивным промерзанием почвогрунтов. Одновременно происходят потери речного стока на ледообразование. Эти причины приводят к тому, что спад расходов воды в этот период происходит весьма быстро и по прямой линии. Как видно из рис. 3.5.

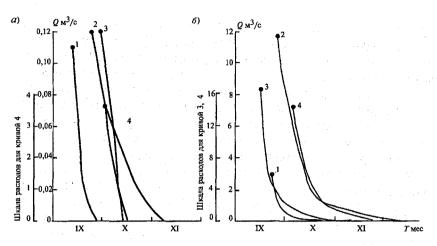


Рис. 3.5. Спад зимних расходов воды малых и средних рек. а) — малые реки: 1 – р. Еремейка у г.п. Еремейка, 1981 г.; 2 – р.Юнкюр у с. Юнкюр 2, 1969 г.; 3 – р. Ала-Чубука в 1,5 км от устья, 1961 г.; 4 – р.Улу, у с. Улу, 1981 г.; б) - средние реки: 1 – Ючюгей-Юрях у гм.ст. Агаякан, 1959 г.; 2 – р. Чилии у г.п. Чилии, 1977 г.; 3 – р. Иргичээн у р.п. Депутатский, 1954 г.; 4–р. Нотора у г.п. Хас-Тохтур, 1971 г.

характер истощения стока в следующий период спада несколько иной. К этому времени обычно заканчивается рост ледяного покрова, а сток поддерживается исключительно за счет подземных вод, накопленных летом в таликовых зонах речных долин, поэтому интенсивность его истощения ослабевает, что изменяет закономерность спада в этот период. Полученные формы типовых кривых истощения подтверждают выводы автора о том, что формирование зажоров и криогенных "паводков" не отражается на характере спада зимних расходов воды. Таким образом, процесс истощения зимнего стока малых рек региона происходит в большинстве случаев по прямой линии, средних рек – по нелинейному закону.

Кривые спада зимних расходов воды отражают интенсивность сокращения запасов подземных вод в речном бассейне. Поэтому для аналитического описания нелинейных кривых истощения используются различные модификации дифференциального уравнения Буссинеска для неустановившегося движения подземных вод. Наиболее часто в гидрологических исследованиях применяется гиперболическое уравнение Буссинеска — Майэ

$$Q_{t} = Q_{\alpha} / (1 + \alpha t)^{2}$$
 (3.1)

где Q_t — расход воды в момент времени t от начала зимней межени; Q_0 — расход воды в начале зимней межени (t=0); α — коэффициент истощения, характеризующий скорость убывания начального расхода; t — продолжительность расчетного интервала времени.

Это уравнение применяется в тех случаях, когда спад расходов воды в реке связан в основном с истощением подземных вод, разгружающихся из сравнительно небольшого по мощности водоносного комплекса.

В.К. Ситников [1965] и А.М. Догановский [61] показали, что кривые истощения зимнего стока рек криолитозоны можно описывать уравнением, являющимся частным решением уравнения Буссинеска и учитывающим интенсивность разгрузки подземных вод из различных водоносных комплексов:

$$Q_{i} = Q_{i} e^{-\alpha i} + Q_{m}(\alpha/\alpha - \beta)e^{-\beta i} + Q_{n}, \qquad (3.2)$$

где $Q_{\rm m}$ — расход подземного стока в реку из слоя аллювиальных отложений; $Q_{\rm n}$ — постоянный приток подземных вод из самых глубоких водоносных горизонтов; α и β — коэффициенты истощения, характеризующие соответственно скорости убывания расходов $Q_{\rm m}$ и $Q_{\rm n}$.

Представляется, что в условиях отсутствия конкретных данных о режиме подземных вод зоны дренирования уравнение (3.1) в большей степени подходит для описания кривых истощения зимнего стока по сравнению с уравнением (3.2). Исследования, выполненные автором и В.П. Пономаревым [127], подтверждают этот вывод. Так, в результате анализа типовых кривых спада рек Якутии и горных рек юга Дальнего Востока установлено, что процесс истощения зимнего стока рек криолитозоны эффективно описывается уравнением Буссинеска — Майэ. Опыт их использования в различных геокриологических условиях показал, что погрешности расчета ежедневных расходов воды по формуле (3.1) в среднем в 1,2 – 1,5 раза ниже, чем по существующим в настоящее время методам учета стока в зимний период [13, 108, 127].

При практическом применении уравнения (3.1) основная задача

заключается в определении трех параметров для каждого водотока в речном бассейне: расхода воды Q_0 , при котором река переходит на подземное питание с наступлением зимней межени, коэффициента истощения и продолжительности истощения зимнего стока $T_{\rm ист}$. В научных исследованиях используются различные методы их определения. Недостатком является то, что все они разработаны для рек с устойчивым зимним стоком. В связи с этим определенный интерес представляют методы, позволяющие определить параметры уравнения Буссинеска — Майэ применительно к перемерзающим рекам.

В основе предлагаемых автором методов лежит представление о том, что зимой сток рек формируется исключительно за счет имеющихся запасов воды в речном бассейне. Запасы воды в бассейне включают себя различные категории влаги: воду в почве, в руслах. озерах, подземные воды и т. д. В настоящее время значения этих запасов могут быть определены лишь приблизительно. В зоне многолетней мерзлоты наиболее сложным является определение запасов воды в водоносных горизонтах, поскольку закономерности формирования подземных вод в этой зоне и их взаимосвязь с речными водами изучены еще не достаточно полно вследствие малой освещенности режима подземных вод данными натурных наблюдений. Поэтому в расчетах стока часто используются косвенные характеристики общих запасов воды в русле и бассейне. В уравнении (3.1) таким показателем общих запасов воды в речном бассейне перед началом зимнего сезона выступает параметр Q_0 , представляющий расход воды, при котором река переходит на подземное питание. Выше было показано, что на территории сплошной мерзлоты дата перехода рек на подземное питание совпадает с датой появления ледяных образований. Поэтому определение расхода, отвечающего условиям перехода на подземное питание, при наличии материалов наблюдений не представляет трудной задачи: в качестве Q_0 принимается расход воды, измеренный или вычисленный в день, предшествующий наступлению ледовых явлений. При отсутствии данных Q_0 определяется по графикам зависимости их от площади водосбора F. На рис. 3.6 показаны связи такого вида, полученные автором для горной и равнинной территорий. Расход Q_0 , являясь косвенным показателем общих запасов воды в речном бассейне, увеличивается с увеличением размеров бассейна. Здесь площадь водосбора выступает в качестве интегрального показателя условий формирования бассейновых запасов воды перед началом зимы, поскольку последние формируются в летне-осенний период равномерно по всей площади водосбора. Чем она больше, тем больше накапливается подземных вод в почвогрунтах деятельного слоя и талико-

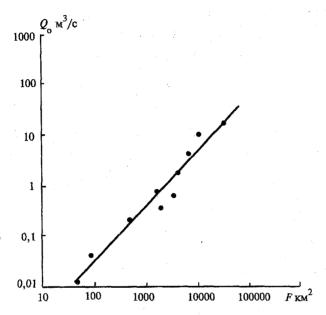


Рис. 3.6. Связь расходов воды в начале зимней межени $Q_{\mathfrak{h}}$ с площадью водосбора F (район 5).

вых зонах речных долин, тем больше стекает воды с поверхности бассейна в ручьи, озера и т. д., тем значительнее запасы воды в речном бассейне.

В пределах сплошной криолитозоны по характеру зависимости, $Q_0 = f(F)$ выделено 9 районов (рис. 3.7). Границы районов проведены по водоразделам в соответствии со сменой гидрогеологических и орографических условий. Для каждого однородного района зависимости имеют следующий аналитический вид:

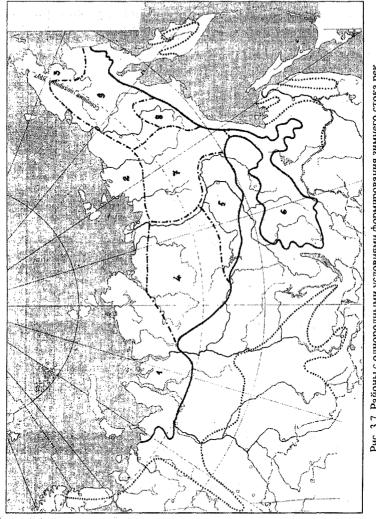


Рис. 3.7. Районы с однородными условиями формирования зимнего стока рек. 1— сплошная, 2 островная; 3 --- - граница района. Границы криолитозоны:

где a и n – районные параметры, характеризующие условия формирования расхода воды, при котором река переходит на подземное питание.

Среднее отклонение эмпирических точек от линий связи не превышает 30 %, что находится в пределах точности измерений зимних расходов воды. Лишь в горных районах Северо-Востока, для которых характерны весьма сложные природные условия формирования зимнего стока, погрешность определения Q_0 выходит за эти пределы и составляет 33 %. Этим подтверждается возможность применения зависимости (3.3) для определения расходов воды Q_0 при отсутствии данных гидрометрических наблюдений.

Оценка точности расчетов производилась также по независимым данным. В анализе использованы данные наблюдений в 18 пунктах с площадями речных бассейнов от 8,55 до 28 700 км² и периодом наблюдений от 2 до 21 года. Проверка показала, что погрешности определения Q_0 в отдельных случаях достигают 60%, однако в среднем не превышают 30%, что сравнимо с точностью измерений зимних расходов воды. Средние относительные погрешности превышают допустимую точность расчетов, как правило, в тех пунктах, у которых имеются короткие ряды наблюдений.

Определение коэффициента истощения а производится обычно аналитически с помощью уравнения (3.1) методом решения обратной задачи. При анализе кривых истощения многие исследователи отмечают необходимость учета изменения интенсивности разгрузки бассейновых запасов подземных вод. Стремление исследователей учесть динамичность подземного притока в реки приводит к появлению противоречивых выводов, что говорит о необходимости дополнительных исследований этого вопроса. Так, по данным одних исследователей [61, 85, 93, 145], значения параметра а не являются постоянными для одной кривой спада зимних расходов воды, а постепенно снижаются к ее концу, что является следствием изменения интенсивности притока подземных вод в реку. Кроме того, установлена значительная его изменчивость не только в течение периода истощения, но и от года к году. Например расчеты, выпол-

ненные Б.Л. Соколовым по материалам В.К. Ситникова, показали, что амплитуда изменений параметра а для 10 рек в бассейнах Зеи и Буреи составляет в целом 105 % их среднего значения, достигая для отдельных рек 200-240 %. По данным же В.П. Пономарева, значения коэффициента истощения α от года к году меняются незначительно, даже при разнице в значениях начального расхода Q_0 в три раза. На основании этого для каждого речного бассейна юга Дальнего Востока им приняты постоянные значения коэффициента истощения α . Анализ более 2000 гидрографов, проведенный В.П. Пономаревым, показал, что коэффициенты истощения изменяются по территории от 0,012 до 0,070. При этом в 60 % случаев значения параметра а составляют 0,020-0,025.

Анализ рассмотренных подходов по определению количественных характеристик уравнения (3.1) показывает, что при моделировании процесса истощения зимнего стока рек, имеющих значительные размеры бассейна, использование постоянного коэффициента а не должно отражаться на точности расчетов, поскольку уравнение Буссинеска – Майэ применяется для описания нелинейных кривых истощения стока. Это предположение нашло свое количественное подтверждение при оценке точности расчетов по указанному уравнению.

При анализе изменчивости коэффициентов α в многолетнем разрезе автором получены выводы, аналогичные выводам В.П. Пономарева и В.В. Кравченко. Так, анализ типовых кривых спада показал, что кривые истощения постоянны во времени, т.е. значения коэффициентов α практически не зависят от водности года. Представляется, что слабая изменчивость α от года к году обусловлена, по-видимому, суровостью мерзлотно-климатических условий региона, а также относительной стабильностью емкостных характеристик подрусловых аллювиальных отложений.

Зимний сток промерзающих и перемерзающих рек наблюдается в период, когда происходит постоянное истощение запасов подземных вод, накопленных в летне-осенний период в таликовых зонах речных долин. Интенсивность и длительность этого истощения находятся в прямой зависимости от регулирующей способности и емкостных характеристик водовмещающих пород. В этих условиях длительность периода истощения зимнего стока рек региона опре-

деляется в первую очередь таким фактором, как мощность и водообильность таликовых отложений.

Для количественной оценки закономерностей истощения проанализирована связь продолжительности истощения зимнего стока $T_{\text{ист}}$ с длиной реки L, выступающей в качестве косвенного показателя мощности и водообильности таликовых зон речных долин (рис. 3.8). Между исследуемыми характеристиками выявлена тесная связь, причем не только для конкретной реки, но и для районов, однородных по условиям формирования истощения и прекращения стока в рус-

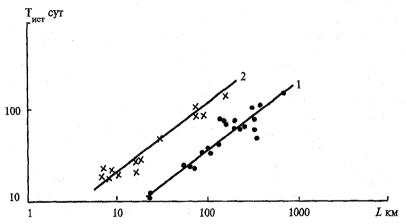


Рис. 3.8. Связь продолжительности истощения зимнего стока $T_{\rm ner}$ с длиной реки L (район 7).

1- малые и средние реки, 2 - реки с наледностью более 1 %.

лах рек. На исследуемой территории выделено восемь таких районов, в пределах которых существуют тесные связи между $T_{\rm ист}$ и L. Аналитическое выражение зависимостей имеет вид

$$T_{ucr} = bL^n, (3.4)$$

где b и n — районные параметры, характеризующие условия истощения и прекращения зимнего стока рек.

Границы выделенных районов показаны на рис. 3.7. При районировании установлено, что для районов 4 и 5 характерны одинаковые условия истощения зимнего стока, поэтому они объединены в один район.

Сопоставление продолжительности истощения стока равнинных и горных рек показало, что в горных районах на малых реках наблюдается меньшая продолжительность истощения стока, чем в равнинных. Этот вывод подтверждает исследования В.В. Кравченко [91], согласно которым условия, способствующие наледеобразованию, возрастают по мере приближения к истоку реки и прямо пропорциональны ее уклону. Следовательно, в горном районе по мере приближения к истоку реки потери зимнего стока за счет наледеобразования еще более увеличиваются. В результате продолжительность истощения у них сокращается по сравнению с реками равнинного района и они быстрее подвергаются промерзанию. Продолжительность истощения стока средних рек в равнинных и горных районах практически не отличается.

Анализ построенных гидрографов показал, что период истощения стока исследуемых рек сравнительно непродолжительный и составляет для большинства средних рек 1-2 месяца. Наибольшая продолжительность спада расходов воды наблюдается в районах влияния Атлантического океана, где в зимний меженный период практически все реки получают устойчивое подземное питание. Например, сток р. Щучье у дер. Лаборовая ($L=107~{\rm km}$) прекращается через 89 дней после наступления зимней межени. Наименьшие значения $T_{\rm нсr}$, равные $35-40~{\rm дняm}$, отмечаются в горных районах Северо-Востока, для которых характерны весьма суровые мерзлотно-климатические условия и широкое распространение наледных явлений.

В пределах исследуемого региона выполнена оценка степени влияния фактора предшествующего увлажнения водосбора (общих запасов воды в речном бассейне) на продолжительность истощения зимнего стока. Выполненные исследования показали, что связь $T_{\text{ист}} = f(Q_0)$ оказалась слабой, коэффициенты корреляции находятся в пределах 0.3-0.4. Слабая связь свидетельствует о том, что длительность спада зимних расходов воды не зависит от водности реки в начале зимней межени, т. е. определяющую роль в процессе исто-

щения стока рек играют мощность и водообильность таликовых зон речных долин, а не запасы воды в русловой сети.

Таким образом, при моделировании процесса истощения зимнего стока промерзающих и перемерзающих рек криолитозоны правомерно применение уравнения Буссинеска – Майэ. Основное преимущество предлагаемой модели заключается в том, что во-первых, она наиболее подходит условиям истощения зимнего стока рек региона; во-вторых, параметры модели достаточно полно учитывают особенности связи речных и подземных вод региона, в частности изменение интенсивности разгрузки подземных вод на разных фазах истощения зимнего стока; в-третьих, для конкретного речного бассейна средние значения коэффициента истощения с могут быть приняты постоянными во времени.

3.2.5. Закономерности промерзания и перемерзания рек

Изучение закономерностей перемерзания и промерзания рек представляет большой практический интерес для строительного проектирования. Сведения о сроках и длительности отсутствия стока на реках необходимы таким отраслям народного хозяйства, как коммунальное и промышленное водоснабжение, энергетика, водный транспорт, сельское хозяйство. Поэтому в практике гидрологических расчетов данные о перемерзании и промерзании рек относятся к категории основных характеристик.

Результаты исследований закономерностей перемерзания рек в различных геокриологических условиях представлены во многих работах, например в [33, 40, 65, 86 и др.]. Анализ этих работ позволяет сделать следующие выводы.

- 1. В настоящее время наиболее полно изучены преимущественно перемерзающие реки прерывистой и островной мерзлоты. Промерзающие и перемерзающие реки сплошной мерзлоты практически не исследованы.
- 2. В существующих исследованиях рассмотрены в основном общие представления о закономерностях перемерзания и его количественных характеристиках. Локальные закономерности выявлены лишь для отдельных районов прерывистого и островного распрос-

транения мерзлых пород (Приморье, Забайкалье, Западная Сибирь).

3. В разработанных методах для расчета характеристик перемерзания в качестве основных расчетных параметров использованы площадь водосбора [33, 40, 99, 121], модуль минимального стока [39, 86], коэффициент летне-осенней увлажненности [73].

Выполненный анализ показывает, что явления промерзания и перемерзания рек в районах развития многолетней мерзлоты исследованы еще далеко не полно. Поэтому изучение этого вопроса является важным этапом исследований зимнего стока и усовершенствования методов его расчета.

В настоящее время в практике строительного проектирования для расчета характеристик перемерзания применяются методы, разработанные А.М. Владимировым. В основу методов положен анализ характера зависимостей продолжительности перемерзания от площади водосбора и модуля минимального стока, построена карта районов с наличием явлений перемерзания. Следует отметить, что исследования А.М. Владимирова важны также в методологическом плане, поскольку им были показаны пути поиска общих территориальных закономерностей формирования и прекращения стока рек криолитозоны зимой. В этом отношении его работы являются основой для дальнейших исследований, посвященных вопросам расчета зимнего стока и перемерзания рек. В данном разделе рассматриваются закономерности перемерзания и промерзания рек в условиях сплошного распространения многолетнемерзлых пород. По сравнению с работами А.М. Владимирова в исследованиях автора этот вопрос изучен более детально, уточнена физическая сущность процесса истощения и прекращения зимнего стока рек региона, на этой основе получены новые закономерности и в результате уточнены существующие представления о формировании и прекращении зимнего стока криолитозоны.

Приступая к анализу закономерностей перемерзания и промерзания, необходимо сделать следующее пояснение, касающееся выбора основных расчетных характеристик. Согласно Наставлениям гидрометеорологическим станциям и постам (Вып. 2, ч. II), прекращение стока в гидрометрическом створе устанавливается по отсутствию течения в створе поста. С этого времени в таблице ежедневных расходов воды (ЕРВ) ставится знак "нб". После полного

промерзания воды в створе в таблице ежедневных уровней воды (ЕУВ) пишется знак "прмз". Расчетные характеристики перемерзания и промерзания определялись следующим образом. Для каждого пункта за период наблюдений по гидрологическим ежегодникам выбирались годы с явлениями "нб" и "промерзание". Отмечались даты начала и конца каждого явления и определялась его продолжительность. Затем по каждому пункту вычислялись средние значения указанных характеристик за период наблюдений, после чего реки группировались по частоте перемерзания P в два наиболее общих случая: 1) перемерзают ежегодно или в большинстве лет ($P \ge 70$ %); 2) перемерзают периодически ($P \le 70$ %).

Критический анализ данных наблюдений показал совпадение дат наступления явлений перемерзания и промерзания на промерзающих реках. Расчеты показали, что разница между этими датами весьма незначительна и в большинстве случаев находится в пределах 5—7 суток (3—5% общей продолжительности перемерзания). Хорошее совпадение сроков объясняется особенностями условий формирования зимнего стока промерзающих рек. В районах сплошного распространения мерзлых пород явление промерзания наблюдается на малых реках, характеризующихся небольшими запасами подземных вод в речном бассейне и их быстрым истощением в самом начале зимней межени. В результате малые реки перемерзают и промерзают до дна почти в одни и те же сроки.

Аналогичный вывод получен и в отношении дат конца явлений перемерзания и промерзания. Кроме того, анализ гидрографов показал, что эти явления заканчиваются в сроки, близкие к датам конца зимней межени. Сопоставление дат показало, что расхождение составляет всего $1-2\,\%$. Это связано с тем, что на перемерзающих и промерзающих реках период отсутствия стока заканчивается перед появлением в русле весенних талых вод, что на гидрографе фиксируется резким подъемом уровней и расходов воды. Этот подъем, как выше было отмечено, одновременно характеризует и конец зимней межени.

Продолжительность перемерзания и промерзания рек определяется датами их наступления и окончания. Статистический анализ дат начала и конца исследуемых явлений показал незначительную изменчивость их во времени, коэффициенты вариации не превыша-

ют 0,30 для большинства гидрологических постов. Выполненный анализ также показал, что продолжительности явлений перемерзания и промерзания практически совпадают на малых реках. Поэтому представляется, что в качестве основной расчетной характеристики промерзающих рек можно принять продолжительность бессточного периода $T_{\text{пермз}}$. Таким образом, незначительная разница в сроках и их устойчивость во времени позволяют ограничиться в исследованиях одной расчетной характеристикой: продолжительностью бессточного периода $T_{\text{пермз}}$ на промерзающих и перемерзающих реках.

В главе 2 было показано, что в существующих методах расчета Тпощадь бассейна реки является одним из основных расчетных параметров. Как было уже отмечено, площадь водосбора не всегда является эффективным показателем условий формирования зимнего стока рек, расположенных в районах распространения многолетнемерзлых пород, поскольку отмечается дискретность подземного стока в реки. Характерной чертой водоносных структур является их линейность, т. е. локализация подземных вод в прирусловых и подрусловых таликовых зонах речных долин. В этих условиях формирование зимнего стока происходит не равномерно со всего бассейна, а в основном за счет подземных вод, накопленных в летнеосенний период в таликовых отложениях. Поэтому при оценке зимнего стока и перемерзания рек криолитозоны целесообразно в качестве косвенного показателя условий его формирования использовать длину реки, а не площадь водосбора. Результаты сравнения двух способов расчета зимнего стока, основанных на районных зависимостях его от площади речного бассейна и длины реки, представлены в табл. 3.5.

Из таблицы видно, что существенных расхождений в значениях коэффициента корреляции r и средней относительной погрешности расчета σ не отмечается. Это свидетельствует о том, что при расчетах зимнего стока и перемерзания рек в качестве расчетного параметра можно использовать как площадь водосбора, так и длину реки. Однако исходя из линейности формирования зимнего стока рек зоны многолетней мерзлоты и несколько лучшего результата для L в качестве основного расчетного параметра целесообразнее использовать длину реки.

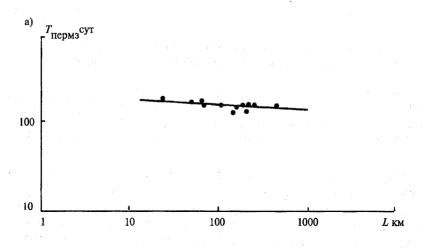
	Значения продолжительностей истощения зимнего стока $T_{\scriptscriptstyle m ucr}$							
И	перемерзания $T_{\text{пермз}}$, рассчитанные по длине L и площади F реки	i						

Dex	$T_{\text{HCT}} = f(L)$		$T_{\text{HCT}} = f(F)$		$T_{\text{пермз}} = f(L)$		$T_{\text{перм3}} = f(F)$	
Район	r	σ%	r	σ%	r	σ%	r	σ%
Равнинный	0,80	17	0,75	18	0,78	4,8	0,61	5,4
Горный	0,93	19	0,93	19	0,81	12	0,78	15

Как указывалось ранее, основной причиной прекращения стока рек в условиях повсеместного развития многолетнемерзлых пород является истощение запасов подземных вод, т. е. гидрогеологический фактор. В условиях глубокой промороженности водоносных горизонтов, когда подземные воды сосредоточены в основном в подрусловых таликовых зонах, гидрогеологический фактор проявляется прежде всего через длину реки. Общее представление о воздействии гидрогеологических условий на перемерзание рек можно составить по рис. 3.9, где показана зависимость продолжительности перемерзания рек $T_{\mbox{\tiny пермз}}$ от их длины L. Видно, что продолжительность перемерзания уменьшается с увеличением размеров реки. Действительно, чем длиннее река, тем больше подземных вод сосредоточено в таликовых зонах речных долин к началу зимы и тем позже перемерзает река и длительность периода отсутствия речного стока становится короче. Выявленная закономерность описывается уравнением

$$T_{\text{пермз}} = A/(L+1)^n,$$
 (3.5)

где A и n – параметры, характеризующие условия перемерзания рек. Уравнение (3.5) отражает особенности прекращения зимнего стока в различных районах. Анализ выявленной закономерности позволил установить на территории сплошной криолитозоны восемь районов, каждому из которых свойственны достаточно тесная связь между исследуемыми характеристиками и свои значения параметров A и n. Необходимо отметить, что границы выделенных районов совпадают с границами районов с различной продолжительно-



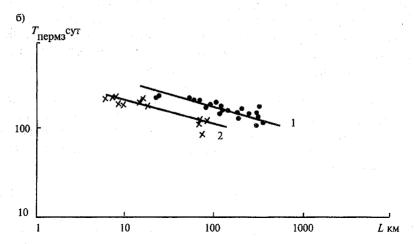


Рис. 3.9. Связь продолжительности перемерзания рек $T_{\text{пермп}}$ с их длиной L. a — район 5; θ — район 7: I — малые и средние реки, 2 — реки с наледностью более 1 %.

стью истощения зимнего стока, поскольку условия истощения и прекращения стока в руслах рек близки по генезису.

Оценка точности расчетов по уравнениям (3.4) и (3.5) произведена как по зависимым, так и по независимым данным. Проверка по-

казала, что для выявленных зависимостей характерен сравнительно небольшой разброс точек. Так, средние относительные погрешности расчета по уравнениям не превышают ±20 %, что свидетельствует о надежности установленных зависимостей. Для проверки по независимым данным использованы данные наблюдений на 22 реках с длинами от 5,8 до 689 км и периодом наблюдений от 3 до 19. Анализ ошибок показал для большинства рек допустимую точность расчетов по уравнениям (3.4) и (3.5).

Анализ изменчивости $T_{\text{пермз}}$ показал, что продолжительность ежегодного перемерзания рек мало меняется от года к году (C_{ν} <0,3). В целом в пределах исследуемой территории продолжительность перемерзания малых рек составляет в среднем 170 – 185 дней, средних – 130 – 140 дней. В горных районах продолжительность перемерзания рек обычно на 8–9 % выше, чем в равнинных. Это объясняется двумя причинами: во-первых, влиянием высотной поясности на условия прекращения стока рек; во-вторых, широким распространением здесь наледных явлений. Эти причины обусловливают сравнительно раннее и более длительное перемерзание рек в горных районах.

3.3. Закономерности процесса истощения стока не перемерзающих рек

Данные гидрометрических наблюдений показывают, что в пределах исследуемого региона устойчивый зимний сток наблюдается на 25 реках, из них 20 рек расположены в районах с разрывной тектоникой, четыре реки — в зоне влияния теплых воздушных масс, формирующихся над Атлантическим океаном, и одна река — в районах интенсивного развития карста. В разделе анализируется влияние тектонических нарушений на условия формирования зимнего стока рек региона. Влияние климатических факторов и влияние карстующихся пород здесь не рассматриваются, поскольку они детально рассмотрены А.М. Владимировым.

В пределах исследуемого региона условия питания рек подземными водами весьма тесно связаны с тектоническим строением речных бассейнов. В условиях глубокой промороженности гидрогео-

логических структур тектонические разломы являются основными водопроводящими каналами, по которым происходит взаимосвязь речных и подземных вод, залегающих под толщей мерзлых пород. В настоящее время роль разрывной тектоники в процессах формирования ресурсов подземных вод мерзлой зоны освещена в научной литературе достаточно широко [1, 51, 124, 136, 156, 168]. В разделе результаты геокриологических и гидрогеологических исследований анализируются преимущественно с позиции их обобщения для оценки влияния разрывов на условия формирования зимнего речного стока. Связь водности рек с зонами тектонических нарушений показана на примере Верхояно-Чукотской складчатой области.

Верхояно-Чукотская складчатая область представляет собой горную страну с резко расчлененным рельефом. В тектоническом отношении здесь выделены зоны недифференцированных опусканий и интенсивного осадконакопления в неоген-четвертичное время; малоконтрастных новейших движений и слабых недифференцированных поднятий; монолитных мезокайнозойских сводовых поднятий; контрастных новейших поднятий и интенсивной блоковой тектоники; интенсивной блоковой тектоники и вулканической деятельности в мезозойское и кайнозойское время. Данные гидрогеологических исследований показывают, что наиболее высокой трещиноватостью и водопроводимостью горных пород, а также широким развитием серий разломов отличаются территории с интенсивной разрывной тектоникой и вулканической деятельностью в мезозое и кайнозое, а также с контрастными новейшими движениями. Для них характерен интенсивный водообмен между поверхностными и подземными водами. Эти территории расположены вдоль побережья морей Тихого океана где развита в основном прерывистая и островная мерзлота. В пределах районов сплошной многолетней мерзлоты наиболее благоприятные условия для аккумуляции подземных вод имеются в бассейнах с новейшими и омоложенными разломами. В таких бассейнах наблюдается относительно высокий зимний сток рек. Это связано с тем, что талики, приуроченные к тектоническим разломам, являются очагами разгрузки глубинных подмерзлотных вод в реки. В результате сквозные подрусловые отложения даже в весьма суровых геокриологических условиях обеспечивают устойчивое подземное питание рек зимой.

Анализ материалов гидрометрических наблюдений и их сопоставление со схемой распространения тектонических разломов показывают территориальную приуроченность рек с устойчивым зимним стоком к тектонически активным областям. Так, из 19 рек, расположенных в пределах Верхояно-Чукотской складчатой области, долины 15 рек пересекают зоны тектонических разломов. Из них наибольшее число рек сосредоточено вблизи южной окраины зоны сплошного распространения многолетнемерзлых пород, для которого характерны разрывные дислокации с преобладающим направлением разломов с юго-востока на северо-запад. В морфологическом отношении эта территория относится к Верхне-Колымскому и Среднеканскому низкогорьям. По данным О.Н. Толстихина, здесь располагаются 22 наледных района. Им установлено, что большинство наледей этих районов ориентированы по нормали к зоне разломов и лишь отдельные наледи формируются вдоль новейших и омоложенных разломов. В целом изучение закономерностей распространения наледей на всей территории Северо-Востока позволили ему выявить, что их наибольшее число расположено в областях молодого контрастного рельефа с восходящим неотектоническим движением и тектоническими разломами. Следует особо подчеркнуть, что аналогичная закономерность отмечается и в отношении территориального распределения рек с устойчивым зимним стоком. Таким образом, исследования О.Н. Толстихина косвенно подтверждают приуроченность рек с постоянным зимним стоком к территориям с повышенной тектонической трещиноватостью.

Данные многолетних наблюдений показывают, что наличие постоянного зимнего стока в каком-либо гидрометрическом створе не свидетельствует о перемерзании реки ниже этого створа. Например, сток р. Детрин у устья р. Омчука ($F=3490~{\rm km}^2$) не прекращается в течение всей зимы, однако в створе, расположенном в 63 км ниже, у устья р. Вакханки, она ежегодно промерзает до дна. Отмеченное явление подтверждается также тем, что многочисленные данные гидрогеологических съемок показывают чередование сквозных и несквозных таликов в речных долинах региона. Характерным примером могут служить данные Н.Н. Романовского о существовании несквозных грунтово-фильтрационных таликов ниже сквозных напорнофильтрационных таликов в речных долинах Кыры и Уяндины.

В гидрологической практике для расчета минимального зимнего стока неисследованных рек чаще всего используются зависимости минимального 30-суточного расхода воды Q_{30} от площади водосбора F [40, 130]. С ростом площади поверхностного водосбора улучшаются условия питания рек подземными водами, что находит отражение в повышении зимних расходов воды. Эта закономерность и обусловливает связь между рассматриваемыми характеристиками. Исследование закономерностей изменения зимнего стока показали, что на реках сплошной криолитозоны такая связь отсутствует (рис. 3.10). Расчеты показали также отсутствие связи Q_{30} с длиной

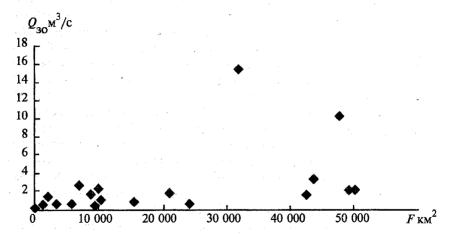


Рис. 3.10. Связь минимальных зимних 30-суточных расходов воды рек сплошной криолитозоны с площадью водосбора (Районы 8,9).

реки L, являющейся косвенной характеристикой мощности и водообильности подрусловых таликовых отложений. Вероятнее всего, это обусловлено тем, что тектонические разломы относятся к местным морфологическим особенностям в районе гидрометрического створа, поэтому их влияние носит азональный характер. При анализе закономерностей изменения зимнего стока выявлено, что размеры рек с устойчивым зимним стоком колеблются в широких пределах. Так, площади речных бассейнов изменяются от 12,1 км² (руч. Ягодный - г. п.Тамватней) до 50 100 км² (р. Колыма - пос. Дуска-

нья), длина рек соответственно – от нескольких километров до 530 км. Таким образом, значительные вариации площадей и длин рек подчеркивают азональность условий формирования зимнего стока не перемерзающих рек, а неоднородные условия питания подземными водами находят отражение в отсутствии связи между характеристиками Q_{30} , F и L.

В пределах прерывистой и островной мерзлоты, как выше было отмечено, условия питания, циркуляции и разгрузки подземных вод являются более благоприятными. По данным О.Н. Толстихина, здесь зона свободного водообмена располагается на глубинах от 30 – 40 м (Охотское побережье) до 300 – 400 м (Корякское нагорье) ниже уровня моря. В этих условиях практически все реки получают устойчивое подземное питание и имеют постоянный сток в течение всей зимы, поскольку приток подземных вод в реки происходит не только по тектоническим разломам, но и из зоны дренирования. Реки с небольшими площадями речных бассейнов, характеризующиеся неполным дренированием подземных вод, как правило, перемерзают.

Таким образом, обобщение имеющихся материалов позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, влияние тектонических разломов на режим и зимний сток является определяющим по сравнению с влиянием других факторов (климатических и криогенных) и носит азональный характер. Роль разрывной тектоники наиболее ярко проявляется в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород, где новейшие и омоложенные разломы - единственные водоносные тракты, по которым происходит разгрузка подмерзлотных вод в реки. С уменьшением суровости мерзлотных условий происходит ослабление влияния разрывных дислокаций на водный режим рек вследствие усиления водообмена в гидрогеологических структурах. Во-вторых, только в местах пересечения речных долин разломами наблюдается постоянный зимний сток рек, выше и ниже этих участков может наблюдаться явление перемерзания. В-третьих, отмеченная особенность зимнего режима должна учитываться в инженерных изысканиях и при проектировании водозаборов, при использовании рек как источников водоснабжения.

3.3.1. Физическая модель процесса истощения стока не перемерзающих рек

Значительный интерес представляет исследование возможности использования уравнения Буссинеска — Майэ для описания кривых истощения рек с устойчивым зимним стоком. Для этого следует более детально проанализировать методы определения подземного стока в реки, основанные на использовании кривых истощения речного стока. С позиций практического применения они описаны Б.Л. Соколовым, В.В. Кравченко, В.П. Пономаревым. Рассмотрим основные результаты их исследований.

В основе указанных методов лежит представление о том, что спад зимних расходов воды находится в тесной связи с истощением запасов подземных вод в речном бассейне и с интенсивностью их разгрузки. Поэтому применение этих методов для расчета подземного стока в реки основано на том допущении, что истощение бассейновых запасов подземных вод зимой происходит по тем же закономерностям, что и спад расходов воды. В связи с этим для аналитического описания кривых истощения подземных вод, построенных по данным о зимних расходах воды, как выше было отмечено, используются различные модификации дифференциального уравнения Буссинеска, в том числе и уравнение Буссинеска — Майэ.

Б.М. Шенькман [1976] при моделировании гидрографа зимнего стока рек Сибирской платформы применил экспоненциальное уравнение Буссинеска

$$Q_{I} = Q_{0} e^{-\alpha I}, \qquad (3.6)$$

правомерность которого обосновал данными о режиме родников в зимний сезон. Для расчета зимнего гидрографа рек юга Восточной Сибири он предложил метод, в котором используется гиперболическое уравнение Буссинеска – Майэ.

В.П. Пономарев, как было показано в предыдущем разделе, для расчета ординат гидрографа зимнего стока рек юга Дальнего Востока использовал уравнение Буссинеска – Майэ. Анализ данных многолетних наблюдений, выполненный им, показал, что начальному расходу Q_0 в наибольшей степени соответствует расход, наблюдав-

шийся при переходе рек на подземное питание. Время перехода рек на подземное питание он предлагает определять путем корреляционного анализа кривых спада последнего летне-осеннего дождевого паводка.

В.В. Кравченко гидрографы суммарного подземного стока в реки бассейнов Ангары, Верхней Лены и оз. Байкала моделирует с помощью уравнения Буссинеска — Майэ. Его расчеты показали тесную связь параметров кривых истощения Q_0 и α с общим объемом зимнего подземного притока в реки. Им установлено, что при увеличении сработанного объема подземных вод неравномерность истощения уменьшается и, следовательно, уменьшается и значение коэффициента α . Выявленные закономерности представлены в виде аналитических зависимостей. Ординаты гидрографа зимнего стока он определил как разность между суммарным подземным притоком в реки и ледовым питанием.

По данным Б.Л. Соколова, ни одно из этих уравнений не имеет особых преимуществ, поэтому в практических расчетах выбор какого-либо одного из них определяется только тем, насколько точно оно описывает процесс истощения подземных вод. В связи с этим при изучении закономерностей спада расходов воды рек с устойчивым зимним стоком аппроксимация типовых кривых производилась по уравнению Буссинеска - Майэ, как наиболее подходящему условиям истощения зимнего стока рек Якутии. Оценка точности результатов расчета показала хорошее совпадение ординат расчетного и реального гидрографов зимнего речного стока [13, 15]. Кроме того, детальные методические проработки применения уравнения Буссинеска - Майэ для расчета ординат гидрографа зимнего стока и его апробация в различных природных условиях, выполненные в работе [108], также показали удовлетворительные результаты. Таким образом, опыт его использования показывает, что уравнение Буссинеска - Майэ можно применять для математического описания кривых спада рек с устойчивым зимним стоком. При практическом его применении следует иметь в виду, что продолжительность расчетного интервала времени t составляет в данном случае длительность всего периода зимней межени.

В результате выполненных расчетов по характеру зависимостей (3.3) – (3.5) в областях сплошного развития многолетнемерзлых по-

род были выделены районы (см. рис. 3.7), однородные по условиям формирования и закономерностям истощения и прекращения зимнего стока. Обобщение обширного эмпирического материала с учетом анализа мерзлотно-гидрогеологических условий региона позволяет вскрыть региональные особенности формирования и истощения зимнего стока рек в пределах всей криолитозоны и его отдельных частей. Ниже приводится их краткая характеристика.

3.4. Региональные особенности стока рек в зимнюю межень

Зона тундры и лесотундры. В районе 1 зимой сказывается влияние теплого Атлантического и холодного Северного Ледовитого океанов. Поэтому зима здесь сравнительно мягкая, снежная с частыми оттепелями. Благодаря высоким зимним температурам воздуха и мощному снежному покрову широко развиты сквозные и надмерзлотные талики под руслами рек. В результате многолетнемерзлые породы практически не препятствуют интенсивному водообмену между поверхностными и подземными водами, что отражается на характере формирования и истощения зимнего стока рек.

Зимняя межень на реках наступает обычно в первой декаде октября и наблюдается до конца мая — начала июня, ее продолжительность составляет 220 — 240 дней. Наибольшая продолжительность зимней межени отмечается на реках приморских низменностей (250 — 260 дней). Большинство малых и средних рек не перемерзают или перемерзают эпизодически на отдельных участках. Из 11 рек, на которых зафиксированы случаи перемерзания, ежегодно перемерзают 6 рек. На остальных реках повторяемость лет с отсутствием стока изменяется от 10 до 85 %.

На реках с устойчивым зимним стоком наименьшие значения расходов воды в большинстве случаев наблюдаются в конце зимы, в апреле.

Характерной особенностью водного режима перемерзающих рек является то, что спад зимних расходов происходит равномерно и растягивается до 3 – 3,5 месяца. Сток воды на этих реках прекращается чаще всего в январе, при этом подрусловой сток сохраняется.

Выделенный район характеризуется наиболее сложными условиями наледеобразования. Наледи речных вод распространены повсеместно, причем их развитие тесно связано с перемерзанием рек на перекатах, опусканием ледяного покрова под давлением выпадающего снега и поступлением талых снеговых вод в русла рек.

Рельеф района 2 представляет собой обширную озерно-аллювиальную равнину с абсолютными отметками от 35 до 120 м. Мощность многолетнемерзлых пород в целом по территории составляет 300-350 м, к северу она увеличивается до 450 м.

Зимняя межень на реках наступает обычно в последних числах сентября и заканчивается в конце апреля—начале мая. Средняя продолжительность межени составляет 240 дней. В отдельные годы сроки зимней межени могут отличаться от средних значений на 5—8 дней.

Из-за наличия мощной толщи мерзлых пород и полностью промороженных аллювиальных отложений сквозные талики встречаются здесь крайне редко, поэтому малые и средние реки в самом начале зимней межени перемерзают и для них не характерно развитие крупных наледей и полыней. Средняя продолжительность спада зимних расходов составляет 60 дней.

Район 3 расположен в пределах Пенжино-Анадырской низины, рельеф которой разделен горными кряжами и массивами, а также ледниковыми формами (моренами, грядами, холмами). Мощность толщи многолетнемерзлых пород на морском побережье составляет 90 – 130 м и увеличивается до 200 м в центральной части низины. Водообмен между поверхностными и подземными водами осуществляется чаще всего через узкие таликовые щели, приуроченные к тектонически активным зонам. Подобные условия подземного питания характерны для рек Анадыря, Великой и их притоков.

Зимняя межень такая же продолжительная и маловодная, обычно наступает в те же сроки, как и в районе 2. По условиям истощения и прекращения зимнего стока рек район также близок к этому району, однако зимой на водном режиме рек ощущается влияние Тихого океана, в частности влияние оттепелей.

Речные наледи и наледи подземных вод формируются почти на всех реках: Относительная наледность речных бассейнов, по оценкам Б.Л. Соколова, составляет в среднем $1,0-1,5\,\%$ при площади ледяных массивов до $30~{\rm km^2}$ и мощности до $10~{\rm m}$.

Лесная зона. Район 4 является переходной областью от зоны тундры к лесной и представляет собой в основном слаборасчлененные плато и плоскогорья, абсолютные отметки которой превышают уровень моря на 500-800 м.

Северная часть территории располагается на кристаллическом фундаменте с многочисленными тектоническими разломами и разрывными нарушениями. Для ее рельефа характерны глубоко врезанные речные долины и крупные межгорные впадины (на плато Путорана абсолютные отметки достигают 1500 – 1700 м). Однако из-за исключительно мощной толщи криолитозоны, достигающей здесь 1500 м, над- и межмерзлотные воды являются полностью промороженными. Южная часть территории района расположена большей частью в пределах бассейна р. Вилюя. Его характерной чертой является то, что под толщей многолетнемерзлых пород залегают соленые подземные воды и рассолы. Выход подземных вод происходит только на участках с крупными тектоническими нарушениями, вдоль которых формируются наледи. Несмотря на отмеченные особенности, из-за наличия мощной толщи многолетнемерзлых пород и большей континентальности климата условия формирования зимнего стока рек являются однородными.

Зимняя межень на реках наступает обычно в начале октября и продолжается до конца апреля — начала мая. Средняя продолжительность межени составляет 217 дней.

Большинство малых и средних рек перемерзают постоянно или эпизодически на отдельных участках. Из 19 рек, на которых зафиксированы случаи перемерзания, перемерзают периодически 5 рек. Устойчивый зимний сток наблюдается на р. Чоне (F=21 000 км², L=506 км), в долине которой отмечаются выходы межмерзлотных подземных вод по трещиноватым зонам разломов.

Характерной особенностью водного режима перемерзающих рек является более длительный спад зимних расходов, который растягивается до 2–2,5 месяцев. Сток воды на этих реках прекращается чаще всего в конце ноября и декабре.

Район 5 занимает большую часть Центрально-Якутской низменности и Лено-Алданского плато. В пределах района широко развиты криогенные формы рельефа (термокарстовые озера, впадины, бугры пучения), а также эоловый тип мезорельефа. Долины круп-

ных рек представляют собой заболоченную озерную равнину с абсолютными отметками от 50 до 150 м.

Зимняя межень на реках наступает обычно в первых числах октября и заканчивается в конце апреля. Средняя продолжительность межени составляет 210 дней. Изменчивость сроков зимней межени весьма незначительна (5 – 7 дней).

Реки района отличаются весьма малой водностью в зимнюю межень: в долинах малых и средних рек аллювиальные отложения имеют столь малую мощность, что в течение ноября все они перемерзают. Сквозные талики существуют только под руслами крупных рек и их притоков (р. Лена, Вилюй). Питание этих рек происходит за счет подмерзлотных вод, поэтому у них наблюдается устойчивый зимний сток.

Горная область расположена в пределах горного пояса Южной Сибири и Верхояно-Чукотской горной страны и имеет весьма сложное орографическое строение. Характерной чертой территории является резко расчлененный альпийского типа рельеф с широким распространением узких межгорных впадин и тектонических нарушений. В этих условиях процессы формирования зимнего стока рек имеют прямую зависимость от мерзлотно-гидрогеологического и тектонического строения речных бассейнов.

Район 6 относится к Байкальской складчатой области и представляет собой различные по размерам нагорья, среднегорья, плоскогорья, межгорные впадины и равнины.

Более мягкий климат района оказывает влияние на сроки зимней межени. Так, зима на реках наступает в первой декаде октября и продолжается до конца апреля. Средняя продолжительность зимней межени здесь наименьшая и составляет 211 дней.

Территория района характеризуется мощными тектоническими разломами протяженностью до 200 км и повышенной трещиновато тью горных пород, которые пересекаются многими крупными реками. Поэтому на этих реках наблюдается устойчивый зимний сток и широко развиты наледи подземных вод и другие криогенные явления. Малые и средние реки повсеместно перемерзают в начале декабря. Повышенным зимним стоком отличается р. Ципа у местности Ую, истоком которой является озеро, хотя в отдельные годы она также перемерзает.

Районы 7, 8 и 9 по характеру рельефа, климату и мерзлотно-гид-

рогеологическим условиям мало отличаются друг от друга и представляют собой цепь горных хребтов и гряд различной высоты и протяженности. Наиболее высокими являются хребты Улахан-Чистай и Момский с максимальными абсолютными отметками 3147 и 2633 м. Для межгорных впадин характерен холмисто-грядовый рельеф с абсолютными отметками 200-600 м. На большей части рассматриваемой территории мощность многолетнемерзлых пород под водоразделами составляет 400-600 м, под речными долинами она сокращается до 100-300 м.

Зимняя межень на реках наступает обычно в конце сентября – начале октября и заканчивается в середине мая. Средняя продолжительность межени изменяется по территории от 225 до 231 дня. Изменчивость сроков зимней межени незначительна.

Несмотря на относительное однообразие природных условий, особенности формирования, закономерности истощения и прекращения зимнего стока рек в каждом районе различны. Так, район 7 по условиям формирования подземных вод относится к Яно-Колымскому криогенному напорному бассейну, для которого характерно развитие подмерзлотной трещиноватой зоны мощностью $10-50\,\mathrm{M}$, содержащей трещинные воды. Незначительная мощность этой зоны и ее относительно невысокая водопроводимость затрудняют участие подмерзлотных вод в питании речных вод. Поэтому малые и средние реки повсеместно перемерзают. Повышенный зимний сток наблюдается, как правило, у рек, пересекающих участки тектонических нарушений, где существуют благоприятные условия для устойчивого питания рек подземными водами (р. Адыча, Эльги, Куйдусун, Агаякан и др.).

Многочисленные выходы подмерзлотных вод наблюдаются вдоль структурно-тектонического шва, проходящего вдоль подножия Верхоянского хребта. Поэтому некоторые малые и средние реки, стекающие с этого хребта, имеют устойчивый речной сток в течение всей зимы (р. Соболоох Майан и др.).

Район 8 расположен в пределах горной системы Черского. В тектоническом плане представляет собой структуру с интенсивной линейной складчатостью и многочисленными высокообводненными разломами. Для таких структур характерен активный водообмен между поверхностными и подземными водами, т.е. геокриологичес-

кие условия территории являются более благоприятными для формирования значительных запасов подземных вод. Поэтому здесь на многих реках наблюдается устойчивый речной сток в течение всей зимы (верховья Колымы, р. Таскан, Буюнда, Сугой и др.).

В пределах района 9 расположены Колымо-Омолонский гидрогеологический массив и Охотско-Чукотский вулканогенный бассейн, в которых условия формирования подземных вод весьма разнообразны. Кроме того, как и в районе 3, на зимнем режиме рек ощущается влияние Тихого океана.

Отличительной чертой водного режима рек района является широкое распространение многочисленных полыней, связанных с выходом подмерзлотных подземных вод по тектоническим разломам или через сквозные подрусловые талики. На некоторых реках (Олой, Большой Анюй, Сугой, Коркодон и др.) число полыней иногда превышает число наледей. В результате спад зимних расходов воды несколько растянут по сравнению с реками районов 7 и 8.

Юго-западная и южная части исследуемого региона располагаются в зоне прерывистого и островного распространения многолетнемерзлых пород, мощность которых составляет от 25 до 100 м, поэтому их наличие здесь не оказывает, как указывалось выше, существенного влияния на условия водообмена между поверхностными и подземными водами. Прерывистость многолетнемерзлых пород, мягкий зимний климат, большое количество выпадающих осадков создают благоприятные условия питания рек подземными водами, определяющимися в основном литологическим составом и водопроницаемостью пород в речных бассейнах. В результате водный режим большинства рек близок к режиму рек, расположенных вне зоны многолетней мерзлоты.

Зимняя межень на большинстве рек наступает в середине октября и продолжается до конца апреля— начала мая, ее средняя продолжительность составляет 190 — 200 дней. Явление перемерзания наблюдается, как выше было отмечено, на реках длиной до 200 км и с площадями водосборов до 5000 км². Сроки и продолжительность перемерзания определяются в основном местными мерзлотно-гидрогеологическими условиями. На реках с устойчивым зимним стоком наименьшие расходы воды наблюдаются в конце зимней межени, в марте — апреле.

Методы расчета зимнего стока рек криолитозоны

В практике гидрологических расчетов для рек с устойчивым зимним стоком определяются следующие расчетные характеристики:

- минимальные средние суточные Q_1 и 30-суточные расходы воды Q_{30} ;
 - меженные расходы воды Q_3 .
- Для рек с отсутствием зимнего стока или промерзающих и перемерзающих рек определяются:
- ежедневные расходы воды (EPB) в период их спада с наступлением зимней межени;
- объем и продолжительность периода истощения зимнего стока. Объем истощения $W_{\text{ист}}$ это суммарный сток за весь период его истощения. Продолжительность истощения зимнего стока $T_{\text{ист}}$ это период от даты наступления зимней межени до даты начала перемерзания реки;
- продолжительность бессточного периода $T_{\rm пермз}$ на реках. За продолжительность бессточного периода принят период от даты начала перемерзания реки до даты окончания зимней межени.

Кроме названных характеристик определяются также начало, конец и продолжительность зимней межени.

Определение расчетных характеристик стока производится разными способами в зависимости от объема исходной гидрометеорологической информации:

- 1) при наличии данных гидрометрических наблюдений непосредственно по этим данным;
- 2) при недостаточности данных гидрометрических наблюдений путем приведения их к многолетнему периоду;
- 3) при отсутствии данных гидрометрических наблюдений по картам изолиний и эмпирическим формулам.

В главе излагаются методы расчета характеристик зимнего стока рек криолитозоны в каждом из перечисленных случаев. При этом

основное внимание уделено методам, разработанными автором для случаев, когда отсутствуют данные наблюдений, поскольку эта задача является наиболее важной и сложной в практике гидрологических расчетов. Рекомендуемые автором методы основаны на анализе данных многолетних наблюдений за режимом зимнего стока рек региона, а также на анализе особенностей условий его формирования и закономерностей изменения в условиях глубокой промороженности гидрогеологических структур.

4.1. Расчет характеристик зимнего стока при наличии и недостаточности гидрометрических наблюдений

При наличии данных гидрометрических наблюдений расчетные характеристики зимнего стока определяются непосредственно по этим данным на основе применения сглаженных эмпирических и аналитических кривых распределения вероятностей. В практических расчетах основное значение имеет вопрос подбора аналитической кривой к эмпирическим точкам ряда наблюдений. Опыт исследований показывает, что для описания многолетней изменчивости стока рек наиболее часто применяются трехпараметрическое гамма- распределение С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля, имеющее предел простирания от нуля до бесконечности при любом отношении коэффициента асимметрии C_{ν} к коэффициенту вариации C_{ν} ; распределение Пирсона III типа, которое положительно при $C_s > 2C_{\nu}$ и нормальное распределение [135]. Расчет параметров аналитических кривых распределения (среднего многолетнего значения стока, коэффициентов C_{ν} и $C_{\rm s}$) выполняется стандартными статистическими методами, используемыми для случайных дискретных величин.

Обзор научных исследований показывает, что вопрос о выборе аналитической функции распределения для описания многолетней изменчивости характеристик зимнего стока рек изучаемого региона исследован недостаточно полно. В большинстве работ оценка расчетных характеристик производится либо на основе анализа эмпирических кривых обеспеченности, либо с использованием традиционных для гидрологии аналитических кривых, в том числе и выше

указанных, которые хорошо зарекомендовали себя при расчетах речного стока, но требуют дополнительного обоснования в случае их применения для аппроксимации закона распределения характеристик зимнего стока.

В разделе приводятся результаты исследований по обоснованию функции распределения характеристик зимнего стока рек зоны сплошного распространения мерзлых пород. Обоснование выбора теоретической функции показано на примере расчета параметров кривых распределения вероятностей дат начала зимней межени. Лля анализа были использованы 37 гидрометрических створов с периодом наблюдений от 20 до 59 лет. Как показали исследования, эти ряды можно рассматривать как выборки случайных независимых величин, поскольку в 36 случаях из 37 коэффициент автокорреляции оказался статистически незначимым (при уровне значимости $2\alpha = 10\%$). Проверка рядов на однородность проводилась с использованием стандартных критериев Стьюдента и Фишера также при уровне значимости $2\alpha = 10 \%$. Гипотеза об однородности рядов опровергается по критерию Стьюдента в одном случае, а по критерию Фишера в 4 случаях из 37. Учитывая сказанное, ряды дат начала зимней межени на реках региона можно рассматривать как однородные, а для описания их вероятностной структуры наиболее адекватной является модель случайной величины.

Расчет оценок параметров распределения проводился методом моментов. В большинстве случаев погрешность расчета среднего значения не превышала 10 %, а для коэффициента вариации – 15 %. Полученные характеристики были сгруппированы по районам. Групповой анализ показал, что коэффициент вариации как в пределах выделенных районов, так и в целом для рассматриваемой территории не зависит от площади водосбора и незначительно изменяется в пространстве. При этом в большинстве случаев его значенеие не превосходит 0,25, а в среднем для всей территории равно 0,2. В этом случае (при относительно небольших значениях коэффициента вариации) практически все используемые в гидрологии кривые обеспеченности хорошо согласуются с эмпирическими точками и выбор расчетного распределения невозможен без некоторых априорных соображений.

Наиболее важными вопросами при выборе аналитической кри-

вой распределения для рядов зимнего стока являются следующие:

- Может ли в этом случае функция плотности вероятности быть ограниченной слева и не ограниченной справа?
 - Должна ли эта функция быть асимметричной?

По мнению авторов [19], положительный ответ на эти вопросы можно дать только при наличии веских оснований, так как гораздо естественнее предположить, что разброс относительно средней даты исследуемой характеристики является симметричным и логичнее применить либо кривую не ограниченную ни слева, ни справа, либо ограниченную с обеих сторон. Однако гидрологический опыт применения кривых, ограниченных с двух сторон например, кривой Джонсона, показывает, что эти кривые имеет смысл применять лишь в том случае, когда максимум (а) и минимум (b) известны заранее, в противном случае а и b теряют физический смысл и превращаются в формальные параметры аппроксимации, надежный расчет которых по эмпирическим данным невозможен. С учетом сказанного, была выдвинута гипотеза о том, что для аппроксимации закона распределения дат начала зимней межени можно использовать нормальный закон.

С целью проверки выдвинутой гипотезы для всех створов были рассчитаны выборочные коэффициенты асимметрии и их среднеквадратические погрешности, причем расчет погрешностей выполнялся с использованием двух формул: формулы Крицкого – Менкеля, которая была разработана для двухпараметрического гаммараспределения [Рождественский и др., 1990], и формулы Вирсмен и др., [1979]

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{6n(n-1)}{(n+1)(n-2)(n+3)}},$$
(4.1)

где n – длина выборки.

При использовании любой из формул в 37 случаях из 37 выборочный коэффициент асимметрии попадает в интервал $\pm 1,5\sigma_s$, а в 29 случаях из 37 он либо является отрицательным, либо не превосходит значение своей среднеквадратической погрешности. При этом общее число положительных и отрицательных коэффициентов асимметрии примерно одинаковое: 17 отрицательных и 20 положитель-

ных. Таким образом, с высокой степенью вероятности можно утверждать, что принятая нулевая гипотеза не опровергается.

Для всех рассмотренных створов были построены эмпирические кривые обеспеченности и произведено их сравнение с аналитической кривой нормального закона. Сравнение проводилось с использованием критериев согласия $n\omega^2$ и хи-квадрат Пирсона. Гипотеза о согласии кривых во всех случаях не опровергается даже при уровне значимости 20 %. В качестве примера на рис. 4.1 приводятся эмпирическая и аналитическая кривые обеспеченности дат начала зимней межени для створа р. Ботомы – с. Бролог, по которому имеется наиболее продолжительный ряд наблюдений (n = 59, $F = 12 200 \text{ км}^2$, $C_{\nu} = 0,14$).

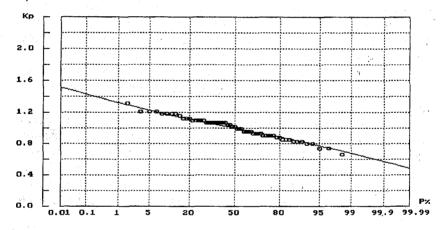


Рис. 4.1. Эмпирическая и аналитическая кривые обеспеченности дат начала зимней межени в створе р. Ботомы у с. Бролог

Как видно на рисунке, отклонение точек от аналитической кривой во всем диапазоне значений весьма незначительное. Аналогичная ситуация характерна и для большинства других рек. Таким образом, расчет сроков наступления зимней межени на малых и средних реках региона предлагается производить с использованием аналитической кривой нормального закона распределения.

Аналогичные расчеты были выполнены по всем остальным характеристикам зимнего стока ежегодно промерзающих и перемер-

зающих, а также не перемерзающих рек. Статистические расчеты выполнены по программе GIDSTAT, разработанной В.А. Шелутко и В.Г. Гутниченко. Программа позволяет проверить гипотезы о соответствии эмпирических кривых десяти заданным законам распределения с помощью критерия согласия $n\omega^2$ и оценить параметры этих распределений. Анализ эмпирических кривых обеспеченностей анализируемых характеристик показал, что они хорошо согласуются с кривыми трехпараметрического гамма-распределения. Исключение составляют эмпирические кривые обеспеченностей продолжительности зимней межени $T_{_{39M}}$, для описания которых более подходит нормальное распределение. Это связано с характером изменчивости во времени сроков и продолжительности зимней межени. Поскольку продолжительность межени определяется двумя датами, то и многолетняя ее изменчивость описывается такой же аналитической кривой распределения, что и ее сроки.

В пределах прерывистой и островной криолитозоны исследования по выбору теоретической функции распределения выполнены Н.К. Серковым и Е.А. Давкаевым [1991]. Их расчеты по 81 ряду минимального зимнего стока не перемерзающих рек зоны БАМ показали, что эмпирическим кривым подходят главным образом двухлараметрическое гамма-распределение, логнормальное и нормальное распределения.

На периодически перемерзающих реках непрерывность рядов наблюдений нарушается и в нем появляются годы с нулевыми значениями характеристик зимнего стока. В этом случае, согласно нормативным документам [116, 130], определение обеспеченных значений характеристик производится либо непосредственно по эмпирической кривой обеспеченности, либо по "усеченной" кривой, параметры которой определяют по ряду без нулевых значений, затем вычисляют квантиль заданной вероятности превышения и вводят поправку на частоту явления. Возможности использования "усеченной" кривой обеспеченности при расчетах минимального зимнего стока были проверены Г.А. Любимовым и Н.К. Серковым [1991] на периодически перемерзающих реках зоны БАМ. В своих исследованиях они отметили ряд недостатков практического применения этого метода: наличие специальных допущений (введение поправки), невозможность определения параметров кривой обеспеченности невозможность определения параметров кривом обеспеченности невозможность определения параметров кривом определения параметров кр

посредственно по всему ряду данных с нулевыми значениями и учета дополнительной информации при расчетах, и предложили новый подход, учитывающий эти недостатки. Сущность подхода заключается в определении параметров кривой обеспеченности по аналитическим зависимостям с использованием всей совокупности информации о стоке, при этом его нулевые значения заменяются соответствующими ежегодными значениями продолжительности периодов перемерзания. Полученная кривая названа объединенной кривой распределения вероятностей перемерзания. Для определения частоты перемерзания рек они предложили метод бутстреп-моделирования. Как отмечает Серков, основная идея метода состоит в непосредственной оценке по имеющемуся ряду наблюдений интересующих исследователя статистик (например, квантиля заданной обеспеченности) без предварительного расчета параметров кривой распределения. Проведенный Г.А. Любимовым и Н.К. Серковым анализ показал, что предложенный ими подход позволяет более точно определить параметры кривых обеспеченностей за счет увеличения объема исходной информации, а также учесть при расчетах частоту ежегодного перемерзания рек. В их исследованиях отмечена эффективность его применения в диапазоне ежегодной частоты перемерзания, равной 20 - 80 %, поскольку при частоте явлений менее 20 % и более 80 % точность расчетов существенно снижается.

На примере ряда периодически перемерзающих рек зоны БАМ Серков [1991] показал, что эмпирические кривые можно описывать с помощью смешанной марковской модели, которая представляет собой условную кривую обеспеченности с двумя параметрами – вероятностями перехода из одного состояния в другое. Для расчета статистических параметров кривой распределения им разработан пакет прикладных программ. Положительным аспектом практического применения указанной модели является то, что в отличие от "усеченной" кривой обеспеченности она позволяет учитывать изменчивость зимнего стока во времени.

Следует отметить, что ни одна из рассмотренных аналитических кривых распределения не имеет особых преимуществ. В практических расчетах выбор какой-либо одной из них определяется только тем, насколько хорошо согласуется она с эмпирической кривой обестем.

печенности. Поскольку рассмотренные методы еще не использовались широко для расчетов зимнего стока периодически перемерзающих рек, они требуют апробации в практике подобных исследований. Тем не менее предложенные подходы вполне могут быть использованы и в других районах криолитозоны при соответствующем их обосновании.

При недостаточности данных гидрометрических наблюдений (к ним относятся также данные кратковременных и эпизодических наблюдений) определение расчетных характеристик зимнего стока обычно производится путем приведения коротких рядов к многолетнему периоду по данным рек-аналогов с более длительными рядами наблюдений. В настоящее время существуют разные способы приведения, в монографии они не рассматриваются по двум причинам: вопервых, эти методы детально рассмотрены в научной литературе [3, 130, 134, 166 и др.]; во-вторых, не существует никаких ограничений их применения в областях развития многолетнемерзлых пород.

4.2. Расчет характеристик зимнего стока при отсутствии гидрометрических наблюдений

В практике гидрологических расчетов при отсутствии данных наблюдений для определения обеспеченных значений характеристик зимнего стока применяются метод параметризации и метод переходных коэффициентов. Сравнительный анализ этих методов, выполненный А.М. Владимировым, Ф.А. Имановым и В.М. Саковичем [1994] показал, что метод переходных коэффициентов является не только более простым в практическом использовании, но и более надежным, так как обобщению подлежат всего два параметра: минимальный сток опорной обеспеченности (чаще 80 %-ной) и переходные коэффициенты к значениям расчетной обеспеченности. Поэтому в основу исследований был положен метод переходных коэффициентов, поскольку он наиболее соответствует поставленной задаче.

В качестве основных (опорных) расчетных характеристик зимнего стока использованы их средние многолетние значения как определяемые более точно по сравнению с разными квантилями.

Для определения переходных коэффициентов использованы расчетные зависимости средних многолетних значений характеристик зимнего стока от их обеспеченных значений в диапазоне 75 – 97 %. В соответствии с [40] зависимости строились для районов со сходными природными условиями, при этом учитывалось районирование, осуществленное в главе 3 по условиям истощения и прекращения зимнего стока (см. рис. 3.7). Районы с близкими значениями переходного коэффициента (расхождение до10 %) объединялись и для них устанавливался средний коэффициент.

4.2.1. Расчет сроков и продолжительности зимней межени

Сроки начала и конца зимней межени, как было показано в гл. 3, весьма тесно связаны с климатическими процессами. Климатические условия осени и весны являются определяющими факторами сроков наступления и окончания межени. Для характеристики этих условий используются обычно даты перехода температуры воздуха через 0 °С (\mathcal{A}_0). Поэтому определение сроков начала и конца зимней межени на неизученных реках производится на основе учета прежде всего хода температуры воздуха осенью и весной, а также по отдельным фазам ледового режима реки.

Ледообразование на реках обычно наступает сразу после устойчивого перехода температуры воздуха через ноль в сторону отрицательных значений. Осенью при кратковременном понижении температур воздуха речные воды охладиться до точки кристаллизации не успевают, поэтому появление ледовых образований наблюдается, как правило, только при устойчивых интенсивных похолоданиях и зависит от погодных условий осенне-зимнего сезона. Чем раньше наблюдается переход температуры воздуха через 0 °С осенью, тем раньше наступает зимняя межень. Поздний переход температуры воздуха через 0 °С осенью и весной обусловливает позднее начало и окончание зимнего сезона на реках. Это лишний раз свидетельствует о влиянии интенсивности и характера развития атмосферных процессов на сроки меженного периода. Для исследования выявленной закономерности проанализированы зависимос-

ти сроков начала $Д_{_{\rm H}}$ и конца $Z_{_{\rm K}}$ зимней межени от дат перехода температуры воздуха через 0 °C (рис. 4.2). По характеру зависимос-

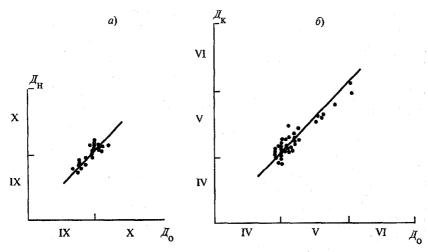


Рис. 4.2. Связь дат начала $\mathcal{A}_{_{\rm H}}$ (a) и конца $\mathcal{A}_{_{\rm K}}$ (δ) зимней межени с датой перехода средней суточной температуры воздуха через 0 °C осенью и весной (Район 5).

тей произведено районирование территории сплошной криолитозоны. Выделено четыре района, границы которых проведены по водоразделам с учетом условий формирования зимнего стока рек (рис. 4.3). Для каждого из выделенных районов получены тесные расчетные связи вида

$$\underline{\Pi}_{\mu} = a \, \underline{\Pi}_{0} + e \,, \tag{4.2}$$

$$\underline{\Pi}_{\kappa} = a\underline{\Pi}_{0} + e.$$
(4.3)

Спедует отметить, что при анализе в качестве \mathcal{A}_{H} , \mathcal{A}_{K} и \mathcal{A}_{0} были использованы не даты, а числа, отсчитываемые от начала сентября или апреля до соответствующих значений средних многолетних дат \mathcal{A}_{0} . Анализ показал, что в равнинных районах связи вида (см. рис. 4.2) проявляются более тесно. В горных районах разброс точек на графиках (до 10 суток и более) связан, по-видимому, с дополнитель-

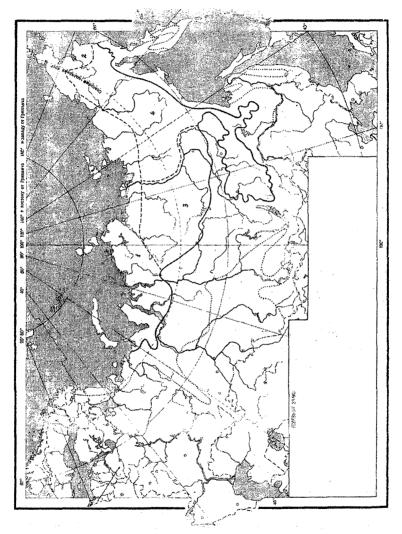


Рис. 4.3. Районы с одинаковыми сроками зимней межени. Условные обозначения см. на рис. 3.7.

ным влиянием факторов подстилающей поверхности (высота местности, густота речной сети и др.).

Среди анализируемых связей наибольший интерес представляют связи, выявленные для рек горных районов и зоны тундры. В этих районах устойчивые отрицательные температуры воздуха, как правило, наступают раньше, поэтому зимняя межень также наступает несколько раньше, чем в равнинных районах. Кроме того, анализ показал, что связь вида (4.2) на реках горных районов отсутствует (коэффициенты корреляции не превышают 0,7). Вероятнее всего, это обусловлено увеличением суровости климатических условий с повышением высоты местности и, как следствие, неоднозначным влиянием этих условий на сроки начала зимней межени.

Среднее отклонение фактических значений $\Pi_{\rm H}$ и $\Pi_{\rm K}$ от определенных по уравнениям (4.2 и 4.3) изменяется от 5 до 15 %.

Таким образом, для определения времени наступления и окончания зимней межени на неизученных реках можно рекомендовать уравнения (4.2) и (4.3). В соответствии с таким подходом начало зимней межени на реках сплошной криолитозоны рекомендуется определять либо по дате перехода температуры воздуха через 0 °С осенью, либо по дате появления на них ледовых образований (см. табл. 3.1), в пределах прерывистой и островной мерзлоты - по дате образования ледяного покрова на реках. Конец зимнего меженного периода на реках всей криолитозоны рекомендуется определять по дате перехода температуры воздуха через 0 °С весной. При этом необходимо учитывать, что в горных районах Байкальской складчатой области в отдельные годы в связи с отсутствием снежного покрова на водосборах наступление весны не сопровождается увеличением расходов воды [100]. Поэтому использование даты перехода температуры воздуха через 0 °C может несколько снизить точность определения конца зимней межени на реках, расположенных в этих районах.

4.2.2. Расчет характеристик зимнего стока ежегодно перемерзающих рек

Расчет ежедневных расходов воды в период их спада. У водопотребителей и водопользователей сложности в водообеспечении возникают, как правило, в зимний меженный период из-за весьма низ-

кой водности рек. Поэтому именно в этот период года для них большое значение имеют данные об ежедневных расходах воды.

Анализ гидрографов показал, что после наступления зимней межени на перемерзающих реках наблюдается постоянный спад расходов воды, интенсивность которого определяется в первую очередь интенсивностью истощения запасов подземных вод. Учет изменения интенсивности этого спада является одним из основных требований к разработке методов расчета ежедневных расходов воды при отсутствии данных наблюдений. По существу ставится задача моделирования гидрографа зимнего стока и решение этой задачи предусматривает, как уже отмечалось, изучение закономерностей спада зимних расходов воды. В разделе метод расчета гидрографа зимнего стока рассмотрен на примере перемерзающих рек Якутии. В основу расчетного метода положена физическая модель процесса истощения и прекращения зимнего речного стока.

Для изучения закономерностей спада зимних расходов воды проанализированы типовые кривые истощения и произведена их аппроксимация по уравнению Буссинеска—Майэ, как наиболее подходящему условиям истощения зимнего стока рек исследуемого региона (см. гл. 3).

При расчетах гидрографа количественным показателем, отражающим изменение интенсивности спада, является коэффициент истощения α. Поэтому для всех типовых кривых спада подсчитаны его значения по формуле

$$\alpha = (\sqrt{Q_0} / Q - 1) / T_{\text{HCT}}$$
 (4.4)

где Q — значение расхода, измеренного в конце гидрографа спада; $T_{\rm ncr}$ — продолжительность периода истощения зимнего стока.

С практической точки зрения, при расчетах коэффициента истощения α для неизученных рек в качестве аргумента можно использовать длину реки как косвенный показатель емкостных характеристик подрусловых таликовых отложений. На рис. 4.4 показана связь коэффициента α с длиной реки L. Приведенная зависимость свидетельствует о наличии тенденции уменьшения коэффициента истощения с увеличением размеров реки. Выявленная закономерность проявляется по-разному $\hat{\mathbf{s}}$ равнинных и горных районах, но в об-

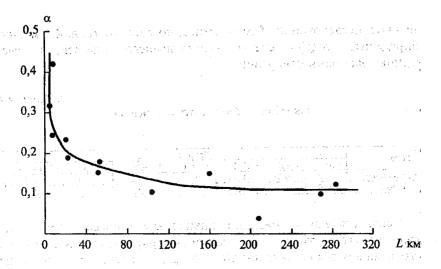


Рис. 4.4. Связь коэффициента истощения α с длиной реки L. (Район 5)

щем случае объясняется большим регулирующим влиянием водовмещающих пород, степень которого возрастает с увеличением размеров реки.

Сопоставление значений коэффициентов истощения стока равнинных и горных рек показало, что для средних рек они не отличаются друг от друга и слабо зависят от размеров реки. Наибольшее расхождение в значениях а наблюдается у малых рек (табл. 4.1). С физической точки зрения эта закономерность подтверждает отмеченное выше регулирующее влияние водоносных пород на условия истощения стока в руслах рек. Кроме того, выявленная закономерность находится в полном соответствии с рассмотренными в главе 3 закономерностями режима истощения и прекращения зимнего стока рек исследуемого региона, заключающимися в том, что в горных районах по мере приближения к истоку реки увеличиваются потери зимнего стока на наледеобразование и в результате малые реки перемерзают раньше, чем в равнинных районах. Разброс отдельных точек вокруг осредняющей линии свидетельствует о вероятном влиянии других факторов, например уклона реки, на условия истощения ее стока в зимний сезон. В целом этот вопрос требует дополнительных исследований. Тем не менее, по данным табл. 4.1 можно определить коэффициент истощения зимнего стока рек, не освещенных данными измерений.

Район	Длина реки L , км							
	<10	10-20	21-50	51-100	101-200	201-300	301-500	
Равнинный	0,35	0,23	0,18	0,15	0,12	0,11	0,10	
Горный	0,50	0,34	0,26	0,19	0,12	0,11	0.10	

Сравнение вычисленных по уравнению Буссинеска – Майэ расходов воды с фактическими показало, что расхождения в значениях стока малых рек составляют 60-80 %. Для средних рек большие расхождения отмечаются примерно в конце периода истощения, когда в русле реки регистрируются весьма малые значения расходов воды. Моделирование гидрографа истощения зимнего стока малых рек по методике Б.Л. Соколова [145] при определении времени перехода рек на подземное питание позволяет несколько улучшить положение. Методика учитывает разность скоростей притока поверхностных и подземных вод к гидрометрическому створу при анализе кривых спада в виде связи $Q_{t+1} = f(Q_t)$ (см. рис. 3.1). Как видно из рисунка, в верхней и нижней частях кривых спада образуются две ветви, отличающиеся друг от друга наклоном и характеризующие приток воды различного генетического происхождения по мере убывания запасов влаги в речном бассейне. Верхняя часть кривой спада соответствует истощению быстростекающей части бассейновых запасов (поверхностный сток, русловые запасы, внутрипочвенный сток, верховодка), нижняя часть - истощению запасов подземных вод. Разброс точек на графиках в нижней части незначительный, что связано с большой зарегулированностью подземных вод. По предложению Б.Л. Соколова, нижнюю ветвь спада, осредняющую совокупность точек, можно представить в первом приближении в виде прямой, проходящей через начало координат графика и аппроксимирующейся уравнением:

Расчеты показали незначительную изменчивость коэффициента α для всех рек Якутии. Так, значения α изменяются от 0,84 до 0,92. Наиболее длительное истощение зимнего стока характерно для рек тундры, для которых значение коэффициента α равно 0,90. Это косвенно подтверждает факт влияния озерности на скорость истощения малых рек зоны тундры, о чем говорилось в гл. 1.

Сравнение вычисленных значений стока малых рек по уравнению прямой с их фактическими значениями дало лучшие результаты, чем по уравнению Буссинеска – Майэ. Анализ показал, что причинами больших расхождений между вычисленными и фактическими значениями расходов воды являются весьма малые значения расходов воды (<1 м³/с), которые регистрируются в гидрометрическом створе в конце периода истощения. Значения ошибок вычисления стока в этот период увеличиваются. Даже небольшие расхождения в расходах, имеющих десятые, сотые и тысячные значения, приводят к существенным погрешностям (более 100 %).

Таким образом, для построения расчетного гидрографа малых рек в качестве модели рекомендуется использовать уравнение прямой линии (4.4), средних рек — уравнение Буссинеска — Майэ. Оценка точности результатов расчета по предлагаемым моделям показала хорошее совпадение ординат расчетного и реального гидрографов зимнего речного стока. Схема расчета гидрографа зимнего стока перемерзающих рек заключается в следующем.

- 1. Определяется район, в котором располагается неизученная река и расчетная формула связей $Q_0 = f(F)$, $T_{\text{ист}} = f(L)$. По известным площади водосбора F и длине реки L по формулам определяются средние многолетние значения Q_0 и $T_{\text{ист}}$.
- 2. Дата начала зимней межени определяется по дате появления ледяных образований на реках-аналогах, при их отсутствии по данным табл. 3.1 или по эмпирическим формулам (4.2) и (4.3).
- 3. Расход воды в начале зимней межени конкретного i -го года $Q_{\circ,i}$ и расчетная продолжительность истощения зимнего стока $T_{\scriptscriptstyle \mathsf{HCT},i}$ определяются по формулам

$$Q_{0i} = k_1 Q_0, (4.6)$$

$$T_{\text{ucr},i} = k_2 T_{\text{ucr}}, \tag{4.7}$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты водности, определяемые по данным рек-аналогов в i –ом году.

4. По известным величинам $Q_{0,i}$ и $T_{\text{ист},i}$ вычисляются ежедневные расходы воды в период их спада на малых реках по формуле (4.5), на средних реках – по уравнению Буссинеска – Майэ.

Расчет характеристик стока ежегодно перемерзающих рек. При использовании рек в качестве источников водоснабжения или при строительстве различных гидротехнических сооружений (дамб, плотин и др.) расчет характеристик зимнего стока перемерзающих рек имеет большое практическое значение. Особенно важны сведения о продолжительности $T_{\rm ист}$ и об объеме истощения $W_{\rm ист}$ зимнего стока, которые косвенно характеризуют достаточность воды в реке в зимний критический по водности период, а также о продолжительности бессточного периода $T_{\rm перио}$ на реках.

Разработка расчетных методов для определения характеристик зимнего стока неизученных рек предусматривает прежде всего изучение влияния на эти характеристики основных физико-географических факторов. В главе 2 было показано, что в областях развития многолетнемерзлых пород основными факторами формирования зимнего стока являются факторы подстилающей поверхности и факторы предшествующего увлажнения водосбора.

Как было показано, факторы подстилающей поверхности (характер рельефа; многолетняя мерзлота, гидрогеологические условия, почвенный и растительный покров, лесистость, озерность и др.) как показатели естественной регулирующей способности водосборов формируют зимнюю водность рек. Их интегральное воздействие на речной сток учтено при районировании территории криолитозоны. Кроме того, при анализе природных условий была показана определяющая роль в формировании зимнего стока гидрогеологического фактора (мощности и водообильности таликовых зон) и фактора высотной поясности. Это определило использование в качестве количественных показателей факторов подстилающей поверхности длину реки и среднюю высоту водосбора.

Известно, что запасы подземных вод в речном бассейне находятся в прямой зависимости от степени общей увлажненности территории. Наиболее благоприятными условиями для формирования зимнего стока являются обильное предзимнее выпадение дождей, обеспечивающее значительное пополнение запасов подземных вод, и мягкие многоснежные зимы, способствующие длительному истощению стока в руслах рек. В тех случаях, когда зимнему меженному периоду предшествует сухая, без дождей летне-осенняя межень, формируется весьма низкая водность рек к началу зимней межени.

Для выявления роли фактора предшествующего увлажнения водосборов в формировании зимней водности рек $W_{\rm ист}$ и определения характера этого влияния проанализированы зависимости $W_{\rm ист}$ от расхода воды $Q_{\rm o}$, при котором река переходит на подземное питание. На рис. 4.5 представлены примеры таких зависимостей, уста-

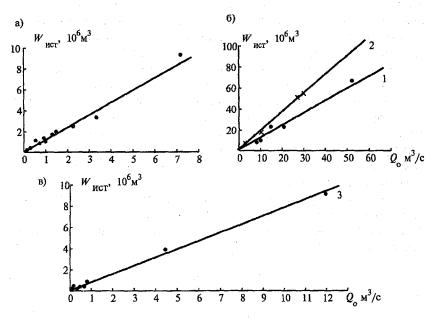


Рис. 4.5. Связь объема истощения $W_{\rm пст}$ с расходом воды в начале зимней межени $Q_{\rm o}$. a – район 5; θ , θ – район 7: 1 – средние реки, 2 – реки с наледностью более 1 %, 3 – малые реки.

новленные для равнинных и горных рек Якутии. Выявленные связи описываются уравнением

$$W_{\text{MCT}} = e Q_0, \qquad (4.8)$$

где *в* – районный параметр, характеризующий условия формирования зимней водности рек.

Средние относительные ошибки определения $W_{\text{ист}}$ по указанной зависимости изменяются от 20 до 57 %. Поэтому полученные зависимости не являются расчетными, но хорошо показывают характер влияния факторов предшествующего увлажнения бассейна на водность рек в период зимней межени.

В главе 3 были установлены зависимости, которые можно использовать для определения продолжительности истощения зимнего стока $T_{\rm ист}$ и продолжительности бессточного периода $T_{\rm пермз}$ на реках при отсутствии данных наблюдений. Особенностью рассматриваемых зависимостей является единство способа оценки $T_{\rm ист}$ и $T_{\rm пермз}$ как для малых, так и для средних рек. По характеру зависимостей (3.4) и (3.5) в пределах сплошной криолитозоны были выделены районы, отличающихся значениями параметров. В каждом выделенном районе средние отклонения эмпирических точек от линий регрессии не превышают 20 %, что позволяет считать данные зависимости пригодными для практического использования в качестве расчетных при отсутствии гидрометрических наблюдений. Это подтверждают расчеты, проведенные с целью проверки указанных зависимостей на независимом материале.

В практике строительного проектирования используются значения гидрологических характеристик обеспеченностью 75-97%, характеризующие наиболее критические маловодные годы. Расчет обеспеченных значений $W_{\rm ист}$, $T_{\rm пермз}$ производится по формулам

$$W_{\text{HCT, p}} = \lambda_{\text{p}} W_{\text{HCT}}, \tag{4.9}$$

$$T_{_{\text{ИСТ, p}}} = \lambda_{_{\text{p}}} T_{_{\text{ИСТ}}}, \tag{4.10}$$

$$T_{\text{перм3, p}} = \lambda_{\text{p}} T_{\text{перм3}}, \tag{4.11}$$

где $\lambda_{\rm p}$ – коэффициент перехода от средних многолетних значений $W_{\rm ист}, T_{\rm ист}, T_{\rm пермз}$ к значениям расчетной обеспеченности.

При территориальном обобщении коэффициентов λ_p А.М. Владимиров установил, что на переходный коэффициент влияют два фактора: водность территории и изменчивость стока в рассматриваемой зоне обеспеченностей. В данной работе проверка этого положения выполнена на примере рек Якутии. Частично результаты анализа были опубликованы в [14].

Как показывают исследования, выполненные по территории Якутии, изменчивость коэффициента λ_p зависит в основном от годовых запасов влаги в речном бассейне к началу зимней межени.

Реки Якутии имеют своеобразный режим стока в предзимний период, определяемый участием в их питании вод различного генезиса. Сток рек горных районов формируется не только подземными водами, но и водами наледей, а также поверхностными водами, образующимися за счет выпадения частых дождей. Это, по-видимому, является причиной того, что диапазон изменений значений $W_{\rm ust}$ на реках равнинного района по сравнению с реками горного района значительно меньше. В горных районах Якутии коэффициенты изменчивости $W_{\text{ист}}$ оказались высокими (от 0,3 до 3,7), значения коэффициента $\lambda_{_{D}}$ изменяются от 0,03 до 0,7 для соответствующей обеспеченности. Оказалось, что определяющую роль здесь играет средняя высота бассейна H_{co} . Для количественной оценки влияния высотной поясности проанализирована связь $\lambda_{\rm p}=f(H_{\rm cp})$. Анализ показал снижение коэффициентов перехода д с увеличением средней высоты водосбора. Эта закономерность является отражением хорошо известной закономерности усиления суровости климатических и мерзлотно-гидрогеологических условий с высотой местности. Чем выше расположен бассейн реки, тем в более суровых условиях формируется водность рек в зимний сезон, тем ниже значение $W_{\scriptscriptstyle \mathrm{ner}}$. Аналитическое выражение полученной зависимости имеет вид:

$$\lambda_{\rm p} = c - dH_{\rm cp} \,. \tag{4.12}$$

Среднее отклонение вычисленных по уравнению значений $\lambda_{\rm p}$ от фактических изменяется от 23 до 30 %. В двух случаях (в диапазоне обеспеченностей 90 – 95 %) ошибка оценки $\lambda_{\rm p}$ достигает 60 %. На

возможность появления больших ошибок в этом диапазоне указывал А.М. Владимиров в своих исследованиях. Это связано обычно с резким ухудшением условий подземного питания рек в самые маловодные годы.

Таким образом, характер рельефа оказывает существенное влияние на водность рек и объем стока в начале зимней межени. Связь (4.12) можно использовать для вычисления коэффициентов $\lambda_{\rm p}$ при определении обеспеченных величин $W_{\rm ист}$ неизученных горных рек. В равнинных районах переходные коэффициенты в диапазоне расчетных обеспеченностей изменяются от 0,036 до 0,38.

При изучении распределения по территории переходных коэффициентов А.М. Владимировым была установлена весьма высокая территориальная устойчивость коэффициентов $\lambda_{\rm p}$ для всех рек. Согласно его исследованиям, это объясняется слабой изменчивостью минимального стока в маловодные годы: чем он меньше меняется по территории, тем устойчивее коэффициент $\lambda_{\rm p}$. Результаты аналогичного анализа, выполненного автором в отношении $T_{\rm ист}$ и $T_{\rm перм}$, подтвердили его выводы. Так, сопоставление значений переходных коэффициентов $\lambda_{\rm p}$ показало, что для отдельных выделенных районов они весьма близки между собой, наибольшее расхождение составляет 20 %. В качестве примера в табл. 4.2 приведены значения коэффициентов перехода $\lambda_{\rm p}$ для расчета $T_{\rm перм}$, различной обеспеченности.

В районах распространения многолетнемерзлых пород значительный интерес представляет исследование влияния наледей на процессы истощения и прекращения стока рек зимой. Вопросы количественной оценки влияния наледей на расчетные характеристики стока перемерзающих рек до настоящего времени практически не исследованы, основное внимание уделялось уточнению представлений об участии наледей в формировании зимнего речного стока и разработке методов расчета потерь воды на образование наледей. В разделе приведены результаты решения этой задачи на примере бассейнов рек Яны и Индигирки, для которых характерны сплошная многолетняя мерзлота, резко расчлененный рельеф, глубокое промерзание гидрогеологических структур, активные неотектонические движения и широкое распространение наледей, в том числе и гигантских. По данным О.Н. Толстихина, в пределах этих бассейнов еже-

годно формируются тысячи наледей, их суммарная площадь превышает 2500 км², что составляет примерно половину суммарной площади наледей Северо-Востока. Наиболее высокой наледностью (до 3 %) отличаются бассейны рек Агаякана, Куйдусуна, Сунтара. Основная цель исследования заключается в оценке влияния наледей на водность рек $W_{\rm ист}$, продолжительность истощения зимнего стока $T_{\rm ист}$ и продолжительность перемерзания рек $T_{\rm пермз}$. В анализе в качестве основного расчетного параметра принята относительная наледность речных бассейнов $f_{\rm n}$ (в %), отражающая степень распространения наледей в том или ином бассейне.

Номер района по рис. 3.7	Обеспеченность, %						
Homep punota no prie. 3.7	75	80	90	95	97		
Равнинные районы:			T -				
1, 2, 3	0,84	0,81	0,73	0,68	0,64		
4, 5	0,91	0,89	0,83	0,79	0,76		
Горные районы:							
7	0,91	0,89	0,83	0,79	0,76		
8, 9, 10	0,89	0,87	0,81	0,76	0,73		

Для определения f_n использованы кадастровые сведения о наледности участков рек и карта наледей Северо-Востока СССР, составленная А.С. Симаковым и З.Г. Шильниковской. Результаты обобщения этих сведений показали, что наледность речных бассейнов в большинстве случаев имеет небольшие значения (до 1 %). Наледность выше 1 % отмечена лишь в отдельных бассейнах. Малые значения наледности рассматриваемой территории объясняются тем, что основное количество (80-90 %) составляют наледи с площадью поверхности менее 1 км² [1, 142, 156].

Общее представление о влиянии наледей можно составить по рис. 3.8, 3.9 и 4.5, построенным по данным рек с различной наледностью и расположенных в однородных физико-географических условиях. Анализ приведенных зависимостей показывает, что существенная разница в расчетных характеристиках отмечается лишь на водосбо-

рах с наледностью выше 1 %. Полученный вывод подтверждает группировка точек на графиках. Установлено, что при прочих равных условиях продолжительность истощения расходов воды выше у водосборов с наледностью более 1 %, а закономерность истощения у рек с меньшей наледностью и у безналедных рек не отличается друг от друга. У таких рек наблюдается более высокая зимняя водность, соответственно позднее перемерзание и промерзание и более короткая продолжительность бессточного периода. Следует отметить, что полученные зависимости не являются расчетными в связи со значительным разбросом точек, но хорошо показывают выявленные закономерности. Анализ причин установленных закономерностей показал следующее.

Согласно современным представлениям, наледи являются показателем своеобразного проявления подземных вод в условиях глубокой промороженности гидрогеологических структур. Формирование многочисленных и крупных наледей в речных бассейнах указывает на то, что реки получают устойчивое подземное питание из подмерзлотных водоносных горизонтов. Это положение подтверждается многочисленными данными гидрогеологических и геокриологических исследований [50-52]. Например, по данным О.Н. Толстихина, наибольшее число наледей приурочено к тектонически активным областям, для которых характерен интенсивный водообмен между поверхностными и подземными водами по разрывным нарушениям. Его исследования показали, что устойчивые крупные наледи площадью от 0,1 до 2,5 км² формируются в верховьях рек лишь при наличии выходов подмерзлотных вод. Аналогичный вывод был получен ранее А.М. Догановским [1969]. По его данным наличие наледей в руслах рек с площадями водосборов менее 5000 км² (бассейн р. Яны) и менее 1700 км² (бассейн р. Индигирки) свидетельствует о том, что питание этих наледей осуществляется за счет подмерзлотных вод, поскольку меньшие водосборы не обеспечивают достаточных запасов воды для их формирования.

Выше было отмечено, что степень распространения наледей в речном бассейне косвенно характеризует относительная наледность f_n . Следовательно, высокие значения f_n , не только отражают широкое распространение наледей в речном бассейне, но и свидетельствуют о значительном участии в питании наледей и рек подземных вод глу-

бокого стока по сквозным таликам или тектоническим разломам. Поэтому чем больше наледей на водосборе и чем они крупнее, тем больше подземный сток в реки и тем выше зимний меженный сток. Именно поэтому реки с наледностью $f_n > 1$ % перемерзают позднее по сравнению с безналедными реками.

Таким образом, изложенное позволяет сделать вывод о заметной роли наледей подземных вод в режиме стока рек криолитозоны. Гидрологическая роль наледей подземных вод заключается в том, что спад зимних расходов воды растягивается, поэтому реки перемерзают в более поздние сроки. Это связано с тем, что реки, в бассейнах которых развиты наледи подземных вод, получают устойчивое подземное питание из подмерзлотных водоносных горизонтов. Следует подчеркнуть, что полученный вывод не является бесспорным, поскольку рассмотренные результаты носят предварительный характер и требуют дополнительных исследований из-за ограниченности сведений о наледях. В настоящее время на сети станций и постов массовые режимные наблюдения за наледями не проводятся, поэтому материалы об их распространении отсутствуют.

4.2.3. Расчет характеристик зимнего стока периодически перемерзающих рек

На территории сплошной криолитозоны реки с длиной от 500 до 800 км перемерзают эпизодически. Исследование условий и закономерностей формирования зимнего стока эпизодически перемерзающих рек показало, что в годы с перемерзанием процессы истощения и прекращения речного стока происходят по тем же закономерностям, что и у ежегодно перемерзающих рек. Поэтому в зависимости от развития синоптических процессов осенне-зимнего сезона и запасов подземных вод в речном бассейне к началу зимней межени возможны два варианта расчета:

- 1) в случае перемерзания неизученной реки используются методы расчета как для ежегодно перемерзающей реки;
- 2) в случае, когда на реке наблюдается устойчивый речной сток в течение всего зимнего меженного периода, используются методы расчета как для не перемерзающих рек.

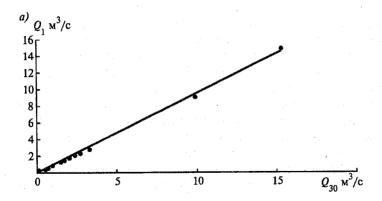
В обоих случаях для расчета основных характеристик зимнего стока в качестве основного расчетного метода рекомендуется метод гидрологической аналогии. При выборе рек-аналогов рекомендуется их подбирать в пределах районов, показанных на рис. 3.7. В однородном районе, где располагается неизученная река, находят реку-аналог с длинным рядом наблюдений, согласно общим требованиям, предъявляемым при выборе аналога.

Для проверки правильного выбора аналога рекомендуется производить расчет по двум-трем смежным бассейнам и принимать среднее значение расчетных характеристик. Если значения расчетных характеристик, определенных по рекам-аналогам, существенно различаются (более чем на 20%), рекомендуется их уточнение по районным расчетным зависимостям (4.8-4.17). В случае отсутствия надежных рек-аналогов расчетные характеристики зимнего стока рекомендуется определять по эмпирическим формулам, параметры которых районированы.

Расчет обеспеченных значений характеристик стока производится также одним из двух способов: методом гидрологической аналогии или по эмпирическим формулам с помощью переходных коэффициентов. При применении метода аналогии вероятные значения анализируемых характеристик и повторяемость перемерзания принимаются такими же, как у аналога.

На территории прерывистой и островной криолитозоны перемерзание рек наблюдается не каждый год. Более благоприятные условия подземного питания рек способствуют тому, что в пределах этих зон периодически перемерзают реки с меньшими размерами, чем на территории сплошной криолитозоны.

Частота перемерзания P рек зависит от многих факторов: погодных условий осенне-зимнего периода; количества осадков, выпавших за летне-осенний сезон; запасов воды в бассейне к началу зимней межени; площади и средней высоты речного бассейна, уклона реки, озерности, наледности и др. Среди факторов, определяющих частоту перемерзания, необходимо отметить в первую очередь климатические факторы и бассейновое регулирование стока, влияние которого возрастает с увеличением размеров реки. Аналитическое подтверждение характера влияния этих факторов на частоту перемерзания приведено в [131], в котором значение P для неизу-



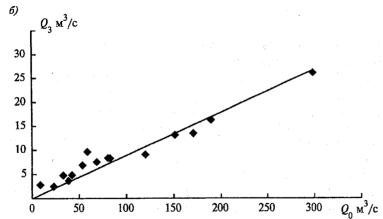


Рис. 4.6. Связь минимальных зимних среднесуточных расходов воды Q_1 с минимальными 30-суточными расходами воды $Q_{30}(a)$ и зимнего меженного стока Q_3 с расходами воды в начале зимней межени Q_0 (б). (Районы 8, 9,).

ченной реки рекомендуется определять в зависимости от площади водосбора и минимального летне-осеннего стока 80 %-ной обеспеченности. В этой работе в качестве косвенного показателя климатических факторов принят минимальный летне-осенний сток. Установлено, что частота перемерзания рек снижается с увеличением их размеров и с повышением предшествующего увлажнения водосбора.

Таким образом, результатом выполненных исследований в [131] является методика расчета основных характеристик периодически перемерзающих рек бассейнов Лены, Амура и оз. Байкал при отсутствии данных наблюдений. Расчет частоты P и продолжительности $T_{\text{пер}}$ перемерзания производится в каждом однородном районе на основе их связи с площадью водосбора изучаемой реки, минимальным 30-суточным летне-осенним стоком 80 %-ной обеспеченности, определяемым по карте. Следует отметить, что рассмотренная методика позволяет достаточно надежно оценить характеристики перемерзания неизученных рек, поэтому общий подход, использованный при разработке метода, вполне может быть применен и в других районах исследуемого региона.

4.2.4. Расчет характеристик зимнего стока не перемерзающих рек

На территории криолитозоны устойчивый зимний сток наблюдается на реках длиной более 700 – 800 км и площадью водосбора выше 50 – 75 тыс. км², т. е. на больших реках, дренирующих глубокие межмерзлотные и подмерзлотные подземные воды. Малые и средние реки, русла которых расположены в толще многолетнемерзлых пород, перемерзают в самом начале зимней межени. Только из-за наличия местных особенностей речных бассейнов (тектоническая трещиноватость, карстовые явления), а также более мягких климатических условий зимы длительный устойчивый сток может наблюдаться на малых и средних реках. Поэтому данные, положенные в основу анализа зимнего стока, являются весьма ограниченными.

В анализе использованы данные наблюдений на 25 гидрометрических пунктах с периодом наблюдений от 9 до 61 года. Из них 18 рядов имеют продолжительность более 20 лет. Площади водосборов рек изменяются от 12,1 до 50 100 км². Большинство гидрометрических пунктов расположены на реках горных районов Северо-Востока (20 пунктов), часть — в районах влияния Атлантического океана (четыре пункта). В качестве характеристик зимнего стока в анализ включены минимальные и меженные расходы воды, минимальные средние 10-суточные, декадные и наименьшие суточные значения расходов воды в пределах выбранной декады.

С помощью статистических критериев ряды с периодом наблюдений более 20 лет исследованы на случайность и независимость их формирования, стационарность и внутрирядную связанность. При этом в качестве основной анализируемой характеристики зимнего стока использовался минимальный 30-суточный расход воды.

Анализ результатов расчета показал, что 39 % рядов зимнего стока (семь пунктов) не отвечают условию случайности при 5 %-ном уровне значимости. В результате проверки гипотезы об однородности данных оказалось, что из всех анализируемых рек четыре ряда являются нестационарными по средним и два ряда — по дисперсиям при $\alpha = 5$ %.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для большинства рек ряды зимнего стока являются однородными совокупностями, состоящими из случайных и независимых величин. Однако имеется группа рек, для которых гипотезы об однородности и случайности опровергаются. Так, из семи рек три расположены в районах влияния Атлантического океана (Северный край). Представляется, что основной причиной неслучайности рядов, а также их повышенной внутрирядной связанности является то, что зимний сток этих рек формируется главным образом за счет глубоких подмерзлотных вод, характеризующихся значительной инерцией во времени.

Для анализа синхронности колебаний минимального зимнего стока рек была рассчитана корреляционная матрица. Сущность анализа заключалась в том, что пункты, у которых коэффициенты корреляции между рядами стока были больше некоторого заданного значения, объединялись бы в одну территориальную совокупность. Согласно [132], при выделении районов учитываются пункты с коэффициентами корреляции выше 0,5. При анализе корреляционной матрицы дополнительно привлекались интегрально-разностные кривые.

Пространственный корреляционный анализ не позволил выделить на территории криолитозоны какие-либо районы с синхронными колебаниями минимального зимнего стока прежде всего из-за малого числа гидрометрических пунктов. Тем не менее было установлено, что на реках Северного края наблюдаются достаточно высокие значения коэффициентов корреляции (от 0,58 до 0,75), показывающие общность их природных условий и свидетельствующие о достаточно

высокой степени синхронности колебаний зимнего стока этих рек. Аналогичный вывод был получен для рек верховьев Колымы.

Лля изучения закономерностей формирования зимнего стока рек криолитозоны выполнен анализ влияния на минимальный 30-суточный сток (в расходах воды Q_{30} и модулях стока q_{30}) основных опрелеляющих его факторов: показателей увлажненности (осадков теплого периода p, расхода воды в начале зимней межени Q_{a} , за предшествующие три летне-осенних месяца $Q_{7,0}$ и за каждый летнеосенний месяц Q_{7} Q_{8} , Q_{9}), мерзлотно-гидрогеологических условий $(длины \ реки \ L)$, морфометрических особенностей водосбора (густоты речной сети g, площади речного бассейна F) – с помощью метода парной корреляции. Согласно исследованиям А.М. Владимирова, применение метода множественной корреляции при анализе закономерностей изменения минимального стока приводит к тому, что стоковые характеристики подавляют своим весом (вкладом) остальные факторы, не позволяя, таким образом, вскрыть физическую сущность этих закономерностей. По этой причине метод множественной корреляции в анализе не использовался. В результате расчетов установлено, что наиболее тесные связи, имеющие расчетный характер, существуют с показателями предшествующей увлажненности. причем полученные связи являются едиными для малых и средних рек. Выявленные связи описываются уравнениями

$$Q_{30} = aQ_0, (4.13)$$

$$Q_{30} = bQ_8 \,, \tag{4.14}$$

где Q_8 — средний месячный расход воды за август, м³/с; a и b — районные параметры, характеризующие условия формирования минимального зимнего стока рек.

Известно, что если в относительно однородном гидрологическом районе существует зависимость минимального стока от определяющих его факторов, то зависимости аналогичной структуры могут быть получены и для других характеристик низкого стока [40, 41]. С учетом этого обстоятельства, был выполнен анализ зависимостей, аналогичных выражениям (4.13) и (4.14).

Аналитические выражения зависимостей имеют следующий вид:

$$Q_3 = cQ_0, (4.15)$$

$$Q_3 = dQ_8$$
, (4.16)
 $Q_1 = kQ_0$, (4.17)

$$Q_1 = kQ_0, (4.17)$$

где Q_3 – средний меженный зимний расход воды, м³/с; Q_1 – минимальный средний суточный зимний расход воды, m^3/c ; c, k и d – районные параметры, характеризующие условия формирования меженного и минимального стока рек.

По результатам анализа в пределах сплошной криолитозоны выделено два района, отличающихся значениями параметров. Границы первого района совпадают с границами районов 1 и 2 (см. рис. 3.7), второго - с границами районов 8 и 9.

В пределах однородных районов установлены зависимости расчетных характеристик зимнего меженного стока от расходов воды $Q_{\rm o}$ и минимальных 30-, 10-ти и суточных расходов воды. На рис. 4.6 показаны примеры этих зависимостей для районов 8 и 9. Аналитические выражения зависимостей имеют в большинстве случаев прямолинейный вид.

Оценка точности расчетов по уравнениям произведена как по зависимым, так и по независимым данным. В анализе использовались данные наблюдений на 12 реках с периодом наблюдений от 2 до 27 лет. Расчеты показали, что средние относительные погрешности расчетов в большинстве случаев не превышают 30 %.

Комплексный анализ статистической структуры рядов зимнего стока позволяет обоснованно выбрать теоретическую функцию для описания их многолетней изменчивости. С этой целью был выполнен анализ эмпирических кривых распределения вероятностей превышения исследуемых характеристик и осуществлена оценка их сотрехпараметрическому гамма-распределению. ответствия кривые строились для рек, у которых период на-Эмпирические блюдений составляет 20 лет и более. В результате анализа было установлено, что трехпараметрическое гамма-распределение более точно описывает эмпирические кривые по сравнению с другими законами распределения.

По результатам расчета параметров теоретической кривой обеспеченности определены переходные коэффициенты для расчета зимних расходов воды низкой обеспеченности (табл. 4.3). Данные таблицы могут быть использованы для определения расчетных характеристик зимнего стока неизученных рек в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород.

В практике гидрологических расчетов для обоснования сельско-хозяйственного водоснабжения и водопользования в качестве основной характеристики нередко используются данные о минимальных средних 10-суточных расходах воды Q_{10} . Поэтому для всех рек значения Q_{10} определялись как наименьшие за 10 суток и декаду. Сопоставление минимальных зимних расходов, рассчитанных за 10 суток и декаду, показало, что они практически не отличаются и наибольшее расхождение между ними составляет около 5%. Аналогичный вывод получен при сравнении минимальных средних суточных и наименьших за декаду зимних расходов воды. Поэтому при массовых расчетах, выполняемых с помощью 3BM, могут использоваться наименьшие средние декадные и наименьшие за декаду средние суточные значения зимних расходов воды, что значительно упростит обработку исходных данных.

Таблица 4.3

Коэффициенты перехода $\lambda_{\rm p}$ для расчета $Q_{\rm 30}$ различной обеспеченности

Haven news are now 2.7	Обеспеченность, %						
Номер района по рис. 3.7	- 75	80	90	95	97		
1.2	0,65	0,59	0,44	0,35	0,30		
8. 9	0,59	0,53	0,40	0,32	0,28		

Таким образом, результатом выполненных исследований являются методы и приемы расчета характеристик зимнего стока при различном объеме исходной информации о режиме рек сплошной криолитозоны. Расчетные методы основаны на связи характерис-

тик зимнего стока с показателями запасов подземных вод, заключенных в таликовых зонах речных долин, предшествующей увлажненности водосборов и высотной поясности. В пределах однородных районов схема расчета стоковых характеристик зимней межени при отсутствии данных наблюдений заключается в определении их средних многолетних значений и определении обеспеченных значений стока с помощью переходных коэффициентов. Результаты оценки точности расчетов по разработанным методам показали приемлемую для практики точность расчетных значений стока рек в зимнюю межень.

Влияние хозяйственной деятельности и изменений климата на зимний сток рек криолитозоны

Рациональное использование водных ресурсов требует надежного учета и изучения их изменения под влиянием как естественных, так и антропогенных факторов. Начиная с 60-х годов XX в. научная общественность многих стран мира, в т. ч. и России, стала уделять все большее внимание изучению влияния хозяйственной деятельности и изменения климата на водные ресурсы и режим рек. В настоящее время накоплена общирная литература по указанной проблеме, имеются определенные достижения по разработке методов оценки и прогноза водных ресурсов и их изменений под влиянием хозяйственной деятельности и изменения климата. Большой вклад в изучение проблемы внесли И.А. Шикломанов, М.И. Будыко и др. Однако следует отметить, что исследования антропогенного воздействия на водные объекты велись в основном в глобальном аспекте, главное внимание уделялось годовому стоку больших и крупных рек.

Количество работ, посвященных вопросам влияния хозяйственной деятельности и изменений климата на зимний сток рек мерзлой зоны, весьма невелико. Практически отсутствуют работы, связанные с исследованиями изменений характеристик перемерзания рек. Слабое состояние изученности проблемы объясняется тем, что количественная оценка влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы была начата по существу только в последние 20 — 30 лет в связи с ухудшением экологического состояния окружающей среды. Поэтому исследования стока рек зимой проводились в основном в отдельных районах криолитозоны, что объясняется также особенностями размещения и развития производительных сил в северных районах. Так, на примере рек бассейна Енисея А.И. Шикломанов [170, 171] выполнил оценку возможного изменения зимнего стока р. Енисея в результате влияния хозяйственной деятельности и

потепления глобального климата. Б.Л. Соколов [143] показал возможные изменения речного стока при различных нарушениях режима подземных вод. Имеются отдельные работы по Сибири [57, 76], Якутии [17], зоне БАМ [58] и др.

Анализ выполненных исследований, а также исследования автора позволяют в общих чертах обобщить имеющиеся сведения о влиянии хозяйственной деятельности и изменений климата на зимний сток рек криолитозоны.

5.1. Краткий анализ хозяйственного освоения территории криолитозоны и особенности использования водных ресурсов региона

Суровые климатические и мерзлотно-гидрогеологические условия территории распространения многолетнемерзлых пород накладывают существенный отпечаток не только на природные процессы, но и на хозяйственную деятельность, что предопределяет возникновение ряда особенностей в освоении и размещении производительных сил Сибири и Дальнего Востока, а также в характере влияния самих антропогенных факторов. К их числу относятся следующие.

- 1. "Пионерный" характер освоения производительных сил (слабая мощность баз строительной индустрии, сложность завоза материалов и оборудования и др.).
- 2. "Очаговое", или локальное, размещение производительных сил, вызванное тем обстоятельством, что в условиях, крайне неблагоприятных для освоения, в эксплуатацию вовлекаются только наиболее богатые месторождения дефицитных в стране полезных ископаемых, на базе которых формируются самостоятельные промышленные зоны и комплексы (рудники, прииски, горно-обогатительные комбинаты).
- 3. Разреженность, малолюдность населенных пунктов и небольшая плотность населения (например, по территории Якутии населенные пункты распределены крайне неравномерно: наибольшая плотность населения отмечается в Центральной Якутии (80 человек на 100 км²), наименьшая — в тундровой зоне (8 человек на 100 км²).

- 4. Сезонный характер горнорудных разработок. Из-за неблагоприятных условий (низкие температуры воздуха, туманы, темные полярные ночи и др.) многие горнодобывающие предприятия ведут разработку месторождений главным образом в короткий летний период, а зимой горно-подготовительные и вскрышные работы.
- 5. Территория криолитозоны относится к тем регионам, для которых характерны формирование и развитие специфических, опасных и особо опасных природных явлений (катастрофические паводки и наводнения, наледи, сели и снежные лавины, перемерзание рек). Это в свою очередь предъявляет особые требования при освоении и размещении производительных сил региона. Кроме того, необходимо учитывать то обстоятельство, что при хозяйственном освоении региона его специфические природно-климатические условия определяют повышенную ранимость природы, а также длительность и сложность ее восстановления. Поэтому при эксплуатации действующих и в особенности при проектировании и размещении новых промышленных объектов и населенных пунктов, необходимо использовать наиболее совершенные технологические схемы, предусматривающие оборотное водоснабжение, минимальный сброс сточных вод, доочистку сбросных вод и т. д.
- 6. Нарушения режима речного стока зимой связаны с водозабором подземных вод для водоснабжения населенных пунктов и промышленных объектов, горными работами, строительством автомобильных и железных дорог, нефте- и газопроводов. Эти виды хозяйственной деятельности приводят обычно к локальным нарушениям подземного стока в реки, поскольку наличие многолетнемерзлых пород ограничивает их распространение.
- 7. Опыт использования водных ресурсов рек мерзлой зоны свидетельствует о том, что процессы естественного самоочищения водотоков региона протекают значительно медленнее, чем вне этой зоны. Низкие температуры воздуха и воды, незначительное количество илистых отложений в водотоках, слабая биологическая активность речных вод способствуют снижению процесса их самоочищения, поэтому сброс промышленных, коммунально-бытовых и сельскохозяйственных вод приводит к тому, что влияние загрязненных речных вод распространяется по длине реки на существенно большее расстояние по сравнению с реками, расположенными вне

мерзлой зоны. Особенно сильное загрязнение русловых и подрусловых вод происходит в период зимней межени, когда сброс сточных вод в сочетании с низким стоком затрудняет водоснабжение и создается реальная угроза загрязнению водоисточников выше допустимых нормативов. По данным Г.И. Погодаева [1991], основную опасность для рек региона представляют органические вещества (фенолы, лигнин, метанол и др.), сбрасываемые со сточными водами деревообрабатывающей, нефтеперерабатывающей, пищевой и химической промышленности и заводами по химической обработке сельскохозяйственного сырья. Например, максимальная концентрация фенола в воде рек Амура, Тынды, Уссури, Хора, Тунгуски обнаружена в 2 – 3 % отобранных проб (0,030 – 0,087 мг/л), а содержание метилового спирта составляет 20 – 80 мг/л, в то время как предельно допустимая концентрация (ПДК) метанола не должна превышать 0,1–3,0 мг/л в зависимости от вида водопользования.

Таким образом, хозяйственное освоение территории криолитозоны имеет специфические особенности, отражающиеся на использовании водных ресурсов рек региона. В целом территория криолитозоны относится к регионам с избыточным увлажнением. Тем не менее, из-за крайне неравномерного пространственного и внутригодового распределения речного стока возникают значительные трудности с использованием водных ресурсов. Особенности использования водных ресурсов рассмотрим на примере Дальневосточного экономического района (ДВЭР), занимающего около 57 % территории криолитозоны.

Средний многолетний сток рек Дальневосточного экономического района составляет 1540 км³, или 32 % общего стока рек бывшего СССР [23]. По удельной водоносности рек ДВЭР занимает третье место, а по водообеспеченности на одного жителя – первое место в России – 252 тыс. м³/год (табл. 5.1).

Водные ресурсы рек Дальневосточного экономического района России, км3

		Приток вод				Удельная	Удельная
Административные единицы	Пло- щадь, тыс. км ²	общий	из-за рубежа	Мест- ный сток	Отток вод	водонос- ность, тыс. м ³ /км ²	водообес- печенность, тыс. м ³ /год на 1жителя
Приморский край	165	1,2	9,2	37	46,2	223	18,5
Якутия	3100	329		551	880	178	638
Магаданская обл.	1200	3,38		315	318	252	633
Амурская обл.	364	82,4	17,6	88,6	. 171	244	939
Хабаровский край	825	247	63,4	257	504	312	162
Еврейская авт. обл.	36	211		7,0	218	194	36,3
Сахалинская обл.	87,1	-		57,1	57,1	656	92,4
Камчатская обл.	472	2,6		233	236	494	605
Корякская авт. обл.	302	15,5		114	129	377	3250
ДВЭР	6220	273	90,2	1540	1810	247	252

Водные ресурсы рек ДВЭР широко используются в различных отраслях народного хозяйства. Крупнейшими водопотребителями являются горнодобывающие предприятия, металлургическое производство, тепловая энергетика. В последние годы увеличивается потребление воды на коммунально-бытовые нужды. Возрастает роль гидроэнергетики, рыбного хозяйства, водного транспорта.

В целом на территории ДВЭР забор воды на различные хозяйственные нужды составляет более 3,5 км³/год, сброс — не более 2,5 км³/год. Наибольшие объемы воды забираются в Хабаровском и Приморском краях — более 0,8 км³/год, на остальной территории забор воды из рек невелик. Незначительны также объемы сбрасываемых вод и безвозвратных потерь стока. Несмотря на малые значения объемов забираемых и сбрасываемых вод, влияние хозяйственной деятельности человека на режим и сток рек в зимний маловодный период может быть весьма существенным.

Во-первых, резкое уменьшение и без того низкого зимнего стока, а тем более его прекращение в результате антропогенного воздействия довольно часто создает критическую ситуацию с водоснабжением городов и населенных пунктов, энергетики, а также для условия существования гидробионтов. Следует при этом отметить, что ситуация резко обостряется при образовании "искусственных" (тех-

ногенных) наледей и полыней, сформировавшихся в результате вмешательства человека. Установлено, что по особенностям своего воздействия и внезапности развития наледи, в т. ч. и техногенные, относятся к разряду особо опасных гидрологических явлений [1, 143]. Они вызывают деформацию гидротехнических сооружений в руслах рек, усложняют работу транспортно-энергетических систем, организацию водоснабжения и т.д.

Во-вторых, при сбросах промышленных, коммунально-бытовых и сельскохозяйственных вод происходит ухудшение качества речных вод. Например, сбросы чистых вод на территории ДВЭР составляют лишь 33 % от общих сбросов вод, а на территориях Магаданской области и Республики Саха (Якутия) они снижаются до 9 -30 %. По данным Н.А. Правошинского [1991], в водоемы и водотоки бассейна р. Амура сбрасывают более 1 км³ сточных вод, из которых 45% недостаточно или совершенно не очищены. При этом наибольшее количество загрязненных сточных вод сбрасывают предприятия жилищно-коммунального хозяйства (84%). В результате зимой на большинстве рек ухудшился кислородный режим и возросла концентрация загрязняющих веществ. По его оценкам, с 1969 по 1985 г. концентрация кислорода в р. Шилке снизилась до 3,5 мг/л, в р. Аргуни – до 2,8 мг/л, в р. Ингоде – до 1,7 мг/л. Недостаток кислорода ощущается также в водах рек Селемджы, Тынды, Зеи, Амгуни, Амура, Тунгуски и др. В Хабаровском крае, где основными водопотребителями являются промышленные предприятия, реки устойчиво загрязнены медью, фенолами, цинком. В зимнюю межень на многих реках бассейна Амура концентрация загрязняющих веществ, относящихся к группе с токсикологическим и рыбохозяйственным показателем вредности, значительно превышает ПДК. Отдельные примеры экстремально высокого уровня загрязненности в период зимней межени приводят В.И. Бабкин и Т.Е. Григоркина [1991]. Например, 9 марта 1982 г. на р. Охинке у г. Оха концентрация нефтепродуктов в воде составила 2840 ПДК, 20 сентября того же года концентрация соединений меди – 182 ПДК.

Таким образом, наибольшие затруднения в использовании водных ресурсов рек криолитозоны создаются в зимний маловодный период года, поэтому необходимо еще раз подчеркнуть, что разработка методов расчета зимнего стока приобретает особую актуаль-

ность и большой научный и практический интерес в пределах исследуемого региона.

5.2. Основные антропогенные факторы, определяющие зимний сток рек

По характеру воздействия на гидрологические процессы факторы хозяйственной деятельности делятся на две группы [44, 172, 173]:

- 1) оказывающие влияние в русле реки (сооружение плотин и создание водохранилищ, водопотребление и водоотведение, горные работы, эксплуатация подземных вод для водоснабжения населенных пунктов и промышленных объектов, добычи соли и др. целей);
- 2) оказывающие основное влияние на условия формирования стока на речных бассейнах (урбанизация, мелиорация земель, агротехнические мероприятия, рекультивация и др.).

Исследования последних лет показали, что непосредственное влияние на режим речного стока в период зимней межени оказывают лишь факторы первой группы. Выше было отмечено, что водность рек в этот период зависит от режима подземных вод в подрусловых таликовых зонах и интенсивности их сработки. Поэтому нарушения режима подрусловых вод, связанные с такими видами хозяйственной деятельности, как сооружение плотин и создание водохранилищ, водопотребление и водоотведение, горные работы, эксплуатация подземных вод, приводят к изменению водного режима рек зимой.

Вторая группа факторов влияет главным образом в теплый период года и на такие элементы водного баланса, как испарение, запасы влаги в почвогрунтах, т. е. влияет на зимний сток косвенно. Учитывая это обстоятельство, а также вышеуказанные особенности освоения и размещения производительных сил региона, в частности разреженность и малолюдность населенных пунктов, в этой главе из факторов первой группы мы рассмотрим только горные работы, водохранилища и эксплуатацию подземных вод. Вопросы о влиянии водопотребления и водоотведения не рассматриваются из-за невозможности учесть это влияние зимой, когда сток рек прекращается вследствие их перемерзания.

Горные работы. Территория криолитозоны представляет собой регион с большим экономическим потенциалом. Развитие производительных сил здесь определяется главным образом наличием больших запасов весьма ценных полезных ископаемых. В хозяйстве региона главной отраслью является горнодобывающая промышленность, на долю которой приходится 38 % совокупного обшественного продукта. Ведущими полезными ископаемыми, освоение и разработка которых определяют современный характер развития производительных сил региона, а также специализацию его районов в перспективе, являются золото, алмазы, олово, сурьма, вольфрам, ртуть, уголь, газ, нефть. Разработка месторождений полезных ископаемых в районах распространения многолетнемерзлых пород коренным образом преображает мерзлотно-гидрогеологические условия речных бассейнов: изменяются условия питания и разгрузки подземных вод, происходит переформирование подрусловых таликовых зон, образуются техногенные наледи. Так, горные работы, проводимые при разработке месторождений, формируют на поверхности речных бассейнов характерный техногенный рельеф: карьеры, котлованы, отвалы, траншеи, канавы и т. д. Долины многих рек представляют собой многократно отработанный ландшафт с нарушенным режимом поверхностного и подземного стока. Следует также отметить, что проведение горных работ всегда связано с осущением горных пород месторождений. В результате уровни подземных вод снижаются, образуются депрессионные воронки зеркала подземных вод, создаются дополнительные условия инфильтрации речных вод в осушенные горные породы. В зависимости от глубины карьеров уровень подземных вод снижается на десятки, а иногда и на сотни метров [143]. Кроме того, в районах многолетней мерзлоты одной из причин изменения режима подземных вод являются горно-подготовительные работы, проводимые зимой на дражных полигонах, а также строительство различных линейных сооружений (автомобильных и железных дорог, нефте- и газопроводов и др.). При проведении этих работ может происходить перехват подземных вод, разгружающихся в реки, нарушение режима питания и разгрузки подземных вод. Тем самым создаются условия для снижения речного стока вплоть до его прекращения и формирования техногенных наледей в руслах рек. Установлено, что при строительстве дорог число наледей на реках увеличивается в 2-5 раз [143], при этом зимний сток не перемерзающих рек может снизиться на десятки процентов [146].

Водохранилища ГЭС. Освоение гидроресурсов криолитозоны началось в 50-е – 60-е годы. В 1967 г. дала промышленный ток турбина первой в Якутии гидроэлектростанции (Вилюйская ГЭС–1,2). В настоящее время в пределах региона созданы Иркутское, Братское, Усть-Илимское, Зейское, Вилюйское и Колымское водохранилища. Строятся Вилюйская ГЭС–3 в 140 км ниже ГЭС–1,2 и Бурейская ГЭС.

Создание водохранилищ вносит существенные изменения в зимний режим рек. Их влияние заключается в перераспределении речного стока по сезонам, уменьшая его в весенне-летний период и значительно увеличивая в зимний период года. Например, создание Вилюйского водохранилища вызвало увеличение расходов воды в декабре — феврале в 70 — 80 раз, Зейского — в 20 раз по сравнению с естественными.

Эксплуатация подземных вод для водоснабжения населенных пунктов, промышленных объектов и добычи соли. Нарушения режима подземных вод наиболее часто связаны с их эксплуатацией как источников водоснабжения. Водоснабжение многих крупных городов (Чита, Улан-Удэ и др.), населенных пунктов и горнорудных предприятий Сибири и Дальнего Востока осуществляется за счет подземных вод из одиночных скважин, шахтных колодцев, водозаборных галерей и т. д. Многие инфильтрационные водозаборы расположены в пределах сквозных подрусловых таликов [35], реже за их границами. Работа водозаборов приводит к снижению уровня подрусловых подземных вод на 6 – 8 м, иногда до 10 – 12 м, а в некоторых случаях аллювиальные отложения полностью иссушаются к концу зимы, обусловливая промерзание рек на значительные расстояния.

Исследуемый регион располагает огромными запасами каменной соли, месторождения которых залегают на обширной площади речных долин Вилюя и средней Лены. Происхождение залежей соли связано здесь с существованием соленосных толщ, образующих

соляные купола и озера соляного карста [176]. Примечательно, что ресурсы каменной соли содержат около 99 % хлористого натрия и всего 0,2 % нерастворимого остатка.

В настоящее время добыча соли производится лишь на Кемпендяйских соляных источниках в количестве 4 тыс. т в год методом естественного зимнего вымораживания ее из рассолов, собираемых в специально устроенный бассейн. Кроме того, до 50 тыс. т соли в год завозится. Между тем, например, только суммарный дебит Кемпендяйских соляных источников составляет 72 тыс. т в год [176], т.е. возможности для увеличения добычи соли в регионе являются весьма благоприятными.

5.3. Изменение характеристик зимнего стока под влиянием хозяйственной деятельности

Количественная оценка влияния хозяйственной деятельности на зимний сток и перемерзание рек включает три основные задачи [107, 109]:

and the second of the second o

- 1) установление начала существенного изменения основных гидрологических характеристик зимнего режима рек, начиная с которого их естественные значения становятся неоднородными, т. е. проверка исходной гидрометеорологической информации;
 - 2) выявление причин этой неоднородности по данным о сроках ввода в эксплуатацию промышленных объектов и начале проведения хозяйственных мероприятий;
- 3) количественная оценка изменений характеристик зимнего стока рек за установленные периоды влияния хозяйственной деятельности.

Для количественной оценки антропогенных изменений характеристик зимнего стока использован статистический метод, основным условием применимости которого является наличие достаточно длительных рядов наблюдений. С учетом этого условия для анализа влияния хозяйственной деятельности на характеристики зимнего стока было выбрано 13 рек с площадью водосбора от 16,6 до 1820 км². При обобщении данных использованы материалы с продолжительностью периода наблюдений более 20 лет.

Неоднородность гидрологических рядов, сроки разделения их на периоды естественного и нарушенного режима рек устанавливалась путем построения графиков связи последовательно суммированных (интегральных) значений характеристик зимнего стока исследуемой реки и рек-аналогов. Кроме того, неоднородность рядов оценена также с помощью статистических критериев Фишера и Стьюдента. При анализе ряды наблюдений считались неоднородными, если нарушение стока подтверждалось графическим и статистическим способами.

Первичный анализ по интегральным кривым позволил определить момент нарушения естественного стока. Для большинства рекперелом интегральных кривых, как правило, приходится на начало 70-х годов, что связано с началом интенсивных горных разработок. Для рек чаще наблюдается тренд убывания. На ряде рек отмечаются незначительные отклонения зимнего стока с последующим его восстановлением. Причиной таких отклонений является, по-видимому, чередование маловодных и многоводных лет на реках, которое компенсирует непродолжительное и небольшое по своим масштабам антропогенное воздействие. Пример интегральной кривой, показывающей изменение характеристики зимнего стока, приведен на рис. 5.1.

Ниже приводятся основные результаты оценки влияния хозяйственной деятельности на зимний сток рек криолитозоны на современном этапе.

Из-за ограниченности гидрометеорологической информации количественная оценка изменений характеристик зимнего стока под влиянием горных работ выполнена по отдельным речным бассейнам. Исследованиями охвачен район интенсивного развития золотодобывающей промышленности в горных районах Северо-Востока.

Разработка россыпных месторождений золота в бассейнах рек ведется в основном открытым способом: драгами и промприборами. При этом для очистки стоков после промывки россыпей строится множество временных дамб и плотин, прокладываются руслоотводные и нагорные канавы, сооружаются отстойники. Все эти мероприятия изменяют условия питания и разгрузки подземных вод, а следовательно и характер истощения речных вод.

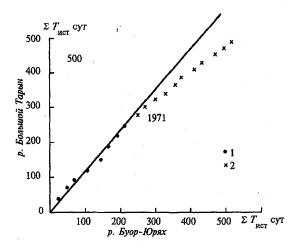


Рис. 5.1. Связь последовательно суммированных значений продолжительности истощения зимнего стока рек. 1 – годы с естественным режимом; 2– годы с режимом, нарушенным хозяйственной деятельностью.

Расчет нарушений основных характеристик зимнего стока перемерзающих рек рассматривается на примере рек Ольчан и Большой Тарын, в бассейне которых ведутся горные работы по добыче золота.

Горные работы в бассейне р. Ольчан начались в 1970 г. и с тех пор ежегодно выше гидропоста возводятся земляные плотины временного характера.

Для оценки характера и степени изменения водности р. Ольчан выполнено сравнение режима истощения зимнего стока с режимом рек-аналогов до и после начала разработки россыпных месторождений. В качестве реки-аналога принята р. Артык-Юрях в 3,5 км от устья ($F=644~{\rm km^2},~L=57~{\rm km}$), имеющая естественный сток и продолжительный ряд наблюдений. Для анализа использованы данные совместных наблюдений за период с 1949 по 1980 г. Сравнение выполнено по интегральным кривым двух основных характеристик зимнего стока: объема ($W_{\rm ист}$) и продолжительности истощения ($T_{\rm ист}$). На основе анализа интегральных кривых (см. рис. 5.1) установлено начало (год) существенных изменений режима истощения зимне-

го стока. Оказалось, что он оставался естественным до 1971 г., а его изменение совпадает по времени с началом горных работ. В дальнейшем водность р. Ольчан в период истощения зимнего стока стала постепенно уменьшаться. Однако закономерность этого спада не выдерживается и в настоящее время наблюдается тенденция увеличения водности до естественных значений, что обусловлено, видимо, тем, что спустя несколько лет после начала действия антропогенного фактора произошло восстановление запасов подземных вод, а следовательно, и водности в период истощения.

Расчет степени изменений водности р.Ольчан за установленные периоды хозяйственной деятельности выполнен методом сравнения (табл. 5.2).

Оценка изменений характеристик истощения зимнего стока р. Ольчан (нарушенный режим) методом сравнения

Таблица 5.2

	W,	_{ист} 10 ⁶ м ³	T _{HOT} CYT		
Период и его характеристика	р. Ольчан	р. Артык-Юрях (естественный режим)	р. Ольчан	р. Артык-Юрях (естественный режим)	
1949 1970	10,6	0,74	58	29	
1971 - 1980	9,14	0,47	48	31	
k	0,86	0,64	0,83	1,07	

Примечание. k — отношение значений за период 1971 — 1980 гг. к значениям за период 1949 — 1970гг.

Как видно из таблицы, осредненные за второй период значения $T_{\rm ист}$ у р. Артык-Юрях примерно на 7 % больше значений $T_{\rm ист}$ первого периода. В то же время у реки с нарушенным режимом произошло значительное сокращение не только периода истощения (на 17 %), но и объема истощения.

Путем распространения полученных соотношений k на объем и продолжительность истощения вычислены значения естественного стока и продолжительности истощения по формулам

$$W_{\text{HCT. BOCCT}} = k W_{\text{HCT. ect.}}, \tag{5.1}$$

$$W_{\text{Hot. Bocct}} = k W_{\text{Hot. ect}}, \qquad (5.1)$$

$$T_{\text{Hot. Bocct}} = k T_{\text{Hot. ect}}, \qquad (5.2)$$

ние объем и продолжительность истощения зимнего стока в годы с естественным водным режимом.

Характер и степень изменений водности $\Delta W_{_{
m нет}}$ и продолжительности периода истощения $\Delta T_{_{\mathrm{ист}}}$ определены по формулам

$$\Delta W_{\text{ист}} = W_{\text{ист.факт}} - W_{\text{ист.вост}}, \qquad (5.3)$$

$$\Delta T_{\text{uct}} = T_{\text{uct.}\phi \text{art}} - T_{\text{hct. bocct}}, \qquad (5.4)$$

где $W_{\text{ист. факт}}$ и $T_{\text{ист. факт}}$ – фактические нарушенные значения $W_{\text{ист.}}$ и $T_{\text{ист.}}$ Оказалось, что под влиянием горнорудных работ по добыче золота продолжительность истощения и водность р. Ольчан сократились по сравнению с естественной на 20 и 23 % соответственно.

Аналогичные исследования выполнены также в бассейне р. Большого Тарына у гидропоста Большой Тарын. В качестве аналогов приняты р. Буор-Юрях у пос. Куйдусун ($F = 743 \text{ км}^2$, L = 67.3 км), р. Чаптахай ($F = 28,4 \text{ км}^2, L = 8,5 \text{ км}$), р. Дунай у г.п. Ремпункт (F = 16.6 км^2 , L = 10 км), где имеются данные о продолжительности истощения за совместные годы наблюдений и речной сток не нарушен водохозяйственными мероприятиями.

Горные работы в бассейне р. Большого Тарына начались в 1963 г. Графическое сравнение данных (см. рис. 5.1) показало, что резкая неоднородность рядов наблюдается спустя несколько лет после начала горных работ и становится особенно значительной в последние годы. Естественный режим истощения р. Большго Тарына прослеживается до 1971 г.

Восстановление естественных значений $T_{\rm uct}$ и расчет степени нарушений выполнены тремя различными способами: путем сравнения за установленные периоды естественного и нарушенного режима, использования районных зависимостей и методом графического сравнения интегральных кривых.

<u>Метод сравнения</u>. Результаты сравнения значений $T_{\text{ист.}}$ за установленные периоды естественного и нарушенного режима приведены в табл. 5.3.

Данные таблицы показывают, что коэффициент соотношения k у реки с нарушенным режимом истощения (k=0.73) значительно меньше естественных его изменений, отмеченных по другим рекам. Коэффициент изменчивости принят равным 1,04, поскольку природные условия и морфометрические характеристики реки-аналога Буор-Юрях наиболее близки к исследуемой реке. Восстановление естественных значений произведено по формуле (5.2), оценка характера и степени нарушений – по формуле (5.4). За период нарушений с 1971 по 1981 г. продолжительность истощения зимнего стока сократилась на 9 суток, или на 29 % от нормы.

Таблица 5.3

Оценка изменений продолжительности истощения зимнего стока р. Большого Тарына (нарушенный режим) методом сравнения со стоком рек Буф-Юрях, Чаптахай и Дунай (естественный режим)

Hanvay v ava	$T_{\text{ист}}$, сут.						
Период и его характеристика	р. Большой Тарын	р. Буор- Юрях	р. Чаптахай	р. Дунай			
1963 – 1970	30	27	20	20			
1971 – 1981	22	28	25	22			
k	0,73	1,04	1,25	1,1			
				4.4			

Примечание. k – отношение значений за период 1971 – 1980 гг. к значениям за период 1963 – 1970 гг.

Метод районных зависимостей. Исследована связь продолжительности истощения зимнего стока с длиной реки. Восстановление естественных значений $T_{\rm нст.}$ проводилось по уравнению регрессии (3.4). Расчеты по оценке степени нарушений производились в следующей последовательности.

1. С помощью зависимости $T_{\text{ист.}} = f(L)$ по известной длине р. Большго Тарына определяется среднее многолетнее значение $T_{\text{ист.}} = 30$ суток). Аналогичным путем определяется средняя много-

летняя продолжительность истощения зимнего стока реки-аналога Буор-Юрях ($T_{\text{ист}} = 27 \text{ сут.}$).

2. Восстановление нарушенных (измененных) значений $T_{\text{ист}}$ за период с 1971 по 1981 г. выполняется по формуле

$$T_{\text{nct}71-81} = c_{71-81} T_{\text{nct}}, {(5.5)}$$

где c_{71-81} – коэффициент естественной водности за период нарушений, определяемый по данным наблюдений на р. Буор-Юрях:

$$c_{71-81} = \sum_{71}^{81} c/11$$
 и $c = T_{\text{ист},i} / T_{\text{ист}}$.

В приведенных выражениях c — отношение продолжительности истощения за каждый отдельный год $T_{{}_{\rm ucr,i}}$ к среднему многолетнему значению $T_{{}_{\rm ucr}}$.

Проведенные расчеты по формуле (5.5) показали, что $T_{\text{ист.71-81}} = 31 \text{ сут.}$

3. Значение нарушений, определенное по формуле (5.4), составляет 9 сут., т. е. 29 % от нормы.

Метод графического сравнения данных. Анализ влияния горнорудных разработок выполнен по графикам связи между последовательно суммированными (интегральными) значениями $T_{\rm нет}$ р. Большого Тарына и р. Буор-Юрях (см. рис. 5.1). Как видно из рисунка, отмечается отклонение значений $T_{\rm нет}$ в сторону снижения от общего направления связи, характерного для естественного режима истощения. Определено среднее соотношение между значениями $T_{\rm нет}$ р. Большого Тарына и р. Буор-Юрях, имевшее место до начала нарушения (k=1,11). Полученное значение соотношения распространено на период нарушений и использовано для восстановления естественных значений $T_{\rm нет}$.

Отклонения фактических значений $T_{\text{ист}}$ от предполагаемых естественных за период нарушений приведены в табл. 5.4.

Отклонение фактических значений $T_{\rm ист}$ р. Большого Тарына от естественных восстановленных по реке-аналогу

Год	$T_{\text{ист восст}}$, сут.	T 27.77	Отклонение		
ТОД		Тист факт, сут.	$\Delta T_{ m ucr}$, cyt.	%	
1971	39	29	-10	-26	
1972	21	24	3	14	
1973	34	19	-15	-44	
1974	33	18	-15	-45	
1975	33	23	-10	30	
1976	20	23	3	15	
1977	42	23	-19	-45	
1978	23	18	-5	-22	
1979	42	24	-18	-43	
1980	28	18	-10	-36	
1981	22	22	0	0	
Среднее за					
период	i 1			1	
нарушений	31	22	-9	-29	

Данные таблицы показывают, что за период нарушений с 1971 по 1981 г. среднее отклонение фактических значений $T_{\rm ист}$ от восстановленных естественных значений составило 9 дней, или 29 %.

Таким образом, расчеты по трем методам показали одинаковые результаты, что позволяет считать их надежными. Сокращение продолжительности истощения р. Большого Тарына в связи с разработкой месторождения золота за период нарушений (1971—1981г.) составило 9 дней, или 29 %.

Аналогичные расчеты выполнены по всем речным бассейнам, где ведутся горные работы. Результаты оценки приведены в табл. 5.5.

Таким образом, на всех реках, в бассейнах которых ведется разработка месторождений полезных ископаемых, происходит изменение их естественного зимнего стока, что необходимо учитывать при любых гидрологических расчетах.

Для выявления влияния горнорудных работ на сроки наступления и конца зимней межени проанализированы соответствующие интегральные кривые. Изменений в сроках зимней межени не обна-

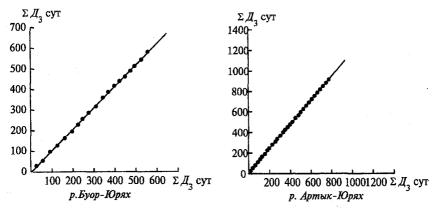


Рис. 5.2. Связь последовательно суммированных значений даты начала зимней межени на реках.

ружено (рис. 5.2).

Значительный интерес представляет оценка изменений зимнего стока р. Кемпендяй, в долине которой ведется эксплуатация высокоминерализованных подземных вод для добычи соли. В долине р. Кемпендяй сосредоточены многочисленные источники хлоридно-натриевых вод с минерализацией до $310\,\mathrm{г/л}$. Для оценки характера и степени изменения водности выполнено сравнение водного режима р. Кемпендяй с режимом р. Бирюк у с. Килиер ($F=2660\,\mathrm{km}^2$, $L=105\,\mathrm{km}$) зимой (табл. 5.6). Как показали стационарные гидрологические наблюдения, естественный водный режим прослеживается до $1961\,\mathrm{r}$. В последующий период река стала ежегодно промерзать.

Река- пункт	Река-аналог	F KM ²		L KM		Год	ΔT_{tict}	
		F p	F	L p	L	начала нару- шения	ra s No.	
							Сут.	%
Долгий	Амбардах	166	175	33	32	Нет влияния		
Талок	Амбардах	65,2	135	24	32	1972	8	35,3
Тенке	Нелькоба	1820	2110	102	88	1967	4	3,9
Омчак	Террасовый	151	84	24	13,8	1975	-9	24,7
Дебин	Омчаханджи		1160		84	1974	3	3,7
Оротукан	Дебин	740	1160	49	84	1975	10	18,7

Оценка изменений водности р. Кемпендяй (нарушенный режим) в зимнюю межень по сравнению с водностью р. Бирюк (естественный режим)

Пописка и оператория	T_{HCT} ,	сут
Период и его характеристика	р. Кемпендяй	р. Бирюк
1954 – 1960	Не перемерзала	52
1961 – 1995	65	52
k	_	1,00

Примечание. k — отношение значений за период 1961 — 1995 гг. к значениям за период 1954 — 1960 гг.

Следует отметить, что начало изменений водного режима р. Кемпендяй (1961 г.) не совпадает по времени с вводом в эксплуатацию Кемпендяйского соляного завода. По данным ВНИИСОЛЬ, первые сведения о добыче соли из Кемпендяйского соляного источника относятся к 1640 г. Регулярная добыча соли началась в 50-х годах XVII в. В XVIII и IX в. добывалось около 1 тыс. т соли в год методом вымораживания.

В период 1917—1962 гг. объем извлекаемых подземных вод увеличился (добыча соли колебалась от 1,5 до 4,1 тыс. т соли в год). Максимальная выработка соли отмечалась в 1944 г. – 12,8 тыс. т в год. С 1963 г. ежегодно добывается 4 тыс. т соли в год. Анализ этих данных позволяет сделать вывод о том, что на формирование зимнего стока р. Кемпендяй, оказывает влияние отбор подземных вод для добычи соли. В результате произошло сокращение подземного питания р. Кемпендяй и она стала ежегодно перемерзать.

Количественная оценка влияния водохранилищ на зимний сток рек весьма сложна, поскольку требует учета большого числа исходных данных о стоке, фильтрации, объеме аккумуляции, водозабора из водохранилища и др. Недостатком необходимой информации объясняется весьма малое количество исследований по данному вопросу. Приводимые в них сведения носят в основном качественный характер.

Как отмечают исследователи, влияние различных по размерам водохранилищ на гидрологический режим рек, расположенных в

зоне многолетней мерзлоты, может проявляться по-разному. В значительной степени характер влияния будет определяться мерзлотно-геолого-гидрогеологическими условиями, географическим положением водохранилища, объемом аккумуляции и другими факторами. По мнению С.П. Царевой [163], только крупные и гигантские водоемы внесут глобальные изменения в окружающую среду, влияние остальных водохранилищ будет местным, ограниченным пределами прилегающей территории.

На основании данных многолетних гидрологических наблюдений установлено, что в результате создания Вилюйского водохранилища, единственного крупного водохранилища в зоне сплошной мерзлоты, в настоящее время произошли значительные изменения в зимнем режиме р. Вилюя. Так, за 30 лет эксплуатации Вилюйской ГЭС водность р. Вилюя зимой увеличилась с 5 до 800 м³/с. Причем если зимний сток в естественном состоянии постепенно снижался с октября до мая, то в зарегулированном режиме сначала наблюдается повышение водности реки до января-февраля, затем ее снижение до конца зимы. Сроки появления ледовых образований, начало осеннего ледохода сдвинулись на более позднюю дату, а сроки начала весеннего разрушения льда – на более раннюю. Изменения сроков ледовых явлений показаны в табл. 5.7, составленной Д.Д. Ноговицыным [1988]. Ниже створа ГЭС отмечаются выходы наледей, которые при естественном режиме не наблюдались.

Заметное влияние на водный режим р. Зеи оказывает Зейский гидроузел, сооружение которого началось в 1964 г., эксплуатация – с 1976 г. По данным Н.Д. Ефремовой [1991], если в естественных условиях зимние средние месячные расходы воды р. Зеи составляли около $60-100\,\mathrm{m}^3/\mathrm{c}$, то после ввода всех шести агрегатов ГЭС их значения достигли $600-680\,\mathrm{m}^3/\mathrm{c}$.

В береговой зоне крупных водохранилищ за счет подпора и открытой фильтрации поверхностных вод в водоносные горизонты происходят значительные нарушения режима подземных вод, определяющих зимний сток рек. По данным В.С. Кусковского [1998] уровни подземных вод за весь период наблюдений на Красноярском водохранилище повысились с 8 до 68 м, а распространение подпора подземных вод наблюдается на расстоянии до 5 км от уреза воды. Кроме того, при фильтрации воды из водохранилища в его борта

начали формироваться новые водоносные горизонты. В результате изменений гидрогеологических условий в береговой зоне многих крупных водохранилищ были выявлены специфические явления: возникновение и развитие экзогенных геологических процессов (оползней, обвалов, провалов, оврагов, суффозии и др.), карстообразование, деградация линз многолетней мерзлоты и заболачивание прилегающей местности [103]. Отмеченные изменения режима подземных вод и связанные с ним физико-географические процессы отражаются не только на водном режиме рек, расположенных в пределах зоны влияния водохранилищ, но и на их гидробиологическом и гидрохимическом режимах. Поэтому тщательное гидрологическое обоснование и детальная проработка возможных альтернативных вариантов являются важнейшими задачами при создании гидроузлов.

Таблица 5.7 Изменение сроков ледовых явлений в результате регулирования стока р. Вилюя

Пункт		Осень		Весна			
	Появление ледяных образований	Начало ледохода	Начало ледостава	Начало разрушения льда	Начало ледохода	Окончание ледохода	
Сюльдюкар	8 X/11 X*	10 X/20 X	16 X/26 X	11 V/3 V	16 V/13 V	24 V/19 V	
Вилючан	6 X/12 X	11 X/14 X	17 X/21 X	9 V/8 V	16 V/15 V	23 V/23 V	
Крестях	5 X/11 X	8 X/14 X	18 X/24 X	13 V/8 V	19 V/16 V	25 V/23 V	
Сунтар	8 X/12 X	11 X/14 X	18 X/19 X	12 V/10 V	17 V/14 V	24 V/23 V	
Нюрба	8 X/11 X	11 X/13 X	.16 X/18 X	13 V/9 V	18 V/17 V	25 V/24 V	
Верхневил юйск	7 X/11 X	11 X/12 X	19 X/20 X	15 V/9 V	20 5/18 V	28 V/26 V	
Вилюйск	7 X/10 X	10 X/11 X	21 X/23 X	17 V/8 V	20 V/19 V	27 V/26 V	

Примечание. *Числитель – в естественном режиме, знаменатель – в зарегулированном режиме.

5.4. Изменение характеристик зимнего стока под влиянием глобального потепления климата

В настоящее время оценка возможных изменений водных ресурсов и водного режима рек в связи с предстоящими изменениями

климата, связанного с антропогенным ростом углекислого газа в атмосфере, является одной из приоритетных проблем гидрологической науки. Особенно актуальна эта проблема для рек криолитозоны, поскольку в последние 15 – 20 лет отмечается повышение температуры верхних горизонтов толщи многолетнемерзлых пород. Поэтому прогноз возможных изменений зимнего стока рек криолитозоны имеет исключительно большое значение и для науки и для практики.

Обзор научной литературы показывает, что существуют различные сценарии предстоящего изменения глобального климата: значительного потепления, умеренного потепления, а также похолодания [30, 46, 77, 81].

В работах большинства исследователей отмечается, что результаты мониторинга климатических полей температуры воздуха, атмосферных осадков и облачности свидетельствуют о том, что в последние годы глобальное антропогенное потепление ускоряется и эта тенденция сохранится в течение ближайших десятилетий. Так, 1995 г. оказался самым теплым годом за весь период инструментальных измерений в России [77].

По данным А.В. Павлова [117], на территории криолитозоны выявлены два периода с отчетливо выраженным повышением температуры воздуха: с конца XIX в. до 50-х годов XX в. и с середины 60-х годов до настоящего времени. Первое потепление ("потепление Арктики") вызвало повышение температуры мерзлых грунтов, возрастание размеров таликовых зон, усиление термокарстовых явлений. продвижение южной границы леса в северном направлении до 30 км и т. д. Второе потепление сопровождается потеплением верхних горизонтов толщи многолетнемерзлых пород, активизацией криогенных процессов - оползней, сплывов, термоабразии, подтаиванием ледяных линз и т. д. В случае сохранения тенденции к потеплению климата возможны весьма опасные его последствия на севере: усиление деградации мерзлых пород, активизация криогенных явлений и процессов, ухудшение криоэкологической ситуации, нарушение устойчивости инженерных сооружений и др. Возможные изменения геокриологических условий будут оказывать влияние и на режим подземных вод, определяющих зимний сток рек криолитозоны. Ожидается, что при потеплении климата и связанном с ним процессом деградации мерзлых пород активизируется разгрузка подземных вод в реки и формирование наледей, увеличится озерность и заболоченность речных бассейнов. По разным оценкам [6, 7, 77, 117], к 2050 г. ожидается сокращение площади сплошной криолитозоны на 15 – 50 % и повышение ее температуры на 2–3 °С. В связи с этим исследователи все в большей мере обращают внимание на ожидаемое в перспективе влияние глобального потепления климата на зимний сток рек криолитозоны.

Практически все современные исследования показывают увеличение водности рек зимой в связи с потеплением климата. Так, в работах [Шикломанов, Линз, 1991; Коваленко и др., 1992; Георгиевский и др., 1996] приводятся ожидаемые последствия потепления на 1−2 °С, из которых видно, что в бассейнах крупнейших рек криолитозоны следует ожидать увеличения их зимнего стока в среднем на 20 %. Согласно их расчетам, зимний сток р. Оби увеличится на 38 %, Енисея − на 42 %, Лены − на 26 %, Колымы − на 45 %. При этом его изменчивость сократится.

Выполненный в последние годы анализ вековых трендов показал, что на зарегулированных реках выявленная тенденция увеличения водности не столь значима. Как отмечает А.И. Шикломанов [170, 171], не следует ожидать столь значительного повышения (на 42%) зимнего стока р. Енисея только за счет потепления климата, поскольку бассейн р. Енисея расположен в районе с суровыми мерзлотно-климатическими условиями, поэтому возможное повышение зимних температур даже на 10–12 °C не приведет к оттепелям. По его мнению, повышение зимнего стока Енисея в 2 – 3 раза по сравнению с естественным произойдет в основном за счет хозяйственной деятельности (создания водохранилищ).

Наиболее чувствительными к изменению климатических условий являются сроки и продолжительность зимней межени. Вероятное в ближайшей перспективе потепление климата неизбежно вызовет изменение не только водного, но и ледового режима рек. Анализ существующих исследований [Шаночкин, 1995; Сильницкая, 1996; Солдатова, 1996; Гинзбург, Солдатова, 1998 и др.] позволяет сделать ряд выводов.

1. В настоящее время на большинстве рек мерзлой зоны тенденция к смягчению их ледового режима не наблюдается. Только на

реках севера ETP и Западной Сибири отмечается статистически значимый тренд смягчения, т. е. замерзание происходит позже, вскрытие — раньше, в результате продолжительность ледового периода сократилась.

- 2. В многолетних колебаниях сроков ледовых явлений не выявлена статистически значимая цикличность. Долгопериодные колебания сроков в большинстве случаев (кроме сроков вскрытия) не синхронны колебаниям средних месячных температур воздуха над северным полушарием.
- 3. На основе сопоставления линейных трендов сроков ледовых явлений с тремя вариантами прогноза глобального потепления климата оценены вероятные изменения дат наступления ледовых явлений на реках к 2005 г. Данные табл. 5.8, составленной И.И. Солдатовой, показывают незначительные изменения сроков появления и разрушения ледовых явлений к 2005 г. и даже некоторое раннее появление осенних ледовых явлений на реках Восточной Сибири (до 4 сут.). Наиболее заметные отклонения сроков в более позднюю сторону возможны для рек Западной Сибири и севера Европейской России (до 6 – 10 сут.). Указанные отклонения объясняются тем, что в районах с резко континентальным климатом (Восточная Сибирь и Дальний Восток) суровые климатические условия способствуют меньшему влиянию изменения температуры воздуха на сроки ледовых явлений на реках. Для рек севера ЕТР и Западной Сибири изменчивость вероятных сроков ледовых явлений является более значительной из-за влияния теплых воздушных масс с Атлантического океана.

Таблица 5.8 Вероятные изменения сроков появления льда (сут.) на реках к 2005 г.

Ti	1-й в	ариант	2-й вариант, и		
Название зоны	По Багрову По Будыко		наиболее вероятные	3-й вариант	
Север европейской части	2	6	2	2	
Западная Сибирь	1	2	6	1	
Средняя и Восточная Сибирь	0	0	3	0	
Дальний Восток	0	1	3	0	

- 4. В результате глобального потепления климата ожидается сокращение продолжительности периода с ледовыми явлениями и продолжительности зимней межени. По данным А.И. Шикломанова [171], продолжительность зимней межени на р. Енисее сократится на два месяца за счет смещения в сторону более ранних сроков дат наступления весеннего половодья.
- 5. Влияние повышения водности рек в осенне-зимний период, связанное с потеплением климата, на сроки появления льда будет заметным лишь на крупных реках, на которых период охлаждения водной массы является значительным. На малых и средних реках влияние осенне-зимней водности будет значительно меньшим и не будет превышать 1-2 сут., т. е. остается в пределах точности расчетов. Следует отметить, что полученный вывод не относится к рекам мерзлой зоны. Однако можно полагать, что отмеченная закономерность справедлива и для рек исследуемого региона, так как суровые климатические условия нивелируют влияние водности на сроки появления льда на малых и средних реках, значительным оно может быть лишь на крупных реках.

Таким образом, выполненный анализ позволяет сформулировать следующие положения.

Во-первых, антропогенные изменения характеристик стока зимой отмечены не только на малых, но и на средних реках и связаны с разработкой полезных ископаемых, созданием водохранилищ и эксплуатацией подземных вод. Полученные выводы по влиянию антропогенных факторов носят предварительный характер из-за ограниченности сетевых данных за режимом рек, подверженных влиянию хозяйственной деятельности. Однако результаты исследований по оценке и учету влияния рассмотренных видов хозяйственной деятельности могут быть учтены при решении практических задач рационального использования и охраны водных ресурсов региона. Во-вторых, в результате потепления климата увеличится разгрузка подземных вод в реки. Отсюда следует, что увеличение подземного питания рек может вызвать повышение зимнего стока рек региона. Наиболее интенсивно такие процессы будут происходить в южных районах криолитозоны из-за смещения ее границы к северу. Таким образом, ожидаемое глобальное потепление климата будет играть весьма важную роль в формировании стока рек зимой.

В-третьих, на зарегулированных реках, в бассейнах которых ожидается совместное влияние хозяйственной деятельности и глобального потепления климата, доля стока, формирующегося за счет потепления, будет незначительной. Зимний сток этих рек увеличится главным образом за счет антропогенного воздействия.

В-четвертых, можно предположить, что для территории сплошного распространения многолетнемерзлых пород ожидаемое повышение зимних температур воздуха не снизит суровость климатических условий региона. В связи с этим не ожидается изменений сроков появления и разрушения ледовых явлений на большинстве рек региона, за исключением северных рек Европейской России и Западной Сибири.

Заключение

Проблема количественной оценки зимнего стока рек криолитозоны сложна и многообразна. Ее сложность связана прежде всего со слабой гидрологической и гидрогеологической изученностью этой территории. До настоящего времени закономерности формирования подземных вод, питающих реки зимой, их взаимосвязь с речными водами изучены недостаточно полно. Критический анализ существующих методов показал, что большинство расчетных схем не учитывают дискретность подземного стока во времени и по площади речного бассейна, поэтому базируются на использовании интегрального показателя условий формирования стока рек и их связи с дренируемыми водоносными горизонтами - площади водосбора. Недостаток расчетных схем усугубляется также многозначностью и неопределенностью понятий "промерзание" и "перемерзание". Все это осложняет гидрологические исследования и затрудняет разработку практических рекомендаций по расчету стока, в частности по расчету зимнего стока малых и средних рек в данном регионе.

К настоящему времени накоплен сравнительно большой объем исходной гидрометеорологической информации о зимнем стоке рек криолитозоны. Его обобщение и анализ позволяют уточнить существующие представления о формировании и закономерностях изменения зимнего стока рек региона и на этой основе разработать новые методы его расчета при отсутствии данных гидрометрических наблюдений.

С этой целью автор исследовала общие закономерности его формирования с учетом генезиса и изменения под влиянием хозяйственной деятельности на базе использования современной технологии расчетов с применением компьютерной техники. Установлено, что вследствие дискретности подземного стока во времени и по пло-

щади речного бассейна формирование зимнего стока происходит не равномерно со всего бассейна, а лишь сосредоточенно за счет подземных вод, накопленных в летне-осенний период в таликовых зонах речных долин. В этих условиях гидрогеологический фактор (мощность и водообильность таликовых зон речных долин) и фактор предшествующего увлажнения водосбора (общие запасы воды в речном бассейне) формируют зимнюю водность рек и определяют длительность периода истощения зимнего стока, а также условия промерзания рек. В качестве показателя, косвенно отражающего мощность и водообильность таликовых зон, принят линейный параметр — длина реки. Количественным показателем общих запасов воды, накопленных в летне-осенний период к началу зимней межени, принят расход воды, при котором река переходит на подземное питание.

На основе выполненного исследования разработаны практические рекомендации по расчету характеристик зимнего стока рек в пределах сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Разработанные методы характеризуются в большинстве случаев приемлемой для практики точностью. Одним из условий объективности и обоснованности рекомендуемых методов является максимальное использование гидрометеорологической информации, а также учет особенностей формирования и распределения подземного стока в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород. В этом состоит главное отличие разработанных методов от существующих в настоящее время расчетных схем. Кроме того, их отличительной чертой является единство способа оценки характеристик зимнего стока малых и средних рек, что значительно упрощает их практическое применение.

Вопросы изучения условий формирования и закономерностей изменения зимнего стока весьма сложные, поэтому выполненные разработки по количественной его оценке еще не могут претендовать на очень высокую точность, хотя базируются на современных методах гидрологического анализа. Для дальнейшего развития и уточнения методов необходимы прежде всего расширение сети гидрологических станций и постов и улучшение мерзлотно-гидрогеологической изученности территории, а главное, развитие полевых экспериментальных гидролого-гидрогеологических исследований на

базе организации воднобалансовых станций на малых и средних реках в пределах изучаемой территории типа ст. Могот в зоне БАМ.

Дальнейшие исследования требуется сосредоточить на более детальном изучении закономерностей спада зимних расходов воды и поиску новых решений для описания процесса истощения и прекращения зимнего стока, поскольку существующие методы базируются на эмпирических моделях и не учитывают всего многообразия природных условий региона. Необходимо исследовать влияние зажорных и наледных явлений, криогенных "паводков" на процессы истощения речного стока и в связи с этим активизировать региональные исследования, раскрывающие механизм формирования и развития этих явлений на реках мерзлой зоны.

Необходимо уделить особое внимание вопросам расчета характеристик зимнего стока периодически перемерзающих рек. С этой точки зрения должны получить развитие исследования, направленные на изучение закономерностей чередования так называемых перебойных лет, т. е. лет с нулевыми значениями зимнего стока, и их группирование. Такие исследования являются большой самостоятельной проблемой, для решения которой необходимо объединение усилий гидрологов, метеорологов, гидрогеологов, мерзлотоведов.

В связи с возможными глобальными изменениями климата необходимо продолжить исследования по его влиянию на зимний сток рек криолитозоны. Особое внимание в этих исследованиях должны занять вопросы изучения возможных изменений геокриологических условий: усиление деградации мерзлых пород, активизация криогенных явлений и процессов, ухудшение криоэкологической ситуации в речных бассейнах.

,是我的现在分词,只要有一个有效的。 1900年,1900

Список литературы

- 1. Алексеев В.Р. Наледи. Новосибирск: Наука, 1987. 158 с.
- 2. Амусья А.З., Гутниченко В.Г., Шелутко В.А. О расчетах среднего многолетнего значения минимального зимнего стока для неизученных рек. Труды ГГИ, 1988, вып. 335, с. 43–53.
- 3. Амусья А.З., Ратнер Н.С., Соколов Б.Л. Минимальный сток рек: состояние и перспективы исследований. Труды ГГИ, 1991, вып. 355, с. 3–28.
- 4. Андерсон А.Б., Артемьева Н.П. Оценка стационарности многолетних колебаний низкого стока рек земного шара. Труды ГГИ, 1988, вып. 335, с. 161–175.
- 5. Андреянов В.Г. Внутригодовое распределение речного стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. 327 с.
- 6. Анисимов О.А. Оценка макроклимата криолитозоны Евразии и распределение вечной мерзлоты в условиях глобального потепления. Метеорология и гидрология, 1994, № 9, с. 12–20.
- 7. Анисимов О.А. Глобальное потепление и вечная мерзлота в северном полушарии. В кн.: Научная конференция по результатам исследований в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнений природной среды. М.: 1996, с. 46–48.
- 8. *Анисимов О.А., Нельсон Ф.Е.* Зональность криолитозоны России в условиях антропогенного изменения климата. Метеорология и гидрология, 1993, № 10, с. 87–93.
- 9. *Антонов Н.Д*. Минимальный сток рек СССР. Труды НИУ ГУГМС, 1941, серия 4, вып. 2, с. 65–89.
- 10. Антропогенные изменения климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 406 с.
- 11. *Аржакова С.К.* О промерзании рек в зоне сплошной многолетней мерзлоты. В кн.: Антропогенное воздействие на водные ресурсы Якутии, Якутск: 1984, с. 55–65.
- 12. Аржакова С.К. О классификации рек Якутии. В кн.: Водные ресурсы Сибири: изучение, использование, охрана. Красноярск: 1988, с. 37–40.

- 13. *Аржакова С.К.* Расчеты гидрографа зимнего стока на промерзающих реках Якутии. В кн.: Вопросы географии Якутии. Вып. 8. Якутск: ЯНЦ, 1995, с. 49–52.
- 14. *Аржакова С.К.* Расчеты зимнего стока и характеристик промерзания рек сплошной криолитозоны. В кн.: Тезисы докладов. Международный симпозиум «Расчеты речного стока». СПб.: Гидрометеоиздат, 1995, с. 45–46.
- 15. *Аржакова С.К.* Расчеты зимнего стока рек криолитозоны. Материалы конференции «Гидрология и геоморфология речных систем». Иркутск: Изд. Института географии СО РАН, 1997, с. 241–242.
- 16. Аржакова С.К. Гидрология северных рек. В кн.: Международная конференция "Развитие Арктической транспортной системы в XXI веке". СПб: 1999, с. 117–121.
- 17. *Аржакова С.К., Константинов А.Ф.* Водные ресурсы Южно-Якутского ТПК и их использование. В кн.: Географические исследования в Якутии. Якутск, 1983, с. 25–29.
- 18. Аржакова С.К., Кусатов К.И., Попова С.А. О расчете максимальных уровней воды криогенного "паводка" на р.Лене. В кн: Материалы конференции "Водные ресурсы Байкальского региона: проблемы формирования и использования на рубеже тысячелетий". Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 1998.
- 19. Аржакова С.К., Сикан А.В. О расчете сроков появления льда на реках криолитозоны. Труды V конференции "Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей" М., 1999, с. 98–100.
- 20. Артемьева Н.П., Куприянов В.В. Анализ циклических колебаний минимального зимнего стока рек Советского Союза. Сборник работ по гидрологии, 1988, № 20, с. 104–114.
- 21. Афанасенко В.Е. Роль долинных таликов в формировании стока подземных вод Северо-Восточной Якутии. В кн.: II Международная конференция по мерзлотоведению. Якутск, 1973, вып. 5, с. 12–17.
- 22. Бабкин В.И., Вуглинский В.С. Водный баланс речных бассейнов. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 191 с.
- 23. Бабкин В.И., Григоркина Т.Е. Водные ресурсы Дальнего Востока и их использование. В кн.: Материалы научной конференции по проблемам водных ресурсов Дальневосточного экономического района и Забайкалья. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991, с. 16–26.
- 24. Баранов В.А., Петерсен З.И., Попов Л.Н. Карты минимального стока рек Азиатской территории СССР. – Труды ГГИ, 1967, вып.139, с. 24–25.
- 25. *Бачурин Г.В.* К вопросу о классификации рек. В кн.: Доклады Института географии Сибири и Дальнего Востока СО АН СССР. Новосибирск, 1963, вып. 3.

- 26. Бейкер Дж. История географических открытий и исследований. / Пер. с англ. \mathbf{M} ., 1950. 648 с.
- 27. *Бойчук В.В.*, Голодовкина А.Д. Вопросы питания зимнего стока и наледей в условиях вечной мерзлоты. Колыма, 1966, № 2, с. 4–7.
- 28. Борщ С.В., Гинзбург Б.М., Солдатова И.И. Оценка влияния глобального потепления на сроки появления льда и разрушения ледяного покрова на реках на основе совместного использования моделей формирования ледового и водного режимов. Метеорология и гидрология, 1998, № 5, с. 97—105.
- 29. *Будыко М.И.*, *Винников К.Я.*, *Менжулин Г.В.* Современное изменение климата. В кн.: Проблемы современной гидрологии. Л.: Гидрометео-издат, 1989, с. 108–124.
- 30. Будыко М.И., Ефимова Н.А., Локишко И.Ю. Ожидаемые антропогенные изменения глобадьного климата. Известия АН СССР, 1989, № 5.
- 31. Бузин В.А. Состояние и перспективы развития методов прогноза максимальных заторных и зажорных уровней воды Забайкалья и Дальнего Востока. В кн.: Материалы научной конференции по проблемам водных ресурсов Дальневосточного экономического района и Забайкалья. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991, с. 42–50.
- 32. *Бураков Д.А.*, Земцов В.А. К расчету минимального стока в лесной зоне Западно-Сибирской равнины. Труды ЗапСибНИГМИ, 1983, вып. 56, с. 3–11.
- 33. *Быкадорова А.Я.* Минимальный зимний сток на реках Приморского края. Владивосток, 1975. 128 с.
- 34. Важнов А.Н., Кумани М.В. Меженный сток рек Камчатки. В кн.: Вопросы оценки взаимосвязи поверхностных и подземных вод и качества воды. М., 1972, с. 142–151.
- 35. Вдовин. Ю.И. Водоснабжение населенных пунктов на Севере. Л.: Стройиздат, 1980. 131 с.
- 36. *Вельмина Н.А.* Особенности гидрогеологии мерзлой зоны литосферы. М.: Недра, 1970. 326 с.
- 37. Ветошкина Н.И. Минимальный сток рек западного склона Полярного, Приполярного и Северного Урала. Труды Коми филиала АН СССР, 1973, № 26, с. 93–112.
- 38. Виноградов В.А., Руднев А.С. Гидрология в Якутии. К 50-летию Великого Октября. Сборник работ Якутской ГМО. Якутск, 1969, № 2, с. 3–15.
- 39. Владимиров А.М. Минимальный сток рек СССР. Л.: Гидрометео-издат, 1970. 214 с.
- 40. *Владимиров А.М.* Сток рек в маловодный период года. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 295 с.
- 41. Владимиров А. М. Гидрологические расчеты. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 364с.

- 42. Водные ресурсы рек зоны БАМ. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 271 с.
- 43. Водные ресурсы и режим рек Западной Сибири и Крайнего Севера в зоне прохождения магистральных газопроводов. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 120с.
- 44. Водогрецкий В.Е. Антропогенные изменения стока малых рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1990.—175 с.
- 45. Воейков А.И. Рецензия на книгу М.А. Рыкачева "Вскрытия и замерзания вод в Российской империи". Известия РГО, 1887, т. 23, с. 51–78.
- 46. Гаврилова М.К. Климат холодных регионов. Якутск, 1998. 206 с.
- 47. Гаврилова М.К. Современный климат и вечная мерзлота на континентах. Новосибирск: Наука, 1981. 111 с.
- 48. Гаррисон Э.И., Евстигнеев В.М., Христофоров А.В. Картирование характеристик речного стока (на примере Забайкалья). В кн.: Расчеты речного стока. М., 1984, с. 83–110.
 - 49. Географическое изучение Азиатской России. Иркутск, 1997. 263 с.
- 50. Геокриологические условия Западной Сибири, Якутии и Чукотки. М.: Наука, 1964.
- 51. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. М.: Недра, 1989.—515 с.
 - 52. Геокриология СССР. Западная Сибирь. М.: Недра, 1989. 454 с.
- 53. Георгиевский В.Ю. и др. Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водный режим рек территории бывшего СССР. Метеорология и гидрология, 1996, № 11, с. 89-99.
- 54. *Герасименко В.П.* Применение множественной линейной корреляции к анализу и расчетам минимального стока рек Западно-Сибирской равнины. Труды ГГИ, 1973, вып. 196, с. 185–208.
- 55. Гинзбург Б. М. Вероятностные характеристики сроков замерзания и вскрытия рек и водохранилищ. Труды Гидрометцентра СССР, 1973, вып. 118. 110 с.
- 56. Гинзбург Б. М. О расчете сроков замерзания и вскрытия рек севера Сибири. Труды Гидрометцентра СССР, 1987, вып. 295, с. 149–173.
- 57. Гинзбург Б.М., Полякова К.Н., Солдатова И.И. Вековые изменения сроков появления льда на реках и их связи с изменением климата. Метеорология и гидрология, 1992, № 12, с. 71–79.
- 58. Доброумов Б. М. и др. Некоторые аспекты влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы и режим рек зоны БАМа. Труды ГГИ, 1986, вып. 312, с. 84–89.
- 59. Доброумов Б.М., Лапук Г.А. К вопросу оценки подруслового стока перемерзающих рек зоны БАМа. Труды ГГИ, 1978, вып. 254, с. 93–99.
- 60. Доброумов Б.М., Лапук Г.А., Юницына В.П. Некоторые особенности формирования минимального стока рек зоны БАМ. Труды ГТИ, 1978, вып. 254, с. 4–15.

- 61. Догановский А.М. Особенности формирования зимнего стока в зоне вечной мерзоты. Труды ЛГМИ, 1968, вып. 30, с. 64–70.
- 62. Догановский А. М. Об участии наледей в стоке рек верховьев Яны и Индигирки. В кн.: Наледи Сибири. М.: Наука, 1969, с. 160–167.
- 63. Доманицкий А.П., Дубровина Р.Г., Исаева А.И. Реки и озера Советского Союза. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 103 с.
- 64. Донченко Р. В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 247 с.
- 65. Евстигнеев В.М. К расчетам минимального стока эпизодически перемерзающих рек Забайкалья. Вопросы гидрологии, 1965, вып. 2, с. 126—127.
- 66. *Евстигнеев В.М.*, *Сагитова Н.А.* К расчетам минимального зимнего стока неизученных рек Забайкалья. Вестник МГУ, серия 5. География. Леп. ВИНИТИ, № 1992–13, 1986. 13 с.
- 67. Евстигнеев В.М., Христофоров А.В. О возможных подходах к географическому обобщению данных по минимальному стоку. Вестник МГУ, серия 5. География, 1981, с. 41–47.
- 68. Евстигнеев В. М., Шайбонов Б.Б. Географические закономерности низкого зимнего стока рек Бурятии. Вестник МГУ, серия 5. География, 1994. № 5. с. 74–79.
- 69. Зайков Б.Д. Очерки гидрологических исследований в России. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 325 с.
- 70. Земцов В.А. Методика расчета минимального стока рек нефтегазоносных районов Западной Сибири. В кн.: Изучение и освоение новых районов Сибири и Дальнего Востока. Иркутск, 1979, с. 52–57.
- 71. Зильберштейн И.А. К изучению промерзания рек Забайкалья. Известия Казанского филиала АН СССР. Серия энергетика и водное хозяйство. 1961, вып. 3, с. 15–21.
- 72. Зильберштейн И.А. О промерзании рек Забайкалья. Известия Забайкальского филиала ВГО, 1969, т. 5, вып. 3, с. 43–49.
- 73. Зильберитейн И.А. Промерзание рек и наледи в Забайкалье. Труды Зап. Забайкал. фил. Геогр. общ. СССР, 1973, вып. 92, с. 109—111.
- 74. Зонов Б.В. Наледи и полыньи на реках Янско-Колымской горной страны. Труды Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева АН СССР, 1944, т. 4, с. 33–92.
- 75. Зонов Б.В. Особенности зимнего режима рек Северо-Востока Азиатской части СССР. Труды научной конференции по изучению и освоению производительных сил Сибири. Томск, 1942, т. 3, с. 108–110.
- 76. Игнатьева В.Н., Казаренко-Соколовская С.Н. Зимний режим реки Нижней Тунгуски и его возможные изменения в связи со строительством Туруханской ГЭС. Труды Гидропроекта, 1985, №110, с. 26–32.

- 77. Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А. Анализ современных и ожидаемых в будущем изменений климата и криолитозоны в северных районах России. Метеорология и гидрология, 1999, № 3, с. 18–27.
- 78. Йохельсон В.И. По рекам Ясачной и Коркодону. Известия РГО. Типография В. Безобразова, 1898, с. 255–290.
- 79. Калабин А.И. Вечная мерзлота и гидрогеология Северо-Востока СССР. Труды ВНИИ-I, 1960, вып. 20. 471 с.
- 80. Карпечко Ю.В., Карпечко В.А. Влияние температурного фактора на зимний минимальный сток. В кн.: Почвы Карелии и вопросы их мелиорации. Петрозаводск, 1982, с. 128–132.
- 81. Какунов Н.Б. Прогноз изменения водного режима на Крайнем Европейском Северо-Востоке. В кн.: Стратиграфия и тектоника на Европейском Северо-Востоке СССР. Геологическая конференция Коми АССР, Сыктывкар, 1982, т. 4, с. 150–153.
- 82. Коваленко В.В. и др. К оценке гидрологических последствий изменения климата. Труды РГГМИ, 1992, вып. 113, с. 3–11.
- 83. Колотаев В. Н. Изменение взаимодействия речных и подземных вод в межень по длине рек в условиях прерывистого распространения многолетней мерзлоты (на примере центрального участка зоны БАМ). Труды ГГИ, 1988, вып. 335, с. 126–140.
- 84. Колотаев В.Н. Водообмен рек и бассейнов подземных вод в районах многолетней мерзлоты. Материалы V Всес. гидрол. съезда, т. 6, с. 379–386.
- 85. Компев А. М. Особенности истощения стока рек Западной Сибири в течение зимнего сезона. В кн.: Гидроклиматические ресурсы Сибири и их использование. Новосибирск: Зап.—Сиб. кн. изд-во, 1970, с. 89–101.
- 86. Компев А. М. Исследование и расчеты зимнего стока рек (на примере Западной Сибири). М.: Гидрометеоиздат, 1973. 200 с.
- 87. Комлев А.М., Храповицкий Г.А. Гидрология рек Западной Сибири. Труды Новосибирского РГМЦ, 1967, вып. 1(5), с. 89–99.
- 88. Коковкин А.В., Урнышев А.П. Статистический анализ влияния факторов подстилающей поверхности на минимальный сток рек Большеземельской тундры. В кн.: Географические чтения, посвященные 40-летию Коми филиала ГО СССР. Сыктывкар, 1989, с. 76–83.
- 89. *Корытный Л. М.* Классификация речных систем Сибири по их величине. География и природные ресурсы. 1985, № 4, с. 32–36.
- 90. Кравченко В.В. Закономерности формирования и распространения наледей на реках юга Восточной Сибири. Гляциологические исследования в Сибири. Иркутск, 1985, с. 19–38.
- 91. *Кравченко В.В.* Роль наледей в формировании зимнего речного стока и ледяного покрова рек западной части зоны БАМа. Труды ГГИ, 1986, вып. 312, с. 34–84.

- 92. *Кравченко В.В.* Роль наледей в формировании стока рек юга Восточной Сибири. Иркутск, 1983. 52 с. Деп. в ВИНИТИ 09.03.83, №1219.
- 93. *Кравченко В.В., Гизетдинов А.М.* Расчет зимнего стока рек криолитозоны на основе восстановления его гидрографа. Труды ГГИ, 1991, вып. 355. с. 41–60.
- 94. *Крапивин И.В.* Расчет минимального суточного стока рек бассейна верхнего Енисея по данным единичных измерений в зимний период. В кн.: Исследования водных ресурсов Сибири. 1985, с. 43–45.
- 95. Кузин П.С., Бабкин В.И. Географические закономерности гидрологического режима рек.— Л.: Гидрометеоиздат, 1979.—199 с.
- 96. Кузнецов А.С. Краткая характеристика режима рек бассейна р. Малый Анюй. Сборник работ Магаданской. ГМО, 1965, вып. 1, с. 76–86.
- 97. *Кузнецов А. С.* Наледи и полыньи на Северо-Востоке СССР. Сборник работ по гидрологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1961, № 2, с. 72–86.
- 98. Ломоносов М.В. Слово о рождении металлов от трясения земли. О слоях земных. М.: Госгеолиздат, 1949, с. 170–173.
- 99. *Любимов Г.А.* О перемерзании рек зоны БАМ. Труды ГГИ, 1980, вып. 275. с. 64–73.
- 100. Любимов Г.А. Расчет временных характеристик периода зимнего стока рек зоны БАМ. Труды ГГИ, 1991, вып. 355, с. 85–93.
- 101. Львов А.В. Поиски и испытания водоисточников водоснабжения на западной части Амурской железной дороги в условиях вечной мерзлоты почвы. Иркутск, 1916. 82 с.
- 102. Майдель Г.Л. Путешествие по северо-восточной части Якутской области в 1868–1870 годах. СПб. Изд. АН, 1894–1896, т. 1–2.
- 103. Малик Л.К. Гидрологические проблемы преобразования природы Западной Сибири. М.: Наука, 1978. 180 с.
- 104. *Марков М.Л.* Роль криогенного барража в формировании стока рек районов многолетней мерзлоты. Метеорология и гидрология, 1994, № 2, с. 98–104.
- 105. Марков М.Л., Беренсен А.К. О формировании наледных полян и их влияние на гидрологический режим рек. Вопросы гидрологии сущи (доклады молодых ученых и специалистов). Л., 1985, с. 172–177.
- 106. Мельников П.И., Толстихин О.Н., Шепелев В.В. О мерзлотно-гидрогеологическом районировании Восточной Сибири. География и природные ресурсы. 1980, № 1, с. 3–10.
- 107. Методические рекомендации по учету влияния хозяйственной деятельности на сток малых рек при гидрологических расчетах для водохозяйственного проектирования. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 176 с.
- 108. Методические рекомендации по учету стока на реках в зимний и переходные периоды. Валдай, 1980. 49 с.

- 109. Методические указания по оценке влияния хозяйственной деятельности на сток средних и больших рек и восстановлению его характеристик. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 77 с.
 - 110. Методы расчета низкого стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 122 с.
- 111. *Миддендорф А.Ф.* Путешествие на север и восток Сибири. Ч. 1. СПб., 1860. 428 с.
- 112. *Налимов Ю.В.* Ледовый режим р. Анабар. Труды ААНИИ, 1967, т. 278, с. 54–65.
- 113. Некрасов И.А. Новые данные об особенностях строения и площади развития криолитозоны в пределах территории СССР. ДАН СССР. 1970, т. 4, № 3, с. 643–646.
- 114. Некрасов И.А. Талики речных долин и закономерности их распространения (на примере р. Анадырь). М.: Наука, 1967. 138 с.
- 115. Норватов А.М. Географическое распространение промерзания и пересыхания рек СССР. Труды ГГИ, 1950, вып. 6, с. 55–139.
- 116. Определение расчетных гидрологических характеристик. СНиП 2.01.14—83. М.: Стройиздат, 1985.—35 с.
- 117. Павлов А.В. Закономерности формирования криолитозоны при современных изменениях климата. Вестник МГУ, серия 5. География, 1997, с. 61—75.
 - 118. Панов Б.П. Зимний режим рек СССР. Л., 1960. 240 с.
- 119. Петенков А.В. Количественная оценка неполноты минимального стока малых неизученных рек. Труды V Всес. гидрол. съезда, 1989, т. 6, с. 479–484.
- 120. Петерсен З.И. Минимальный сток рек Забайкалья. Труды ГГИ, 1968, вып. 163, с. 41–54.
- 121. Петерсен З.И. Продолжительность промерзания рек Забайкалья. Труды Института ВОДГЕО, 1973, вып. 41, с. 70–73.
- 122. Петров Г. Н. К вопросу об определении термина гидрографическая сеть и изображении ее элементов на картах. Известия Казанского филиала АН СССР. Серия энергетика и водное хозяйство, 1961, вып. 3, с. 162–173.
- 123. Пигузова В. М. Подземное питание рек Якутии, его изменчивость и взаимосвязь с общим речным стоком. В кн.: Вопросы гидрогеологии криолитозоны. Якутск, 1975, с. 58–63.
- 124. Пигузова В. М., Толстихин О.Н. Условия формирования подземного питания горных рек криолитозоны. Труды V Всес. гидрол. съезда, 1989, т. 6, с. 365–370.
- 125. Водный баланс и ресурсы речного стока Сибири и Дальнего Востока (методология и основные результаты исследований). – СПб.: Деп. ВИ-НИТИ №1561–1596, 1996. – 347 с.

- 126. *Подъяконов С.А.* Наледи Восточной Сибири и причины их возникновения. Известия РГО, 1903, т. 39, вып. 4, с. 305–337.
- 127. Пономарев В.П. Подземное питание горных рек юга Дальнего Востока. Труды ГГИ, 1981, вып. 272, с. 25–36.
- 128. *Попов Е.Г.* Методика долгосрочного прогноза меженного стока рек. Метеорология и гидрология, 1990, № 11, с. 84–92.
 - 129. Попов О.В. Подземное питание рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 291 с.
- 130. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 447 с.
- 131. Практические рекомендации по расчету гидрологических характеристик в зоне хозяйственного освоения БАМа. Л.: Гидрометеоиздат, 1986.– 108 с.
- 132. Пространственно-временные колебания стока рек СССР /Под ред. А.В. Рождественского. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 376 с.
 - 133. Ресурсы поверхностных вод СССР. т. 3, 15, 16, вып. 1, 17, 19.
- 134. Рождественский А.В. Современное состояние и перспективы развития методов расчета речного стока при наличии данных наблюдений. В кн.: Материалы научной конференции по проблемам водных ресурсов Дальневосточного экономического района и Забайкалья. Владивосток, 1988. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991, с. 170–180.
- 135. Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 424 с.
 - 136. Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны.— M., 1983. 231 с.
- 137. Рыкачев M.A. Вскрытие и замерзание вод в Российской империи. СПб., 1886. 309 с.
- 138. Рябова Л.И. Расчет минимального зимнего стока зоны восточного участка трассы БАМ. Труды ДВНИГМИ, 1980, вып. 84, с. 77–85.
- 139. *Семивский Н*. Новейшие повествования о Восточной Сибири. СПб., 1817, прим. 6.
- 140. Сильницкая М.И. О некоторых особенностях сроков замерзания рек севера европейской части СССР. Труды ГМЦ СССР, 1988, вып. 300, с. 120–128.
- 141. Соколов А.А., Чеботарев А.И. Очерки развития гидрологии в СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 304 с.
 - 142. Соколов Б.Л. Напеди и речной сток. Л.: Гидрометеоиздат, 1975.–189 с.
- 143. Соколов Б.Л. Возможные изменения речного стока при нарушении режима подземных вод в районах многолетней мерзлоты. Труды ГГИ, 1986, вып. 312, с. 3–11.
- 144. Соколов Б.Л. Гидрология рек криолитозоны новый раздел гидрологии суши. В кн.: Проблемы современной гидрологии. Л.: Гидрометео-издат, 1989, с.195–205.
- 145. Соколов Б.Л., Саркисян В.О. Подземное питание горных рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 240 с.

- 146. Соколов Б.Л., Херсонский Э.С. Особенности гидрологического режима рек с наледями. В кн.: Исследование наледей. Якутск, 1979, с. 6–20.
- 147. Соколов Б.Л., Черная Ф.Ф. Оценка ежегодных потерь зимнего стока на образование речных наледей и речного льда (на примере рек Северо-Востока СССР). Труды ГГИ, 1981, вып. 272, с. 37–62.
- 148. Солдатова И.И. О сроках ледовых явлений на реках в условиях современного климата. Метеорология и гидрология, 1996, № 4, с. 87–94.
- 149. Соловьев П.А. Мощность поверхностной сезонно-мерзлой толщи на территории Якутии. В кн.: Геокриологические и гидрогеологические исследования Якутии. Якутск. 1978, с. 3–12.
- 150. Стеженская И.Н. Сезонный сток рек Западно-Сибирской равнины. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 67 с.
- 151. Стефанович Я.В. К вопросу о донном льде. Известия Восточно-Сибирского отдела РГО, СПб., 1898, т. 29, вып. 3, с. 191–245
- 152. Тихоцкий К.Г. О перемерзании рек Забайкалья. В кн.: Проблемы регионального зимоведения. Чита, 1968, вып. 2, с. 73–76.
- 153. *Тихоцкий К.Г.* и др. Промерзание малых рек Забайкалья. В кн.: Вопросы географии. М., 1981 с. 183–187.
- 154. Ткаченко Л.А. О вероятности перемерзания рек и нормах модулей зимнего минимального стока на юге Дальнего Востока. Труды Дальневосточного политехнического института, 1961, т. 59, с. 53–67.
- 155. Толстихин О.Н. Природные условия: Подземные воды и гидрогеологическое районирование. В кн.: Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 17: Лено-Индигирский район. Л.: Гидрометеоиздат, 1972, с. 57–66.
- 156. *Толстихин О.Н.* Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР. Новосибирск: Наука, 1974. 164 с.
- 157. Толстихин Н.И., Толстихин О.Н. Криогенез и водоносность гидрогеологических структур. В кн.: Очерки по гидрогеологии Сибири: Материалы комиссии по изучению подземных вод Сибири и Дальнего Востока. Вып.6. Новосибирск, 1974, с. 21—29.
- 158. *Толетихин Н.И.*, *Толетихин О.Н*. Подземные и поверхностные воды территории распространения мерзлой зоны. В кн.: Общее мерзлотоведение. Новосибирск, 1974, с. 192–229.
- 159. Федосеев И.А. Развитие гидрологии суши в России. М.: Наука, 1960. –300 с.
- 160. Фурман М.Ш. Условия формирования зимнего минимального стока в горном Забайкалье на примере реки Нижний Ингамакит. Труды ДВНИГМИ, 1974, вып. 43, с. 101–109.
- 161. *Чеботарев А.И.* Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. –306 с.
 - 162, Чижов А.Н., Кравченко В.В. Вопросы наблюдений за элементами

- зимнего режима рек Восточной Сибири и Дальнего Востока. Труды ГГИ, 1985, вып. 309, с. 66-67.
- 163. *Царева С.П.* Влияние водохранилищ Севера на микроклимат. В кн.: Антропогенное воздействие на водные ресурсы Якутии. Якутск, 1984, с. 28–36.
- 164. Шаночкин С.В. Пространственная структура осенних ледовых явлений на реках Северного края. Труды ГГИ, 1975, вып. 227, с. 109–115.
- 165. *Швецов П.Ф.* Краткие итоги и перспективы изучения гигантских наледей Якутии. В кн.: Мерзлотоведение, 1946, т. 1, № 1, с. 17–22.
- 166. Шелутко В.А. Численные методы в гидрологии. Л.: Гидрометео-издат,1991. 238 с.
- 167. Шепелев В.В. К вопросу о происхождении полыней на реках Восточной Якутии. В кн.: Гидрогеологические исследования криолитозоны. Якутск, 1976, с. 114—120.
- 168. Шепелев В.В., и др. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири. Новосибирск: Наука, 1984. 191 с.
- 169. Шестаков А.В. К вопросу о перемерзании рек Якутии. Труды ДВНИГМИ, 1976, вып. 58, с. 83-85.
- 170. *Шикломанов А.И.* Влияние антропогенных изменений глобального климата на сток в бассейне Енисея. Метеорология и гидрология, 1994, № 2, с. 84–93.
- 171. Шикломанов А.И. Влияние хозяйственной деятельности в бассейне и глобального потепления климата на сток р. Енисей. В кн.: Тезисы докладов. Международный симпозиум «Расчеты речного стока». СПб.: Гидрометеоиздат, 1995, с. 120.
- 172. Шикломанов И.А. Антропогенные изменения водности рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 300 с.
- 173. Шикломанов U.A. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 334 с.
- 174. *Шостакович В.Б.* Вскрытие и замерзание вод в Азиатской России. Известия Восточно-Сибирского отделения РГО, 1906, т. 37, с. 1–179.
- 175. Шперк Ф. Четыре великие сибирские реки. Научное обозрение. СПб., 1895, № 19, 20, 22, с. 497–510.
 - 176. Якутия. М.: Наука, 1965. 464 с.
- 177. Arzhakova Svetlana. Deep freezing of cryolithozone rivers. Hygrological extremes: understanding, predicting, mitigating. IUGG XXII General Assembly, Birminham, 1999, 1745–02 HS1/W/12–B4.
- 178. Lobanova H.V. Methods of Flood Water Management in Changing Conditions.— Proceedings of the Intern. Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Dubrovnik, Croatia, 14–17 September, 1998.
- 179. Northen hydrology: Canadian perspectives / Ed's T.D. Prowse, O.S.L. Ommanney. Saskatoon: NHRI, 1990. XVI, 308 p.

- 180. Scott K.M. Effects of permafrost on stream channel behavior in arctic Alaska. Washington: USA, Governm.Print.Offise.1988. 19 p.
- 181. Harrington L. The Yukon River in Canada. Canad. Geogr. Jour, 1972, VXXV, № 6, p. 200–209.
- 182. Seifried Ankc. Canadian river regimen. Freiburg. geogr. Hefte, 1972, № 12, p.119–158.

Оглавление

Предисловие	. 3
Введение	.7
Глава 1	
Условия и факторы формирования зимнего стока 1.1. Природные условия и факторы формирования зимнего стока	
рек криолитозоны	. 10
1.2. Краткая характеристика речной сети	20
1.3. Водный режим рек зимой	22
1.3.1. Зажоры	. 25
1.3.1. Зажоры 1.3.2. Наледи	. 28
1.3.3. Криогенные "паводки"	. 31
Глава 2	
Изученность зимнего стока	
2.1. Развитие научных представлений и знаний	
о водном режиме рек криолитозоны зимой	. 38
2.2. Существующие направления в исследованиях зимнего стока	
2.3. Критический анализ методов расчета зимнего стока	
2.4. Краткий анализ статистической структуры рядов зимнего стока	. 69
Глава 3	
Сток рек криолитозоны в зимнюю межень	
3.1. Зимняя межень на реках криолитозоны	
3.2. Промерзание и перемерзание рек	
3.2.1. Понятия и термины	
3.2.2. Физическая сущность процесса промерзания и перемерзания рек	
3.2.3. Типизация рек по характеру промерзания	90
3.2.4. Физическая модель процесса истощения стока	07
промерзающих и перемерзающих рек	
3.3. Закономерности процесса истощения стока не перемерзающих рек	
3.3.1. Физическая модель процесса истощения стока	121
не перемерзающих рек	126
3.4. Региональные особенности стока рек в зимнюю межень	
Глава 4	
Методы расчета зимнего стока рек криолитозоны	
4.1. Расчет характеристик зимнего стока при наличии	
и недостаточности гидрометрических наблюдений	135

4.2. Расчет характеристик зимнего стока при отсутствии	
гидрометрических наблюдений	141
4.2.1. Расчет сроков и продолжительности зимней межени	142
4.2.2. Расчет характеристик зимнего стока	
ежегодно перемерзающих рек	145
4.2.3. Расчет характеристик зимнего стока	
периодически перемерзающих рек	157
4.2.4. Расчет характеристик зимнего стока не перемерзающих рек	160
Глава 5 Влияние хозяйственной деятельности и изменений климата	
на зимний сток рек криолитозоны	
5.1. Краткий анализ хозяйственного освоения территории	
криолитозоны и особенности использования водных ресурсов регио	
5.2. Основные антропогенные факторы, влияющие на зимний сток р	ек 172
5.3. Изменение характеристик зимнего стока	
под влиянием хозяйственной деятельности	175
5.4. Изменение характеристик зимнего стока	
под влиянием глобального потепления климата	186
Заключение	192
Список литературы	195

Научное издание

Аржакова Светлана Кирилловна

Зимний сток рек криолитозоны России

Монография

Редактор О.Д. Рейнгеверц

ЛР 020309 от 30.12. 96.

Подписано в печать 01.01.2001 г. Формат 60 х 90/16. Печ. л. 13,1 Тираж 200 экз. Заказ № 915. РГГМУ. 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98