

## УЧЕТ ТВЕРДЫХ ОСАДКОВ И ЗАПАСОВ ВОДЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ПОЛЯРНЫХ РАЙОНАХ АЛЯСКИ

С. Л. Березовская

Университет Аляски, США

Университет Аляски был основан в 1917 г. в городе Фэрбэнкс (штат Аляска, США). Изначально высшее учебное заведение называлось Аляскинский Институт Сельского хозяйства и горнорудного дела и только в 1935 г. было переименовано в Университет Аляски. К 1975 г. Университет Аляски значительно расширился, в его состав вошли три основных подразделения: Университет Аляски Фэрбэнкс, Университет Аляски Анкоридж и Университет Аляски Юго-Востока.

За более чем 90-летний путь своего развития Университет Аляски Фэрбэнкс трансформировался в многопрофильный университет, сочетающий в себе техническое, естественнонаучное, гуманитарное, экономическое, юридическое и художественное направления образования. В настоящее время Университет Аляски Фэрбэнкс включает семь научно-исследовательских подразделений: Институт Геофизики, Международный Центр Арктических Исследований, Экспериментальную Станцию Сельского и Лесного хозяйства, Арктический Центр Суперкомпьютеров, Институт Арктической Биологии, Институт Морских Наук и Институт Инженерно-технических Исследований Севера. Расположенный всего лишь в 200 милях (320 км) южнее полярного круга, Университет Аляски Фэрбэнкс предоставляет уникальные возможности для полярных исследований. Мировой известностью пользуются достижения в области полярной биологии, инженерно-технических исследований севера и геофизики. Осенью 2006 г. в Университете были зарегистрированы более 9 тыс. студентов, из них 89% – студенты младших курсов и 11% – студенты выпускных курсов. Подробная информация о факультетах, приемной комиссии и системе образования доступна на электронной странице Университета <http://www.uaf.edu>.

### АЛЯСКА

Аляска – это регион живописных горных хребтов, многочисленных озер и рек, непроходимых лесов и бескрайней тундры, который расположен на северо-западе Северной Америки. Аляска занимает одну седьмую всей территории США (1 518 807 км<sup>2</sup>). Аляска отличается чрезвычайным природным разнообразием. Территория штата может быть условно подразделена на три климатических района: южный, центральный и полярный. Южный регион представляет собой горный пояс шириной около 200 миль (322 км) на побережье Тихого океана. Для южного региона характерен морской климат, который определяется влиянием теплых и влажных тихоокеанских воздушных масс. Годовые суммы осадков (90 дюймов, или 227 см) здесь самые высокие по сравнению с центральным и полярным районами. К Центральной Аляске относится регион, ограниченный Аляскинским хребтом на юге и хребтом Брукса на севере. Здесь преобладает резко выраженный континентальный климат с характерным небольшим количеством годовых осадков (20 дюймов, или 51 см) и большой амплитудой ко-

лебаний температуры воздуха, от –57 °С зимой до +32 °С летом.

Полярная территория Аляски расположена к северу от хребта Брукса, за полярным кругом (рис. 1). Холодная суровая зима длится девять месяцев в году, а летом температура воздуха редко поднимается выше +13 °С. В отличие от Центральной и Южной Аляски, на севере преобладает тундровая растительность (мхи и лишайники), редко встречающиеся низкорослые деревья и кустарники приурочены в основном к долинам рек. Необычайное разнообразие диких животных и птиц удивит даже самого бывалого путешественника. Орнитологи насчитывают более 100 разновидностей птиц. Стада северных оленей лениво оглядывают проходящих мимо людей, огромные овцебыки настороженно поднимают головы, увидев человека издалека, а вот с бурыми и полярными медведями лучше не встречаться, это самые опасные животные в заполярье. Увидеть волка – большая редкость, а полярные лисы весьма дружелюбны, по крайней мере, та парочка, которая обитает в непосредственной близости от водно-балансовой экспериментальной станции в предгорьях хребта Брукса. Эта станция была

основана в начале 1980-х годов и обладает уникальными для данной местности систематическими наблюдениями за почвами, снежным покровом, расходами воды и метеорологическими характеристиками.

Следует отметить, что начало систематических гидрологических исследований на севере Аляски во многом связано с постройкой Транс-Аляскинского нефтепровода. Его строительство длилось три года. В 1977 г. нефтепровод был введен в эксплуатацию. В памяти многих жителей Аляски хорошо сохранились времена, предшествующие строительству Транс-Аляскинского нефтепровода. Во многих полярных поселках отсутствовали системы водоснабжения и канализации, электроэнергия считалась роскошью. Потом была обнаружена нефть на арктическом побережье, и 9 лет спустя был построен нефтепровод, который пересекает весь штат Аляска с севера на юг. Нефтепровод длиной почти 800 миль (1270 км) проходит через сотни километров арктической тундры, 3 горных хребта и 34 крупные реки до нефтеналивного терминала на южном окончании нефтепровода (порт Валдиз). Благодаря нефтепроводу в наше время полярная Аляска имеет надежную систему транспортного сообщения и развитую коммуникационную инфраструктуру. Однако строительство и эксплуатация нефтепровода, а также нефтедобывающая промышленность безусловно оказывают влияние на тундровую растительность, животный мир и водные ресурсы. В зоне воздействия нефтепровода проводятся многочисленные биологические, технические и гидрологические проекты по исследованию состояния окружающей среды.

Водные ресурсы являются жизненно важным компонентом этой природной системы, реки и озера – это источник питьевой воды и рыбы для полярных поселков; нефтедобывающие компании широко используют снег и озерную воду для строительства ледовых дорог. Как было отмечено, на Арктическом побережье Аляски снежный покров преобладает в течение девяти месяцев в году (сентябрь – май) и во многом определяет водный режим озер и рек. Запасы воды снежного покрова – это основной источник питания рек, и зачастую они обеспечивают максимальные годовые расходы воды, особенно на крупных реках. На малых реках летне-осенние паводки могут обеспечить максимальные годовые расходы воды. В результате повсеместного распространения многолетне-мерзлых пород роль подземного регулирования стока весьма ограничена. В конце лета слой сезонного оттаивания составляет в среднем 50 см, в течение зимы этот слой полно-

стью замерзает, т. е. весной перед началом снеготаяния минеральные почвы полностью промерзшие. Вода, содержащаяся в снежном покрове, за исключением потерь на испарение и влагонасыщение органического слоя (мхи и лишайники), поступает непосредственно в речную сеть. Наблюдения в северных предгорьях хребта Брукса установили, что около 10% талых вод пополняет грунтовую составляющую водного баланса. Исследования гидрологических процессов в этих полярных областях Аляски во многом связаны с работами Doug Kane, L. Hizman.

Для гидрологов определение запасов воды снежного покрова перед началом снеготаяния представляет важную практическую задачу. Толщина и пространственное распределение снежного покрова широко используются при строительстве транспортных магистралей, ледовых дорог, при обеспечении водозапасов удаленных полярных поселков и, конечно же, при прогнозах весеннего половодья. В гидрологической практике применяются два способа определения влагозапасов снежного покрова: определение сумм атмосферных осадков, зарегистрированных осадкомерами за определенный интервал времени (в нашем случае за зимний период), и проведение снегомерных съемок непосредственно перед началом снеготаяния.

#### УЧЕТ ТВЕРДЫХ ОСАДКОВ С ПОМОЩЬЮ ОСАДКОМЕРОВ

Казалось бы, измерить осадки в виде дождя или снега не так уж сложно, любой сосуд (например, стакан или банка), у которого известна площадь входного отверстия, может быть использован для измерений. Однако оказалось не так просто измерить снег или, более корректно сказать, твердые атмосферные осадки, такие, как снежная крупа, снежные кристаллы или снежные хлопья. Ситуация особенно осложняется на открытых пространствах. Ветер, с одной стороны, препятствует попаданию осадков в прибор или выносит уже попавшие в него осадки, а с другой – наоборот, «надувает» в прибор дополнительные частицы осадков. На арктическом склоне Аляски этот процесс наблюдается при метелях, когда снежные кристаллы после падения на подстилающую поверхность вновь поднимаются в воздух и попадают в прибор. В результате измеренная сумма осадков может быть как больше, так и меньше их истинного значения. На самом деле до сих пор не существует суммарного осадкомера, который позволяет производить учет истинного количества твердых осадков в полярных районах.

Для уменьшения влияния ветра на измерение сумм осадков необходимо обеспечить однородный поток над входным отверстием осадкомера. Согласно экспериментальным измерениям, лучше всего уменьшает ветровой недоучет защита, состоящая из двух заборов, сделанных из планок шириной 5 см. Опыт использования подобного сооружения в Барроу был не очень успешным (рис. 2). При метелях двойная защита способствует аккумуляции снега на подветренной стороне ограждения. В случае, показанном на рис. 2, б, ветер изменил направление на 180 градусов, и сугроб оказался непосредственно в осадкомере.

В отечественных и зарубежных исследованиях огромное внимание уделяется проблемам исправления измеренных осадков и разработки новых систем для корректного учета твердых осадков. Избранные труды В. С. Голубева, И. В. Литвинова, В. Sevruck и В. Goodison могут быть использованы для подробного ознакомления с существующими методиками.

Следует отметить, что несколько лет назад был разработан и запущен в производство компанией Yankee новый тип осадкомера для измерения твердых осадков под названием «Hotplate snow gauge». В вольном переводе назовем этот осадкомер «горячие диски». Прибор состоит из двух дисков (13,5 см в диаметре) с поддерживаемой температурой дисков 70 °С; один диск направлен вверх, второй – вниз. Новизна подхода заключается в том, что в период выпадения осадков верхний диск охлаждается в результате таяния и испарения осадков, в то время как нижний диск охлаждается исключительно под воздействием ветра. Таким образом, зафиксированная разница в количестве энергии, потраченной на охлаждение верхнего и нижнего дисков, пропорцио-

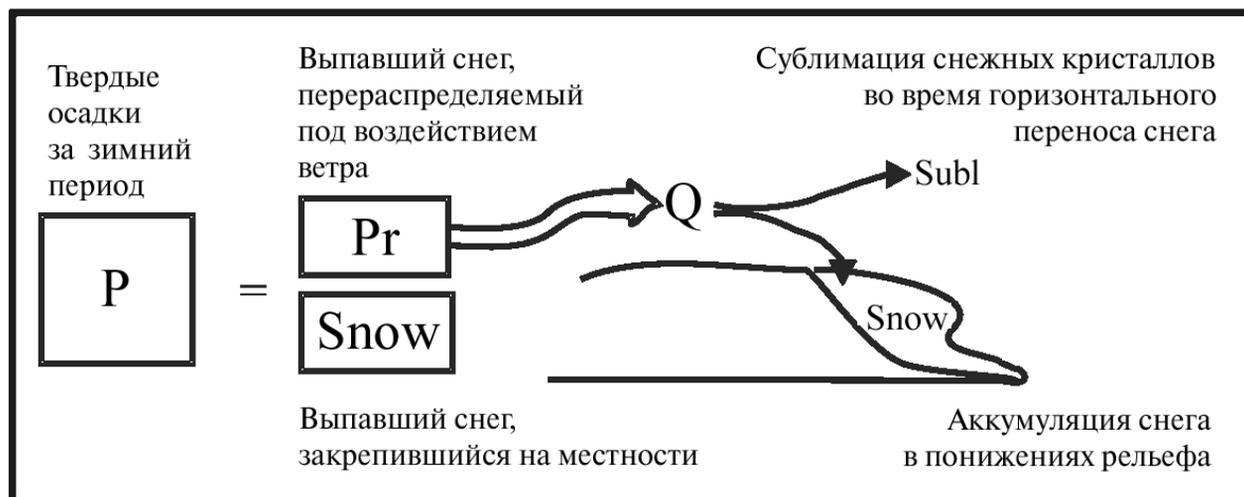
нальна количеству выпавших осадков. «Горячие диски» широко используется для измерения твердых осадков во многих регионах США. Однако применение прибора в полярных широтах с экстремально низкими зимними температурами воздуха до сих пор находится в экспериментальной разработке.

#### УЧЕТ ТВЕРДЫХ ОСАДКОВ С ПОМОЩЬЮ СНЕГОМЕРНЫХ СЪЕМОК

Имеющиеся данные о запасе воды в снежном покрове в полярных областях Аляски показывают, что количество воды, вычисленное по снегомерным съемкам, значительно превышает сумму твердых осадков, зарегистрированных осадкомерами, даже теми, которые окружены двойной защитой. В реальности подобное соотношение сложно представить, поскольку часть снежных кристаллов переходит из твердого состояния в газообразное (сублимируется) в процессе горизонтального переноса снега ветром (схема на рис. 3). Вследствие потерь на сублимацию влагозапасы снежного покрова должны быть меньше, чем обусловливающее их количество твердых осадков. Это соотношение может быть представлено в виде формулы:

$$P = \text{Snow} + \text{Subl},$$

где P – суммарные твердые осадки за зимний период, Snow – снег на поверхности земли, измеренный снегомерной съемкой, и Subl – потери на сублимацию. Следует отметить, что в северных предгорьях хребта Брукса, в горных долинах, где преобладает сильный кatabатический ветер (рис. 1), около 50% выпавших осадков сублимируются в процессе транспортировки ветром.



Р и с . 3. Схема, отображающая соотношение компонентов зимнего водного баланса в полярных областях

Поскольку процесс исправления измеренных сумм осадков является трудоемким и сложным, а сеть метеорологических станций чрезвычайно редкой (шесть станций на всю территорию полярной Аляски), на практике применяются косвенные способы учета твердых осадков. К ним относятся снегомерные съемки, цель которых – определить мощность снежного покрова либо для локальных условий метеорологической станции – «стандартная съемка», либо для характерных ландшафтных единиц: подветренный, наветренный склоны, горный хребет, овраг, русло реки и т. д. – «ландшафтная съемка». Ландшафтные снегомерные съемки перед началом снеготаяния дают гидрологам достаточно точную информацию о распределении толщины и плотности снежного покрова в пределах небольших речных бассейнов. Маршруты снегомерных съемок могут охватить все встречающиеся в пределах небольших водосборов ландшафты. На основе этих маршрутов запас воды в снежном покрове определяется пропорционально соотношению основных типов ландшафтов и характерной для них аккумуляции снега.

Несложно представить детальную снегомерную съемку в пределах малых водосборов (5 км<sup>2</sup>), которая зафиксирует характеристики снежного покрова для преобладающих ландшафтных единиц. Однако на водосборах больших бассейнов, особенно в труднодоступных горных районах, зачастую невозможно обеспечить высокую плотность наблюдений. Университет Аляски ежегодно проводит снегомерные съемки в пределах водосбора реки Купарик (8140 км<sup>2</sup>) (см. рис. 1). В сред-

нем 7 маршрутов проложено в горах, 40 маршрутов – на нижних склонах хребта Брукса и 50 маршрутов – на прибрежной равнине. Каждый маршрут имеет форму латинской буквы L и включает в себя 50 измерений толщины снежного покрова и 5 измерений плотности снега. Подробное описание маршрутов, методик и данных измерений представлено в ежегодном отчете, доступном через интернет (<http://www.uaf.edu/water/projects/foothills/reports.html>). Несмотря на то что маршруты покрывают большое разнообразие ландшафтов, достаточно сложно оценить запасы воды снежного покрова горных территорий. В нашей практике используется физически обоснованная трехмерная модель снегопереноса (SnowModel), которая позволяет воспроизводить пространственное распределение мощности снежного покрова на всей территории бассейна р. Купарик. Эта модель изначально была разработана G. Liston для условий полярной Аляски. В качестве исходных данных модель использует метеорологическую информацию, топографию и растительность. Маршруты снегомерных съемок используются для ассимиляции и валидации расчетов.

Вопросы снегопереноса в полярных районах Российской Федерации детально изучаются Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом в Санкт-Петербурге и во многом связаны с работами Николая Николаевича Брызгина. Исследования формирования снежного покрова и описание процессов снегопереноса на Аляске подробно освещены в работах Carl Benson, G. Liston и M. Sturm.

## ЛИТЕРАТУРА

- Брызгин Н. Н., Петров Л. С.** Снегоперенос и зимние осадки в полярных районах // Труды ААНИИ. 1974. С. 93–96.
- Владимиров А. М.** Гидрологические расчеты. М.: Гидрометеиздат, 1990. 365 с.
- Голубев В. С., Коновалов Д. А., Симоненко А. Ю., Товмач Ю. В.** Оценка погрешностей измерений атмосферных осадков Валдайской контрольной системой // Метеорология и гидрология. 1997. № 7. С. 108–116.
- Голубев В. С., Коновалов Д. А., Симоненко А. Ю., Товмач Ю. В.** Корректировка измерений осадков и оценка их качества по данным Валдайской гидрологической станции // Метеорология и гидрология. 1999. № 1. С. 103–113.
- Коломытц Э. Г.** Структура снега и ландшафтная индикация. М.: Наука, 1976. 206 с.
- Литвинов И. В.** Осадки в атмосфере и на поверхности земли. М.: Гидрометеиздат, 1980. 208 с.
- Benson C. S.** Reassessment of winter precipitation on Alaska's Arctic Slope and measurements on the flux of wind blown snow. Geophysical Institute, University of Alaska Report UAG R-288, September 1982. 1982. 26 p.
- Benson C. S., Sturm M.** Structure and wind transport of seasonal snow on the Arctic Slope of Alaska // Annals of Glaciol. 1993. 18. P. 261–267.
- Berezovskaya S. L., Derry J. E., Kane D. L. et al.** Snow survey data for the Kuparuk Foothills Hydrology Study: Spring 2007. July 2007, University of Alaska Fairbanks, Water and Environmental Research Center, Report INE/WERC 07.17, Fairbanks, Alaska, 2007. 21 p.
- Goodison B. E., Louie P. Y. T., Yang D.** WMO solid precipitation measurement inter-comparison. Report No. 67. 1998. WMO/TD – No. 872.
- Kane D. L., Hinzman L. D., Benson C. S., Liston G. E.** Snow hydrology of a headwater arctic basin 1. Physical measurements and process studies // Water Resources Research. 1991. 27 (6). P. 1099–1109.
- Liston G. E., Elder K.** A distributed snow-evolution modeling system (SnowModel) // J. Hydrometeorology. 2006. 7. P. 1259–1276.